

**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών**



**Διπλωματική Εργασία
Diploma Thesis**

**Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης Κλίμακας στη
Μηχανική Συμπεριφορά Σκυροδέματος (Θλιπτική και
εφελκυστική αντοχή) και Προσομοίωση των Πειραματικών
Δεδομένων**

**Experimental investigation on the size effect of tensile and compression
behavior of concrete and theoretical modeling of experimental data.**

ΚΑΝΟΣ ΑΡΓΥΡΗΣ

Συνεπιβλέποντες Καθηγητές:

Φίλιππος Περδικάρης Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Μιχάλης Πέτρου Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Αντώνιος Γιαννακόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Γεώργιος Εφραιμίδης Διδάσκων Π.Δ. 407 Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ - VOLOS
Ακαδημαϊκό Έτος 2003 - 2004

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

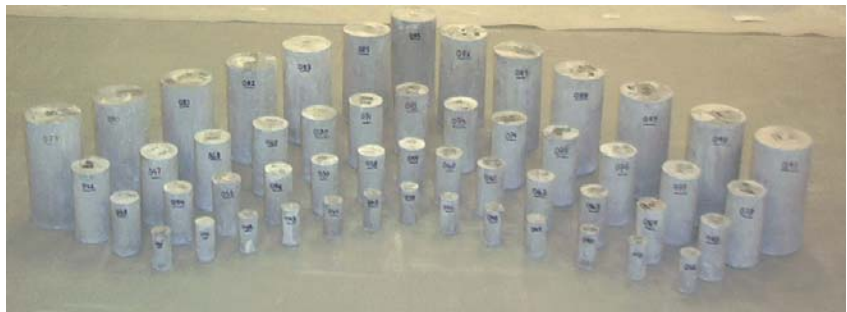


Ακαδημαϊκό Έτος 2003 - 2004

Διπλωματική Εργασία

**Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης Κλίμακας
στη Μηχανική Συμπεριφορά Σκυροδέματος και
Προσομοίωση των Πειραματικών Δεδομένων**

Φοιτητής:
Κάνος Αργύρης



Συνεπιβλέποντες Καθηγητές:

Φίλιππος Περδικάρης

Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.

Μιχάλης Πέτρου

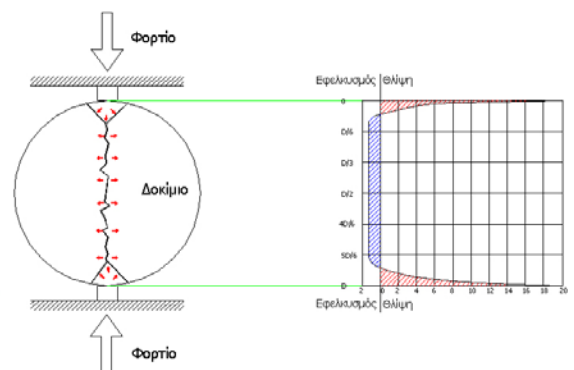
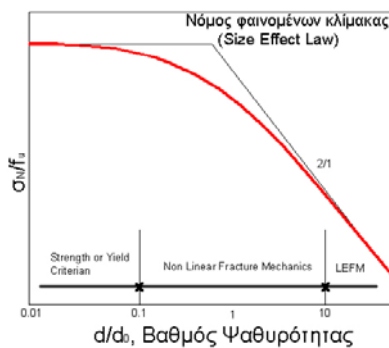
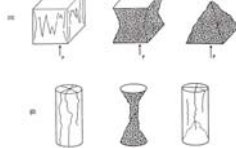
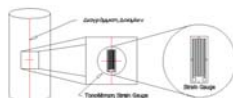
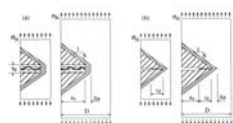
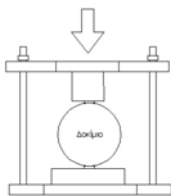
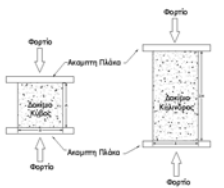
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.

Αντώνιος Γιαννακόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.

Γεώργιος Εφραιμίδης

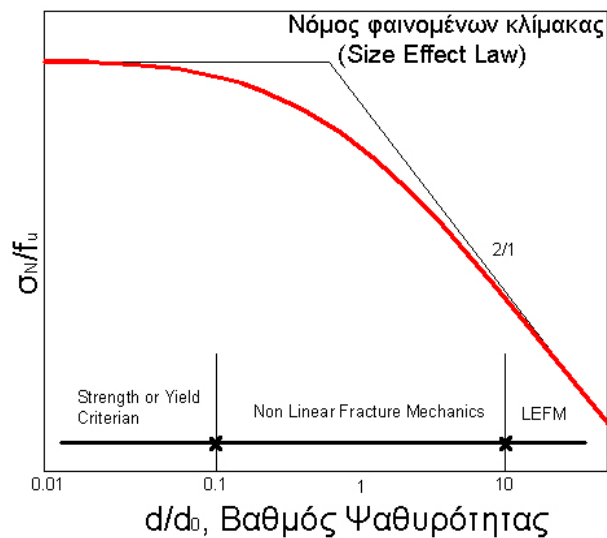
Διδάσκων Π.Δ. 407 Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ



Βόλος, Ακαδημαϊκό Έτος 2003 - 2004

Κάνος Αργύρης
Φοιτητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Βόλος

**Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης Κλίμακας στη
Μηχανική Συμπεριφορά Σκυροδέματος (Θλιπτική και
εφελκυστική αντοχή) και Προσομοίωση των Πειραματικών
Δεδομένων**



Συνεπιβλέποντες Καθηγητές:

Φίλιππος Περδικάρης Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Μιχάλης Πέτρου Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Αντώνιος Γιαννακόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
Γεώργιος Εφραιμίδης Διδάσκων Π.Δ. 407 Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ

Ευχαριστίες

Το παρόν σύγγραμμα δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη των διδασκάλων μου:

Φίλιππο Περδικάρη, Μιχάλη Πέτρου, Αντώνιο Γιαννακόπουλο και Γεώργιο Εφραιμίδη

Οι επιστημονικές τους συμβουλές πάνω στο θέμα των φαινομένων κλίμακας υπήρξαν κρίσιμες για τη διεκπεραίωση του παρόντος συγγράμματος.

Ευχαριστώ επίσης τον
Δημήτρη Καραμπερόπουλο
και τον

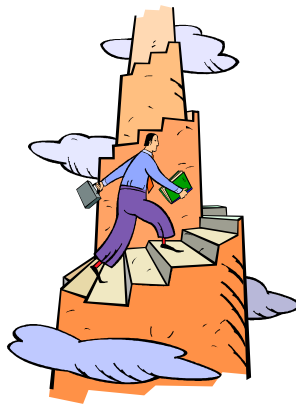
Αλέκο Κουτσελίνη

Για την τεχνική και ηλεκτρονική υποστήριξη στο εργαστήριο.

Επίσης τους συμφοιτητές μου
Ευάγγελο Ζιώγο
και

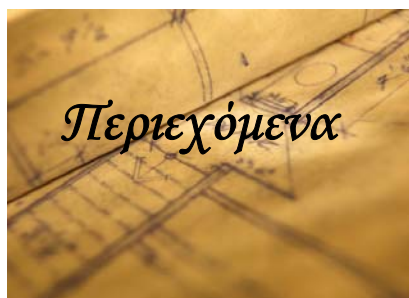
Ιωάννη Πολυκρέτη

Για τη βοήθεια και την παρέα τους στο εργαστήριο.



Αφιέρωση

Δεν θα αφιερώσω την δουλειά μου σε συγκεκριμένο άτομο. Την αφιερώνω σε όλους. Πιστεύω ότι δεν αποτελεί τίποτα παραπάνω από ένα λιθαράκι. Εύχομαι να αξίζει μία θέση πάνω στο τεράστιο και ασταθές οικοδόμημα της ανθρώπινης γνώσης που χτίστηκε από παρόμοια λιθαράκια. Χρειάστηκαν χιλιάδες χρόνια για να φτάσει η ανθρώπινη γνώση στο ύψος που σήμερα απολαμβάνει. Τίποτα δεν θα μου δώσει μεγαλύτερη χαρά από το να στηριχτούν μελλοντικοί μελετητές πάνω στο μικρό και ταπεινό αυτό έργο ενός φοιτητή, για να προωθήσουν την γνώση σε μεγαλύτερα ύψη. Έτσι ο άνθρωπος από το νέο του ύψος να μπορεί επιτέλους να **δει**.



Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2 Τα συστατικά του σκυροδέματος και η επίδραση τους στην αντοχή

- 2.1** Τα αδρανή και η επίδραση τους στην αντοχή
 - 2.1.1** Εισαγωγή
 - 2.1.2** Ταξινόμηση των αδρανών
 - 2.1.3** Προέλευση αδρανών και ειδικοί τύποι
 - 2.1.4** Ιδιότητες των αδρανών
 - 2.1.5** Κοκκομετρική διαβάθμιση και ο μέγιστος κόκκος
- 2.2** Τσιμέντο και η επίδραση του στην αντοχή
 - 2.2.1** Εισαγωγή
 - 2.2.2** Παραγωγή του τσιμέντου
 - 2.2.3** Ελληνικός κανονισμός σκυροδέματος
 - 2.2.4** Διαδικασία ενυδάτωσης και σκλήρυνσης του τσιμέντου
- 2.3** Αντοχή σκυροδέματος και πειραματική διερεύνηση
 - 2.3.1** Εισαγωγή
 - 2.3.2** Δομή και αντοχή
 - 2.3.2.1** Αδρανή και αντοχή
 - 2.3.2.2** Μεταβατική ζώνη και αντοχή
 - 2.3.2.3** Μοντέλα αστοχίας
 - 2.3.2.3.1** Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 - 2.3.2.3.2** Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
 - 2.3.2.3.3** Αστοχία του σ/ϵ ως εφελκυστική αστοχία
 - 2.3.3** Πειραματική διερεύνηση αντοχής
 - 2.3.3.1** Πειραματική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής
 - 2.3.3.2** Πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής αντοχής
 - 2.3.3.2.1** Άμεσος εφελκυσμός
 - 2.3.3.2.2** Έμμεσος εφελκυσμός
 - 2.3.3.2.3** Έμμεσος εφελκυσμός από κάμψη πρίσματος
 - 2.3.3.3** Σχέση εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής

Κεφάλαιο 3 Τα φαινόμενα κλίμακας

- 3.1** Εισαγωγή
- 3.2** Φαινόμενα κλίμακας
- 3.3** Παράγοντες επιρροής των φαινόμενα κλίμακας
- 3.4** Θεωρητικές μελέτες των φαινομένων κλίμακας
 - 3.4.1** Θεωρία συνολικής αντοχής παράλληλων ινών
 - 3.4.2** Θεωρία της ελάχιστης αντοχής ινών σε σειρά
- 3.5** Θραυστομηχανική
- 3.6** Κλασσικές μη-γραμμικές θεωρίες θραυστομηχανικής

- 3.7 Σημερινές τάσεις στη θραυστομηχανική ημιψαθυρών υλικών
- 3.8 Αντιμετώπιση των φαινομένων κλίμακας μέσω θρυστ/κης
- 3.9 Ανακεφαλαίωση των θεωρητικών μελετών
- 3.10 Πειραματικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα φ/να κλίμακας
- 3.11 Παλαιότερη πειραματική διερεύνηση των φ/νων κλίμακας
- 3.12 Παλαιότερη πειραματική διερεύνηση εφελκυστικής αντοχής
- 3.13 Αντιμετώπιση των φαινομένων κλίμακας κατά Bazant
- 3.14 Πειραματικές έρευνες και αποδείξεις
 - 3.14.1 Κατασκευές με εγκοπές ή ρωγμές
 - 3.14.2 Κατασκευές χωρίς εγκοπές ή ρωγμές
- 3.15 Φαινόμενα κλίμακας σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού
 - 3.15.1 Ο μηχανισμός ρηγμάτωσης στη διάρρηξη
 - 3.15.2 Τροποποιημένος νόμος του Bazant
 - 3.15.3 Τα φαινόμενα κλίμακας και το μοντέλο Jenq – Shah
 - 3.15.4 Το μοντέλο των ρωγμών συνοχής
- 3.16 Φαινόμενα κλίμακας σε δοκιμές θλίψης
 - 3.16.1 Μηχανισμοί θλιπτικής αστοχίας
 - 3.16.2 Ενεργειακή προσέγγιση θλιπτικής αστοχίας υποστυλώματος
 - 3.16.3 Πειραματικά αποτελέσματα
- 3.17 Η άποψη του Carpinteri
- 3.18 Διορθώσεις στο νόμο SEL του Bazant
- 3.19 Ο πολυφρακταλικός νόμος κλίμακας (MFSL) του Carpinteri
- 3.20 Πειραματικά αποτελέσματα και σύγκριση των δύο νόμων

Κεφάλαιο 4 Πειραματική διαδικασία

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Εργαστήριο και ο εξοπλισμός
- 4.3 Πειραματικές μέθοδοι
- 4.4 Τα δοκίμια
- 4.5 Αναλογία συστατικών σκυροδέματος
- 4.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση
- 4.7 Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος
- 4.8 Επίτευξη κοκκομετρικής διαβάθμισης
- 4.9 Παρασκευή σκυροδέματος
- 4.10 Κατασκευή δοκιμίων
- 4.11 Συντήρηση δοκιμίων
- 4.12 Οι δύο σειρές δοκιμίων
- 4.13 Προετοιμασία δοκιμίων
- 4.14 Τα πειράματα θλίψης
- 4.15 Πειράματα έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη
- 4.16 Το πέρας των πειραμάτων και ο απολογισμός

Κεφάλαιο 5 Τα πειραματικά αποτελέσματα

Δοκίμιο 001 – Δοκίμιο 090

Κεφάλαιο 6 Διορθώσεις διαγραμμάτων

- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Οι παρεμβολές του “καπελώματος” (Capping)
- 6.3 Οι παρεμβολές των λωρίδων φόρτισης
- 6.4 Η επίδραση της δυναμικότητας της αστοχίας
- 6.5 Η επίδραση της μηχανής
- 6.6 Ανάλυση της δυστενίας των δοκιμίων σκυροδέματος
- 6.7 Οι παρεμβολές στις μετρήσεις των strain gauges

Κεφάλαιο 7 Ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

- 7.1** Εισαγωγή
- 7.2** Η ταυτότητα της πειραματικής έρευνας
- 7.3** Το ειδικό βάρος
- 7.4** Αποτελέσματα αντοχής δοκιμών μονοαξονικής θλίψης
- 7.5** Αποτελέσματα αντοχής δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη
- 7.6** Τα πειράματα των Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη
- 7.7** Φιλοσοφία ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων
- 7.8** Ανάλυση των πειραμάτων
 - 7.8.1** Ανάλυση αποτελεσμάτων της πρώτης σειράς
 - 7.8.1.1** Η πρώτη υποσειρά θλίψης της πρώτης σειράς
 - 7.8.1.2** Η δεύτερη υποσειρά θλίψης της πρώτης σειράς
 - 7.8.1.3** Η ομάδα έμμεσου εφελκυσμού της πρώτης σειράς
 - 7.8.2** Ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης σειράς
 - 7.8.2.1** Πειράματα θλίψης δεύτερης σειράς
 - 7.8.2.2** Πειράματα εφελκυσμού δεύτερης σειράς
- 7.9** Ανάλυση των πειραμάτων Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη σε σχέση με τους δύο νόμους SEL και MFSL.
 - 7.9.1** Ανάλυση αποτελεσμάτων από τα δοκίμια τσιμεντενέματος
 - 7.9.2** Ανάλυση αποτελεσμάτων από τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος
- 7.10** Σχολιασμός και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη (Brazilian Split Cylinder Test)
- 7.11** Σχολιασμός και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων στη μονοαξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων.
- 7.12** Πρόσθετη πειραματική ένδειξη για την ύπαρξη ασυνέχειας των φαινομένων κλίμακας της μονοαξονικής θλίψης.
- 7.13** Το μέτρο ελαστικότητας
- 7.14** Πιθανός μηχανισμός φαινομένων κλίμακας.

Παράρτημα Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή



Στην εισαγωγή αναπτύσσεται το θέμα που θα διαπραγματευτεί η παρούσα εργασία και ο σκοπός της.

Κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής, είναι συνήθης, λόγω μεγάλου κόστους και σχετικών κινδύνων, η εκτέλεση πειραμάτων χρησιμοποιώντας τα ίδια υλικά και τις ίδιες συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, κλπ.) σε δοκίμια που είναι φυσικά ομοιώματα του πρωτότυπου και είναι γεωμετρικά όμοια αλλά μικρότερα σε διαστάσεις. Κατά τη διαδικασία αυτή υπεισέρχονται φαινόμενα κλίμακας που πρέπει να ληφθούν υπόψη στους κανόνες "ομοιότητας" και "σχεδιασμού" κατά τη μεταφορά των διαφόρων συμπερασμάτων από την εργαστηριακή στη φυσική κλίμακα.

Ειδική περίπτωση αποτελούν τα "πιστά προσομοιώματα" (replica models), όπου οι εργαστηριακής (μικρής) κλίμακας δοκιμές γίνονται με ακριβώς τα ίδια υλικά και στις ίδιες συνθήκες όπως στη φυσική (μεγάλη) κλίμακα. Εάν η μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού υπαγορεύεται από



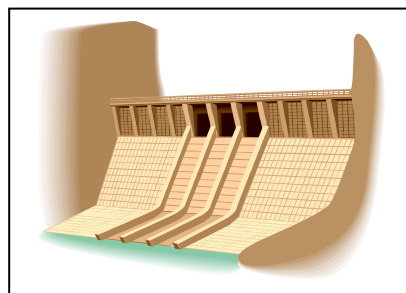
τους νόμους της κλασικής ελαστικότητας ή πλαστικότητας, τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη μικρή κλίμακα είναι ταυτόσημα με αυτά στη μεγάλη κλίμακα για γεωμετρικά όμοια δοκίμια. Η ιδιότητα αυτή όμως, που οφείλεται στην απουσία κάποιας χαρακτηριστικής κλίμακας μήκους στις κλασικές καταστατικές εξισώσεις, δεν ικανοποιείται για ένα μεγάλο αριθμό πειραματικών παρατηρήσεων όπου εμφανίζονται φαινόμενα κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά γεωμετρικά όμοιων δοκιμίων. Με τον όρο Φαινόμενα Κλίμακας (size effects) υποδηλώνεται η εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού από το μέγεθος του δοκιμίου για γεωμετρικά όμοια δοκίμια. Η ιδιότητα αυτή έχει διαπιστωθεί πειραματικά.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών ανεμπόδιστης κεντρικής θλίψης (unconfined uniaxial compression tests) και δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian split tests) σε γεωμετρικά όμοια δοκίμια σκυροδέματος διαφορετικού μεγέθους με σκοπό τη διερεύνηση και ερμηνεία των φαινομένων κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων θα γίνει με τη βοήθεια αναλυτικών προσομοιωμάτων που έχουν προταθεί την τελευταία δεκαετία για την περιγραφή των παραπάνω φαινομένων.

Τα προσομοιώματα αυτά έχουν προταθεί από πλήθος ερευνητών που ασχολούνται με τα φαινόμενα κλίμακας. Τα δύο επικρατέστερα οφείλονται στους Zdenek P. Bazant και Alberto Carpinteri. Στην παρούσα εργασία θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα και μεταξύ τους. Επίσης εφόσον χρειαστεί θα γίνουν και προτάσεις για την καλύτερη ερμηνεία και προσέγγιση των αποτελεσμάτων.

Οι συγκεκριμένες θεωρίες στηρίζονται πάνω σε σχετικά νέο (τελευταία 30 χρόνια) κλάδο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού, τη θραυστομηχανική. Η θραυστομηχανική αποτελεί σήμερα την αιχμή του δόρατος της ανάλυσης της αστοχίας των υλικών. Οι κανονισμοί των κρατών για τον σχεδιασμό των κατασκευών στηρίζονται στις θεωρίες της κλασσικής ελαστικότητας και πλαστικότητας. Η θραυστομηχανική οφείλει να εισέλθει και αυτή στους κανονισμούς για τον πιο ορθολογιστικό σχεδιασμό κατασκευών όπως φράγματα αλλά και φορείς μικρότερου σχετικά μεγέθους (δοκοί, υποστυλώματα κλπ.).

Τα φαινόμενα κλίμακας δεν συναντούνται μόνο στο σκυρόδεμα αλλά και σε άλλα ημιψαθυρά υλικά όπως είναι το γυαλί, διάφορα πετρώματα (ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες, γρανίτες κ.τ.λ.) ακόμη και στον πάγο. Η βαρύτητα των φαινομένων κλίμακας στον ασφαλή σχεδιασμό είναι σημαντική ιδιαίτερα όταν το μέγεθος των δοκιμών του υλικού που χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της αντοχής του διαφέρει σημαντικά από το μέγεθος των στοιχείων της κατασκευής. Οι αποκλίσεις της εργαστηριακά προσδιορισμένης αντοχής από την πραγματική (in-situ) μπορεί να είναι σημαντικές. Οι μέγιστες αποκλίσεις συναντούνται είτε στις πολύ μικρές κατασκευές (φυσικά προσομοιώματα μικρής κλίμακας) είτε στις πολύ μεγάλες (φράγματα σκυροδέματος).



Η γενικότερη τάση που παρατηρείται στα φαινόμενα κλίμακας είναι το ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις της κατασκευής τόσο μικρότερη είναι η αντοχή. Η σχέση όμως της αντοχής με το μέγεθος της κατασκευής αποτελεί αντικείμενο αντιπαράθεσης της επιστημονικής κοινότητας. Οι απόψεις για την ακριβή σχέση είναι πολλές με επικρατούσες τις δύο προαναφερθέντες των Bazant και Carpinteri. Βέβαια το θέμα απέχει πολύ από μια τελική λύση. Παρόλο που τα φαινόμενα κλίμακας έχουν διερευνηθεί για πρώτη φορά το 1925 από τον Gopnerman ακόμα και σήμερα βρίσκονται στο επίκεντρο της πειραματικής έρευνας. Όσο περνάνε τα χρόνια τόσο περισσότερο αντιλαμβάνονται οι μελετητές πόσο περίπλοκο είναι το όλο θέμα.

Τα φαινόμενα κλίμακας δεν επηρεάζουν μόνο την αντοχή των υλικών αλλά και πλήθος ιδιοτήτων τους. Επηρεάζουν ιδιότητες όπως είναι η ενέργεια θραύσης και ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας. Βασικά το πρόβλημα είναι ενεργειακό και συνοψίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για την επέκταση μιας ρωγμής. Η ενεργειακή αντιμετώπιση αποτελεί επέμβαση της θραυστομηχανικής στο πρόβλημα.

Το παρόν σύγγραμμα αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο είναι το θεωρητικό όπου γίνεται μία αναδρομή στο θέμα της αντοχής του σκυροδέματος και τους τρόπους εξακρίβωσής της. Επίσης γίνεται μία λεπτομερέστερη αναφορά στα φαινόμενα κλίμακας. Παρουσιάζονται οι παλαιότερες έρευνες πάνω στο θέμα καθώς και αναφέρονται οι σημερινές απόψεις. Το δεύτερο σκέλος της εργασίας είναι το πειραματικό. Στο τμήμα αυτό περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Στο τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συνοπτικά και προσομοιώνονται με τα μοντέλα του Bazant και του Carpinteri.

Στο πειραματικό σκέλος της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν πάνω από 80 πειράματα. Σε μερικά από τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα για την εξακρίβωση της συμπεριφοράς των δοκιμίων στην εκάστοτε φόρτιση. Εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης κεντρικής θλίψης και δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη μέσα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα πειράματα συντελέστηκαν μέσα στο νέο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος χρησιμοποιώντας τον πιο σύγχρονο ηλεκτρονικό και μηχανικό εξοπλισμό διαθέσιμο σήμερα στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 2

Τα συστατικά του σκυροδέματος και η επίδρασή τους στην αντοχή



Περιεχόμενα

- 2.1 Τα αδρανή και η επίδρασή τους στην αντοχή
- 2.2 Το τσιμέντο και η επίδρασή του στην αντοχή
- 2.3 Αντοχή σκυροδέματος και πειραματική διερεύνηση

2.1 Αδρανή και η επίδραση τους στην αντοχή

2.1.1 Εισαγωγή

Τα αδρανή αποτελούν σημαντικότατο συστατικό του σκυροδέματος καταλαμβάνοντας το εξήντα με ογδόντα τοις εκατό (60%-80%) του όγκου του. Ο ρόλος τους στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι καθοριστικός αφού επηρεάζουν την αντοχή, τις παραμορφώσεις και την ανθεκτικότητά του.

2.1.2 Ταξινόμηση των αδρανών

Τα αδρανή ταξινομούνται με βάση το μέγεθος, το βάρος, το σχήμα και την προέλευσή τους. Με κριτήριο εάν το μέγεθος τους ξεπερνάει ή όχι τα 5 mm χωρίζονται σε λεπτά και σε χονδρά. Επίσης ανάλογα με την πυκνότητα των κόκκων ταξινομούνται σε σχέση με το βάρος τους. Ειδικότερα ελαφριά θεωρούνται τα αδρανή που η πυκνότητά τους δεν ξεπερνάει τα 2000 kg/m³. Για πυκνότητες αδρανών μεταξύ 2000 kg/m³ και 3000 kg/m³ θεωρούνται κανονικού βάρους. Ενώ για πυκνότητες άνω των 3000 kg/m³ θεωρούνται βαριά. Με βάση το σχήμα τους τα αδρανή χωρίζονται σε στρογγυλά, κυβοειδή,γωνιώδη, πλακοειδή και επιμήκη. Τέλος με βάση την προέλευσή τους χωρίζονται σε τεχνικά, φυσικά, συλλεκτά, και θραυστά.

2.1.3 Προέλευση αδρανών και ειδικοί τύποι

Τα φυσικά αδρανή κανονικού βάρους είναι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρασκευή σκυροδέματος. Τα αδρανή των συνήθων σκυροδεμάτων προέρχονται από ιζηματογενή πετρώματα που είναι συνήθως ασβεστολιθικής ή πυριτικής ορυκτολογικής σύστασης. Συνήθως η παρασκευή των αδρανών πραγματοποιείται από λατομεία με ειδικό εξοπλισμό για τη θραύση των κόκκων σε διάφορα μεγέθη.

Υπάρχουν όμως και ειδικοί τύποι αδρανών. Σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται από τα ελαφριά αδρανή η κίσηρη, ο περλίτης, η διογκωμένη άργιλος και η διογκωμένη σκωρία υψικαμίνων. Τα ελαφριά αδρανή χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το βάρος της κατασκευής. Από τα βαριά αδρανή, ειδικοί τύποι αδρανών θεωρούνται ο βαρίτης, ο μαγνητίτης, ο αιματίτης, ο λιμωνίτης, ο ιλμενίτης, ο φωσφορικός σίδηρος ακόμα και ο σίδηρος. Τα βαριά αδρανή χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί το βάρος του σκυροδέματος σε τεχνικά έργα όπως είναι πυρηνικοί αντιδραστήρες.

2.1.4 Ιδιότητες των αδρανών

Η γνώση των βασικών ιδιοτήτων των αδρανών είναι απαραίτητη για την ορθότερη επιλογή τους κατά τη σύνθεση του σκυροδέματος.

Ιδιότητες όπως είναι η πραγματική και η φαινόμενη πυκνότητα, η υγρασία και η ικανότητα απορρόφησης, η καθαρότητα, το σχήμα και η υφή τους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος.

Η θλιπτική αντοχή, η αντοχή σε επιφανειακή φθορά και το μέτρο ελαστικότητας αποτελούν ιδιότητες που εξαρτώνται από το πορώδες. Οι μηχανικές ιδιότητες των αδρανών είναι σαφώς ανώτερες από τις αντίστοιχες του σκυροδέματος. Παραδείγματος χάριν, οι θλιπτικές αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας των περισσοτέρων συμπαγών ασβεστόλιθων και του γρανίτη, κυμαίνονται στα 150 – 300 MPa και 60 – 90 GPa, αντίστοιχα, ενώ μερικοί ιζηματογενείς ασβεστόλιθοι και ψαμμίτες έχουν μικρότερες αντοχές, της τάξης των 50 – 100 MPa. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος η ελάχιστη αντοχή αδρανών για την παρασκευή σκυροδέματος είναι της τάξης των 65 MPa (Πρότυπο ΕΛΟΤ-408). Αδρανή με αντοχή 45 – 65 MPa μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή σκυροδέματος φέροντος οργανισμού και αδρανή με αντοχή μικρότερη των 45 MPa επιχρισμένο οικοδομικό σκυρόδεμα εφόσον ικανοποιούν τις απαιτήσεις αδρανών του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος και εφόσον από τη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος προκύπτει σκυρόδεμα της απαιτούμενης αντοχής.

Σχετικά με την αντοχή και την επιφανειακή φθορά στην κρούση, ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος περιγράφει συγκεκριμένη μεθοδολογία ελέγχου των ιδιοτήτων αυτών που ονομάζεται μέθοδος Los Angeles. Μέσω της μεθόδου αυτής το αποτέλεσμα της απώλειας βάρους λόγω απότριψης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 40%. Σαν ελάχιστη ποσότητα αδρανών για τον έλεγχο Los Angeles ορίζονται τα 30 kg για το γαρμπίλι και τα 40 kg για το κανονικό χαλίκι.

Εκτός από υψηλή αντοχή τα αδρανή πρέπει να έχουν σταθερό όγκο και να μην αποσαθρώνονται από την επίδραση των καιρικών συνθηκών. Δηλαδή, να μην παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις όγκου και απώλειας υλικού λόγω ύγρανσης, ξήρανσης, ψύξης και απόψυξης. Τα αδρανή που κατέχουν την παραπάνω ιδιότητα ονομάζονται υγιή. Γενικότερα τα αδρανή που κατέχουν μία διάταξη πόρων ώστε να συγκρατούν την υγρασία και να μην είναι εύκολη η απομάκρυνσή της ενδέχεται να μην είναι υγιή. Το πορώδες των αδρανών δεν αποτελεί δείκτη “υγείας” τους. Η υγεία των αδρανών προσδιορίζεται με βάση την Αμερικανική προδιαγραφή ASTM C88, κατά την οποία μετρίεται η απώλεια του υλικού μετά από πέντε (5) εναλλαγές υγρασίας ξήρανσης παρουσία κορεσμένου διαλύματος θεικών. Η άμμος πρέπει να παρουσιάζει απώλεια μικρότερη από 10% και τα χονδρότερα αδρανή μικρότερη από 12%. Εάν το υλικό δεν καλύπτει τις απαιτήσεις αυτές τότε το παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα μπορεί να ελεγχθεί σε εναλλαγές ψύξης-απόψυξης. Αμερικανική προδιαγραφή για τον έλεγχο ψύξης-απόψυξης είναι η ASTM C290. Σύμφωνα με την προδιαγραφή αυτή το δείγμα κρίνεται ικανοποιητικό εάν παρουσιάζει συντελεστή απώλειας μικρότερο από 20%. Η ελάχιστη ποσότητα για τον προσδιορισμό της

υγείας των αδρανών είναι 10, 20, 30 kg για άμμο, γαρμπίλι και κανονικό χαλίκι αντίστοιχα.

2.1.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση και ο μέγιστος κόκκος

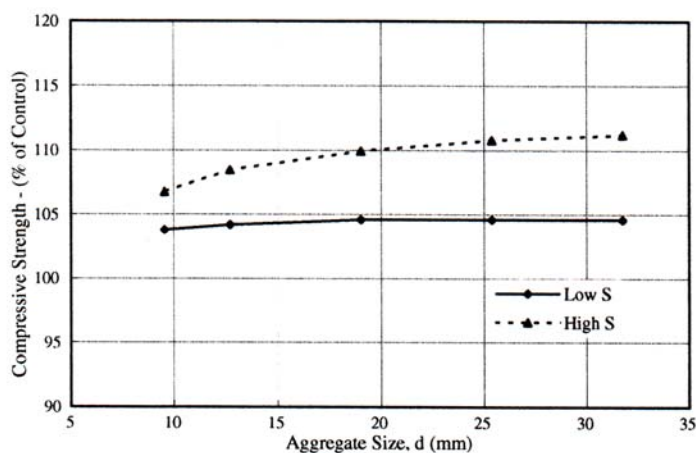
Τα αδρανή αποτελούνται από κόκκους διαφορετικών μεγεθών και η κοκκομετρική διαβάθμιση έχει μεγάλη σημασία για τη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος. Όταν η διαβάθμιση των αδρανών είναι ομαλή, με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν όλο το φάσμα, τα κενά μεταξύ των κόκκων είναι μικρά και απαιτείται μικρότερη ποσότητα τσιμεντοπολτού για την πλήρωσή τους. Αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους και στην αύξηση της ογκοσταθερότητας του σκυροδέματος. Η καλή διαβάθμιση των αδρανών βελτιώνει και την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος.

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης γίνεται με βάση σειρά προτύπων κοσκίνων. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος η ομάδα των προτύπων κοσκίνων μπορεί να είναι είτε της Γερμανικής σειράς (DIN 4187 και 4188) είτε της Αμερικανικής (ASTM E11). Και οι δύο σειρές κοσκίνων έχουν τετράγωνες βροχίδες και συμβολίζονται τα μεν Γερμανικά με βάση τη διάσταση της πλευράς της βροχίδας σε mm και τα μεν Αμερικανικά με βάση τη διάσταση της βροχίδας σε ίντσες ενώ για μεγέθη μικρότερα των 9.5 mm με No. Α, όπου Α είναι ο αριθμός των βροχίδων ανά ίντσα μήκους.

Η διάσταση του μεγίστου κόκκου των αδρανών επηρεάζει σε κάποιο βαθμό το κόστος των υλικών για τη σύνθεση σκυροδέματος ορισμένων απαιτήσεων. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγιστο μέγεθος των κόκκων τόσο μικρότερη είναι και η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Άρα τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα του τσιμεντοπολτού που απαιτείται για την παρασκευή του σκυροδέματος. Επομένως το κόστος της παραγωγής μειώνεται. Γενικά όμως το μέγεθος του μεγίστου κόκκου περιορίζεται από κατασκευαστικούς κανόνες που ορίζουν την μέγιστη διάσταση των κόκκων σε σχέση με τη διάμετρο του σιδηροπλισμού, την απόσταση μεταξύ τους, τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων και την απαιτούμενη επικάλυψη σκυροδέματος.

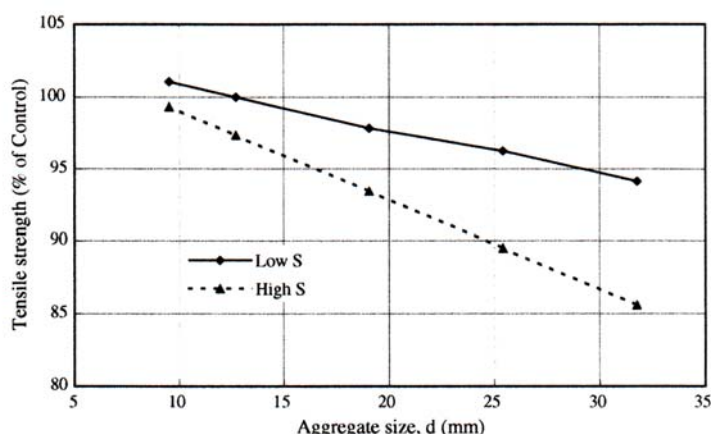
Ο μέγιστος κόκκος όμως επηρεάζει και την αντοχή του σκυροδέματος. Στην Ελλάδα ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο κόκκο θραυστών αδρανών να είναι περίπου 30 mm. Έχει αποδειχτεί από μεγάλο πλήθος ερευνών ότι το μέγεθος, το σχήμα, η επιφανειακή υφή, και άλλες ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στην επίδραση των προηγούμενων ιδιοτήτων στα χαρακτηριστικά της μεταβατικής ζώνης, που είναι μία στενή ζώνη μεταξύ των κόκκων των αδρανών και του τσιμεντοπολτού όπου ο τελευταίος παρουσιάζει αδυναμίες εξαιτίας μικρορωγμών και λοιπών αδυναμιών. Εκτεταμένη αναφορά στην μεταβατική ζώνη γίνεται στο Κεφάλαιο 2.3 καθώς και σε άλλα σημεία της παρούσας εργασίας.

Μάλιστα, σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε πρόσφατα διερευνήθηκε η επίδραση του μεγέθους των αδρανών στην αντοχή του σκυροδέματος. Στην έρευνα των Tulin Akcaoglu et al. (2003) διαπιστώθηκε ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνει ενώ η εφελκυστική αντοχή μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των αδρανών. Η επίδραση βέβαια του μεγέθους των αδρανών, προσεγγίζεται στη μεταβατική ζώνη. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυβικά, διαστάσεων 10 cm x 10 cm x 10 cm από τσιμεντοπολτό με ένα μεταλλικό σφαιρικό αδρανές στο κέντρο του δοκιμίου. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC-High Strength Concrete) και σε σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής (LSC-Low Strength Concrete). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα 2.1.1 και 2.1.2 για τη θλιπτική αντοχή και αντοχή έμμεσου εφελκυσμού, αντίστοιχα.



Σχ.2.1.1 Διάγραμμα σχέσης θλιπτικής αντοχής με το μέγεθος της μεταλλικής σφαίρας (αδρανές)

Σχ.2.1.2 Διάγραμμα σχέσης αντοχής έμμεσου εφελκυσμού με το μέγεθος της μεταλλικής σφαίρας (αδρανές)



Τα παραπάνω διαγράμματα προέρχονται από τη δημοσίευση των Tulin Akcaoglu et al. (2003).

2.2 Τσιμέντο και η επίδραση του στην αντοχή

2.2.1 Εισαγωγή

Το τσιμέντο (cement) αναμειγμένο με νερό είναι η συνδετική ύλη στην παραγωγή σκυροδέματος, κονιαμάτων, υλικών αρμολόγησης κτλ. σε κάθε είδος κατασκευής. Αποτελεί πρακτικά το συνδετικό υλικό μεταξύ των αδρανών στο σκυρόδεμα και συμμετέχει στην μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, τόσο την εφελκυστική όσο και τη θλιπτική.

Οι ρίζες του τσιμέντου μπορεί να ανιχνευτούν στους αρχαίους Ελληνικούς και Ρωμαϊκούς χρόνους, αλλά το σύγχρονο τσιμέντο ουσιαστικά εφευρέθηκε το 1824 από τον Άγγλο J. Aspdin που συνέθεσε τεχνητά μια συνδετική κονία που είχε τις ίδιες ιδιότητες με τη γνωστή τότε ασβεστολιθική πέτρα των ορυχείων της νήσου Portland της Αγγλίας. Έτσι επικράτησε ο όρος Portland τσιμέντο που είναι υδραυλική κονία, δηλαδή πήζει και σκληραίνει με την παρουσία νερού.

Σύμφωνα με τη Βρετανική προδιαγραφή British Standards 12:1991 που ακολουθεί τις προτάσεις της CEN για τα Ευρωπαϊκά πρότυπα για τα τσιμέντα, το τσιμέντο είναι ένα λεπτά διαμερισμένο ανόργανο υλικό που σε ανάμιξη με το νερό σχηματίζει μια υδραυλική συνδετική κονία. Η κονία αυτή πήζει και σκληραίνει μέσω αντιδράσεων και διεργασιών ενυδάτωσης και μετά τη σκλήρυνση αποκτά αντοχή και σταθερότητα, ακόμα και μέσα στο νερό.

Η σπουδαιότητα του τσιμέντου ως δομικό υλικό είναι εμφανής στην καθημερινή ζωή αποτελώντας με τα προϊόντα του - σκυρόδεμα, επιχρίσματα κλπ. - το δείκτη της τεχνολογικής ανάπτυξης της εποχής μας παράλληλα με την κατανάλωση των προϊόντων του χάλυβα.

2.2.2 Παραγωγή του τσιμέντου

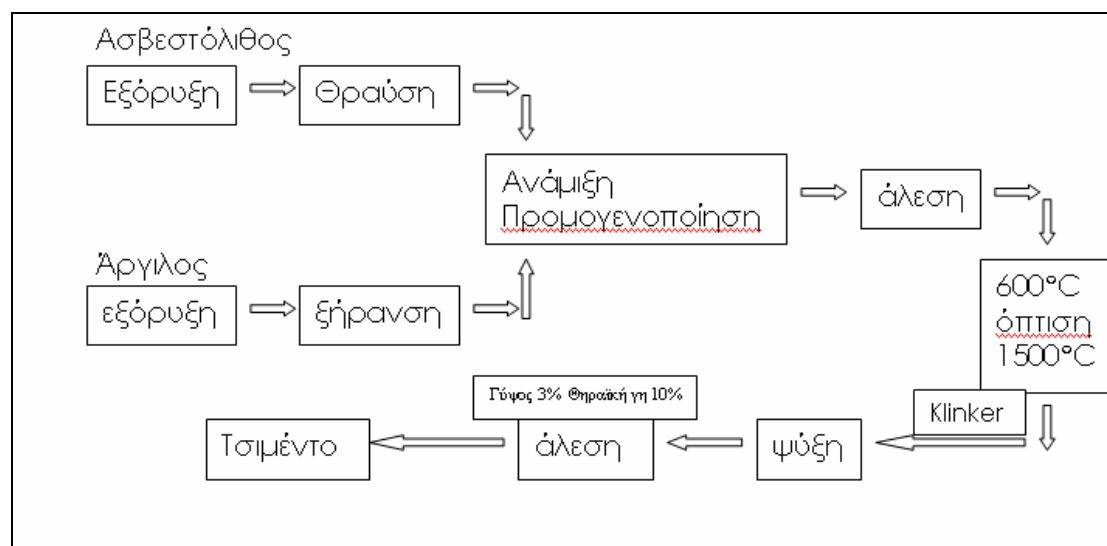
Το Portland τσιμέντο παράγεται βασικά από ασβεστολιθικά και αργιλικά πετρώματα των οποίων τα κυρία συστατικά είναι οξείδια του ασβεστίου και πυριτίου που όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζουν τις υδραυλικές πυριτικές ενώσεις του ασβεστίου που είναι τα δραστικά στοιχεία του τσιμέντου. Σήμερα στην παραγωγή του τσιμέντου έχει επικρατήσει η ξηρά μέθοδος όπου η φάση της άλεσης και της τροφοδοσίας γίνεται "εν ξηρώ" σε σύγκριση με την υγρή μέθοδο όπου η φάση αυτή γινόταν με τη μορφή υδάτινων αιωρημάτων (αυξημένη κατανάλωση ενέργειας).

Τα διάφορα στάδια της παραγωγής του τσιμέντου είναι:

1. Μεταφορά και θραύση πρώτων υλών (<30 mm).
2. Αναλογική τροφοδοσία και άλεση σε λεπτό διαμερισμό θραυστών πρώτων υλών προς παραγωγή της "φαρίνας" (<40 μ m).
3. Όπτιση σε περιστρεφόμενους μεταλλικούς κυλίνδρους της "φαρίνας" που έχει ήδη προοδευτικά θερμανθεί στους προθερμαντήρες μέχρι

τους 600°C - για δύο ώρες σε θερμοκρασίες που φτάνουν μέχρι 1500°C (παραγωγή κλίνκερ).

4. Ψύξη και συνάλεση του κλίνκερ με μικρό ποσοστό γύψου ή και άλλων προσθέτων προς παραγωγή του τσιμέντου (διαμέτρου κόκκων : 2-80 μm με μέση τιμή 20 μm και με ειδική επιφάνεια περίπου 300 m²/kg)



Σχ.2.2.1 Διαδικασία Παραγωγής Τσιμέντου

Στην Ελλάδα, κατά την τελευταία φάση, το κλίνκερ αλέθεται μαζί με ποζολάνες, οι οποίες έχουν υδραυλικές ιδιότητες και μειώνουν το κόστος, και μπορεί να είναι:

- Φυσικές ποζολάνες, όπως η θηραϊκή και η Μηλαϊκή γη (ηφαιστειακά υλικά που αφθονούν στην Ελλάδα)
- Ιπτάμενη Τέφρα, παραπροϊόν της καύσης του λιγνίτη στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς Μεγαλόπολης.
- Σκωρία Υψικάμινου, κοκκοποιημένη σκωρία που παράγεται κατά την κατεργασία σιδηρομεταλλεύματος σε υψικάμινο.

Μερικές φορές κατά την ανάμιξη προστίθενται και ειδικά φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά, τα πληρωτικά (fillers), με σκοπό τη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του τσιμέντου και κατ' επέκταση του σκυροδέματος.

2.2.3 Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος

Ο Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος αναφέρεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες τσιμέντου ανάλογα με τη σύνθεσή του. Η κάθε κατηγορία έχει διαφορετικές χημικές ιδιότητες και διαφορετική μηχανική αντοχή.

Τύπος 1 - Τσιμέντο Portland

Συστατικά: Klinker + γύψος 2-3% + filler 3%

Τύπος 2 - Τσιμέντο Portland με Ποζολάνες

Συστατικά: Klinker + γύψος 2-3% + filler 3% + Ποζολάνες 20%

Τύπος 3 - Ποζολανικό τσιμέντο Portland

Συστατικά: Klinker + γύψος 2-3% + filler 3% + Ποζολάνες 20-30%

Τύπος 4 - Τσιμέντο Portland Ανθεκτικό σε θειικά άλατα

Συστατικά: Klinker + γύψος 2-3% + filler 3%

2.2.4 Διαδικασία ενυδάτωσης και σκλήρυνσης του τσιμέντου

Η ενυδάτωση του τσιμέντου αρχίζει από την επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου και προχωράει προς το εσωτερικό τους με συνεχή επιβραδυνόμενο ρυθμό. Η αύξηση της λεπτότητας της άλεσης του τσιμέντου ενώ αυξάνει το κόστος παραγωγής οδηγεί σε πιο γρήγορους ρυθμούς ενυδάτωσης και συνεπώς και σε πιο γρήγορη ανάπτυξη των αντοχών. Λόγω της διαφορετικής του σύνθεσης τα συστατικά του τσιμέντου ενυδατώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς συνεπώς έχουμε και διαφορετικό ρυθμό αύξησης της αντοχής του εκάστοτε συστατικού του.

Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου έχουν ως εξής:

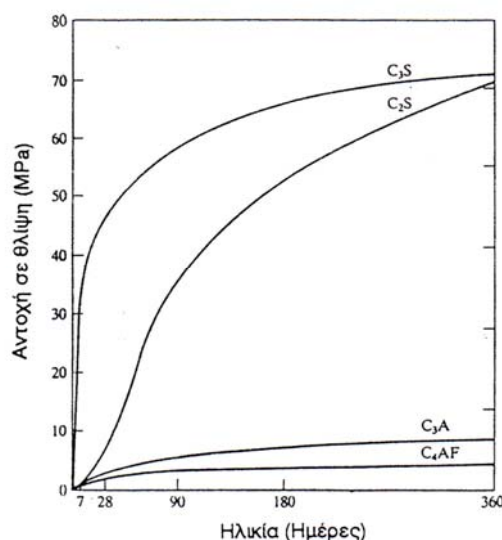
Για το C₃S: $2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$

Για το C₂S: $2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$

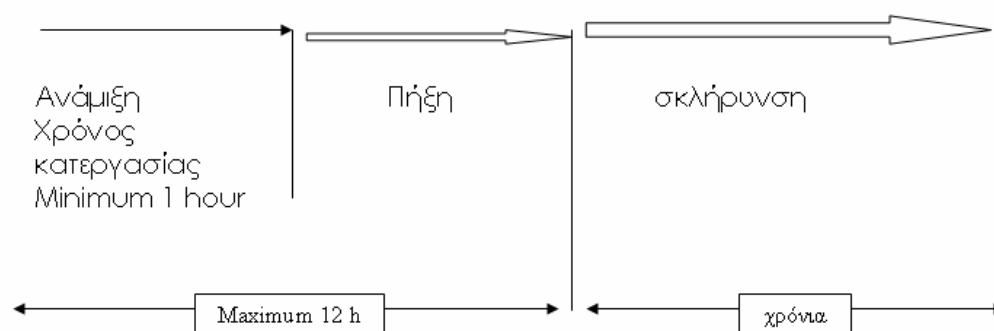
Για το C₃A: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Για το C₄AF: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Ca}(\text{OH})_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

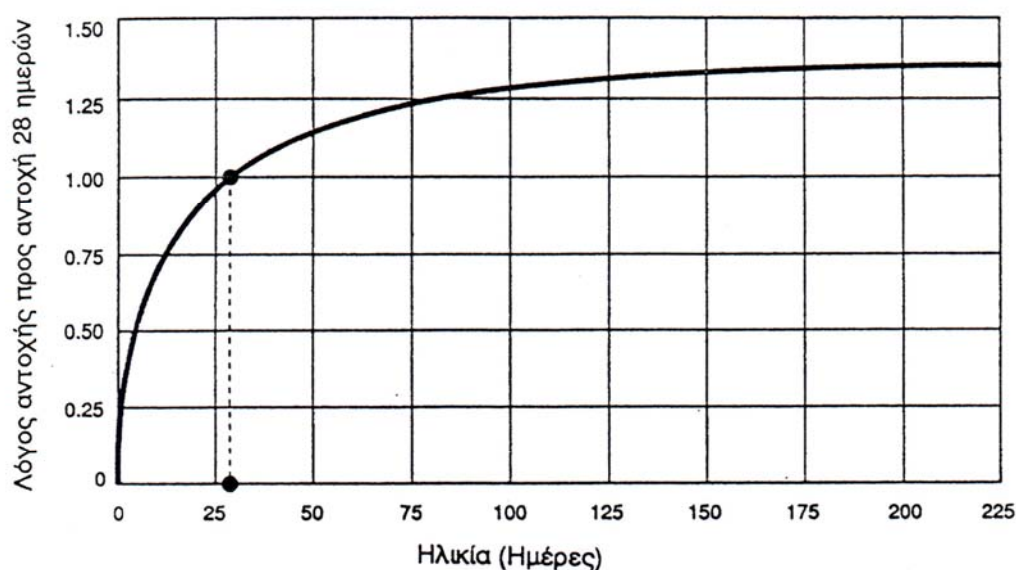
Στο σχήμα 2.2.2 παρουσιάζεται η ανάπτυξη της αντοχής του εκάστοτε συστατικού στο τσιμέντο κατά τη διάρκεια 360 ημερών. Η συνδυασμένη αντοχή είναι η συνολική αντοχή του τσιμέντου.



Σχ.2.2.2 Ανάπτυξη της αντοχής των χημικών ενώσεων του τσιμέντου



Σχ.2.2.3 Διάγραμμα πήξης και σκλήρυνσης του τσιμέντου



Σχ.2.2.4 Διάγραμμα ονομαστικής αντοχής του τσιμεντοπολτού

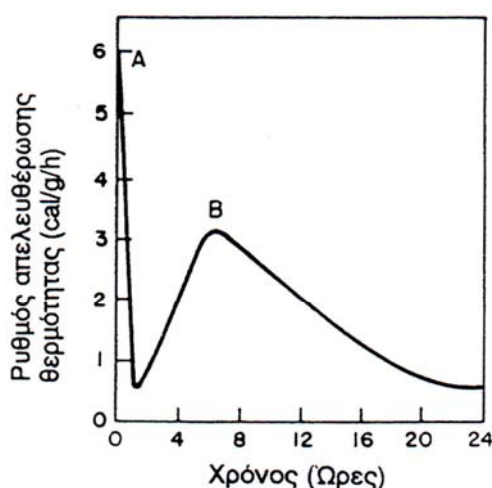
Σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς θεωρούμε ως αντοχή σχεδιασμού την αντοχή σε 28 ημέρες. Η αντοχή του τσιμέντου αλλά και κατ' επέκταση του σκυροδέματος αυξάνεται γενικότερα και μετά από τις 28 ημέρες με συνεχώς μειούμενο ρυθμό. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η αντοχή του τσιμέντου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το ρυθμό ενυδάτωσής του. Επομένως στην αρχή όταν η ενυδάτωση των κόκκων του τσιμέντου πραγματοποιείται με γοργούς ρυθμούς η αύξηση της αντοχής είναι άμεση. Αργότερα όμως, όταν ο ρυθμός της ενυδάτωσης μειώνεται, μειώνεται και ο ρυθμός αύξησης της αντοχής. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές στο Σχ. 2.2.4

Η ενυδάτωση του τσιμέντου αποτελεί μια εξώθερμη αντίδραση με μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας μία έως δύο μέρες μετά την ανάμιξη. Ο ρυθμός με τον οποίο εκλύεται θερμότητα αντικατοπτρίζει τον ρυθμό της ενυδάτωσης και συνεπώς τον ρυθμό αύξησης της αντοχής. Ειδικότερα το εκάστοτε συστατικό του τσιμέντου εκλύει θερμότητα με διαφορετικό ρυθμό κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης.

Συστατικό	3 ημέρες	90 ημέρες	13 χρόνια
C ₃ S	58	104	122
C ₂ S	12	42	59
C ₃ A	212	311	324
C ₄ AF	69	98	102

Σχ.2.2.5 Εκλυόμενη θερμική ενέργεια ενυδάτωσης (Cal/g) των χημικών ενώσεων του τσιμέντου

Ο ρυθμός της θερμότητας ενυδάτωσης κατά τα πρώτα στάδια της πήξης και αρχικής σκλήρυνσης του τσιμεντοπολτού είναι έντονος στα πρώτα λεπτά της ενυδάτωσης, γεγονός που αντιστοιχεί στην ενυδάτωση αργλικών και θειικών συστατικών. Κατόπιν μειώνεται απότομα μόνο για να αρχίσει να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι τις πρώτες 4-8 ώρες ενυδάτωσης, οπότε ολοκληρώνεται η τελική πήξη, και τέλος αρχίζει και πάλι να μειώνεται με την έναρξη της σκλήρυνσης.



Σχ.2.2.6 Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας κατά την πήξη και αρχική σκλήρυνση

2.3 Αντοχή σκυροδέματος και πειραματική διερεύνηση

2.3.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα παρουσιάζει την ευρύτερη χρήση από όλα τα άλλα δομικά υλικά σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην Ελλάδα προτιμείται ως κυρίαρχο φέρον δομικό υλικό κατασκευής οικοδομημάτων. Η παγκόσμια κυριαρχία του οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

1. Στην εξαιρετική συμπεριφορά του υλικού στο νερό (ακόμα και σήμερα σώζονται υδραγωγεία που κατασκευάστηκαν από σκυρόδεμα της Ρωμαϊκής εποχής)
2. Στην πολύ μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις.
3. Στην ευκολία με την οποία μορφώνεται το σκυρόδεμα σε διάφορα σχήματα ανάλογα με την εκάστοτε ανάγκη διαμόρφωσης φορέων.
4. Στη φθηνή και εύκολη παρασκευή του.

2.3.2 Δομή και Αντοχή

Το Σκυρόδεμα παρασκευάζεται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό. Σε μακροσκοπική θεώρηση του, προκύπτει ότι το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών ενωμένα μεταξύ τους με ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό. Η αντοχή του σκυροδέματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Ο πολτός αυτός προκύπτει από τη διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.

Από μικροσκοπική σκοπιά η αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται από την αντοχή των δεσμών των μορίων του τσιμεντοπολτού μεταξύ τους καθώς και μεταξύ των αδρανών. Εκτός από τα αδρανή και τον τσιμεντοπολτό υπάρχει και μια μεταβατική ζώνη η οποία είναι η διεπιφάνεια μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Η ζώνη αυτή έχει πάχος περίπου 10 – 50 μm και είναι γενικά ασθενέστερη από τα προαναφερθέντα συστατικά.

Έτσι το σκυρόδεμα αποτελεί ένα πολυφασικό υλικό αφού αποτελείται από τρεις ζώνες, τα αδρανή, τον τσιμεντοπολτό και τη μεταβατική ζώνη μεταξύ τους. Επίσης η κάθε ζώνη είναι από μόνη της πολυφασική. Τα αδρανή αποτελούνται από διάφορα ορυκτά, περιέχουν μικρορωγμές και κενά, ενώ ο τσιμεντοπολτός αλλά και η μεταβατική ζώνη αποτελούνται από διάφορα στερεά σωματίδια, πόρους και μικρορωγμές.

Η αντοχή του σκυροδέματος λοιπόν εξαρτάται από την αντοχή των τριών προαναφερθέντων φάσεων. Όμως το θέμα της αντοχής του σκυροδέματος δεν είναι τόσο απλό. Το μέγεθος, το σχήμα και η μέθοδος

κατασκευής του δοκιμίου καθώς και η ηλικία, φυσική κατάσταση και κατανομή υγρασίας μέσα στη μάζα του δοκιμίου επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του. Επίσης η ορθότητα της μεθόδου ελέγχου της αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά μεγέθη.

2.3.2.1 Αδρανή και αντοχή

Τα αδρανή αποτελούν βασικό συστατικό του σκυροδέματος και όπως προαναφέρθηκε συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό και στην αντοχή του. Τα αδρανή ονομάζονται έτσι γιατί αποτελούν συστατικό του σκυροδέματος που είναι χημικά αδρανές ως προς το τσιμέντο. Συμβάλουν κυρίως στο βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και την μεταβολή όγκου του σκυροδέματος. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες για τις ιδιότητες του σκυροδέματος είναι το πορώδες, το σχήμα και η υφή των αδρανών. Με εξαίρεση την κίσηρη, τα αδρανή έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τα λοιπά συστατικά του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν την αντοχή του άμεσα αλλά έμμεσα μέσω του σχήματος και του μεγέθους τους. Όταν σχηματίζονται ρωγμές στο σκυρόδεμα η αλληλεμπλοκή των αδρανών κατά μήκος των ρωγμών αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα της αντοχής του σκυροδέματος.

2.3.2.2 Μεταβατική ζώνη και αντοχή

Η μεταβατική ζώνη στο σκυρόδεμα επηρεάζει την αντοχή του και τις ιδιότητές του σε μεγάλο βαθμό. Η ύπαρξη της μεταβατικής ζώνης εξηγεί μία σειρά από φαινόμενα που παρουσιάζονται στο σκυρόδεμα:

1. Το σκυρόδεμα είναι ψαθυρό υλικό σε εφελκυσμό αλλά αρκετά ανθεκτικό σε θλίψη.
2. Ενώ τα συστατικά του σκυροδέματος συμπεριφέρονται σε θλίψη γραμμικά ελαστικά το σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη ανελαστική συμπεριφορά.
3. Ο ενυδατωμένος τσιμεντοπολτός έχει πάντα μεγαλύτερη αντοχή από το σκυρόδεμα για την ίδια περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την ίδια ηλικία ενυδάτωσης και τον ίδιο λόγο N/T .
4. Η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται όσο αυξάνονται οι διαστάσεις των χονδρών αδρανών. Το φαινόμενο θα διερευνηθεί, μεταξύ άλλων, στη συγκεκριμένη εργασία.
5. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι πάντα μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη του τσιμεντοπολτού, ακόμα και αν τα αδρανή έχουν ιδιαίτερα μικρή διαπερατότητα.
6. Σε περίπτωση πυρκαγιάς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώνεται ταχύτερα από τη θλιπτική αντοχή του.

Η ύπαρξη της μεταβατικής ζώνης μπορεί να εξηγηθεί από την ιδιότητα των αδρανών να προσροφούν νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην άμεση περιοχή γύρω από το εκάστοτε χονδρό χαλίκι ο λόγος N/T

του τσιμεντοπολτού να είναι υψηλότερος από ότι μακριά από αυτό. Ως αποτέλεσμα έχουμε την ανάπτυξη προσανατολισμένων κρυστάλλων κάθετων στην επιφάνεια των αδρανών με μεγαλύτερες διαστάσεις από ότι στον υπόλοιπο τσιμεντοπολτό. Άμεσο αποτέλεσμα στην ύπαρξη των κρυστάλλων αυτών είναι η αύξηση του πορώδους του τσιμεντοπολτού στις περιοχές αυτές. (Maso 1980)

Η μικρή αντοχή της μεταβατικής ζώνης οφείλεται στην ύπαρξη μικρορωγμών των οποίων η ποσότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος και η διαβάθμιση των αδρανών, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ο λόγος N/T, ο βαθμός συμπύκνωσης του νωπού τσιμεντοπολτού, οι συνθήκες συντήρησης, η υγρασία περιβάλλοντος κ.ά. Για παράδειγμα, σκυρόδεμα με κακή διαβάθμιση αδρανών ενδέχεται να παρουσιάσει προβλήματα διαχωρισμού των συστατικών του κατά τη συμπύκνωση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό λεπτών στρωμάτων νερού γύρω από τα αδρανή (που είναι παχύτερα όσο μεγαλύτερα είναι τα αδρανή) και ιδιαίτερα στο κάτω μέρος τους. Η μεταβατική ζώνη που αντιστοιχεί σε τέτοιους σχηματισμούς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε ρηγματώσεις λόγω εφελκυστικών τάσεων που προέρχονται από διαφορικές παραμορφώσεις μεταξύ αδρανών και ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού (π.χ. λόγω ξήρανσης ή ψύξης του σκυροδέματος). Έτσι, η μεταβατική ζώνη στο σκυρόδεμα εμφανίζει μικρορωγμές προτού καν αυτό φορτισθεί. Παράγοντες που επιφέρουν αύξηση του μεγέθους και του αριθμού των μικρορωγμών είναι η συστολή ξήρανσης, τα μόνιμα φορτία που επιφέρουν υψηλές τάσεις και τα κρουστικά φορτία.

Η επιρροή της μεταβατικής ζώνης στις ιδιότητες του σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η αντοχή της μεταβατικής ζώνης είναι και το άνω όριο της αντοχής του σκυροδέματος. Η ανάπτυξη και η επέκταση ρωγμών στη ζώνη αυτή γίνεται σχετικά εύκολα. Έχει παρατηρηθεί ότι για θλιπτικές τάσεις της τάξης του 40-70% της αντοχής του σκυροδέματος η ρηγματώση στη μεταβατική ζώνη είναι έντονη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να παρουσιάζει ανελαστική συμπεριφορά παρόλο το γεγονός ότι τα συστατικά του έχουν ελαστική γραμμική συμπεριφορά. Για πολύ μεγάλες τάσεις η συγκέντρωση τάσεων στους πόρους και στις μικρορωγμές του τσιμεντοπολτού αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα να έχουμε την ρηγματώση της μεταβατικής ζώνης και επέκταση των ρωγμών αυτών στον τσιμεντοπολτό.

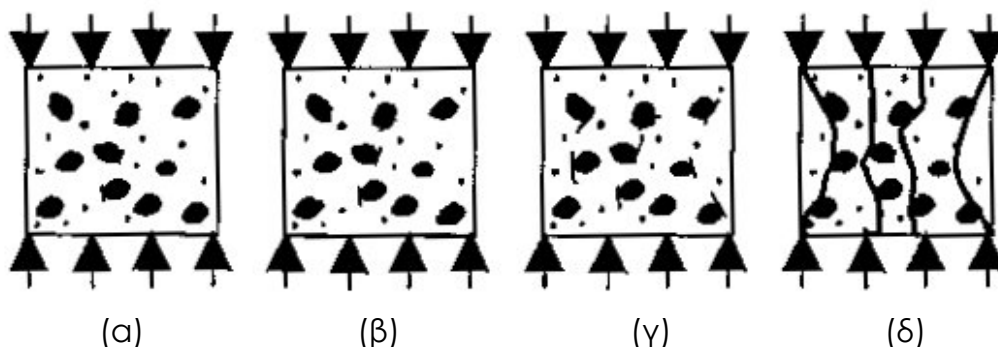
Η δομή της μεταβατικής περιοχής έχει άμεσο αντίκτυπο στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος. Η περιοχή αυτή παρέχει τις γέφυρες μέσω των οποίων οι τάσεις μεταφέρονται από τον τσιμεντοπολτό στα αδρανή. Η ανάπτυξη μικρορωγμών και κενών στην περιοχή αυτή πρακτικά μειώνει τον αριθμό των γεφυρών με αποτέλεσμα την άμεση μείωση της δυσκαμψίας του σκυροδέματος.

2.3.2.3 Μοντέλα αστοχίας

Τα παρακάτω μοντέλα αστοχίας που υπάρχουν για το σκυρόδεμα όταν υφίσταται θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις εξηγούν τον τρόπο μέσω τον οποίον η μεταβατική ζώνη επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος.

2.3.2.3.1 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Μοντέλο αστοχίας θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

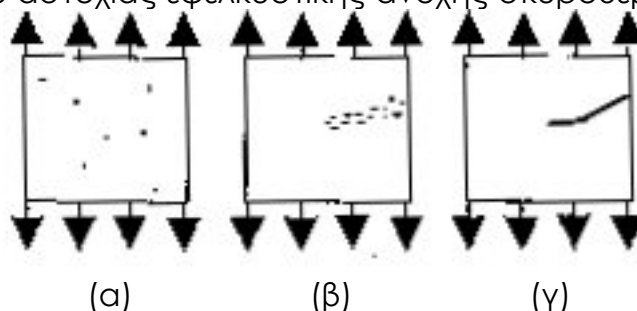


Σχ.2.3.1 Μοντέλο αστοχίας θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

- 25%-30% της τελικής αντοχής: Παρουσιάζονται τυχαίες ρωγμές κυρίως στη μεταβατική ζώνη γύρω από αδρανή μεγάλου μεγέθους.
- 50% της τελικής αντοχής: Οι ρωγμές επεκτείνονται αργά και στον τσιμεντοπολτό. Μικρορωγμές εμφανίζονται και μέσα στον τσιμεντοπολτό.
- 75% της τελικής αντοχής: Οι ρωγμές στον τσιμεντοπολτό και οι ρωγμές στη μεταβατική ζώνη ενώνονται με αποτέλεσμα να σχηματίζουν σημαντικές ρωγμές. Οι σημαντικές ρωγμές ανοίγουν με την αύξηση των τάσεων ενώ οι μικρότερες κλείνουν.
- Τελική αντοχή: Η αστοχία επέρχεται όταν οι σημαντικές ρωγμές ευθυγραμμίζονται κατά την κατακόρυφο διεύθυνση και διαχωρίζουν το δοκίμιο.

2.3.2.3.2 Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Μοντέλο αστοχίας εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

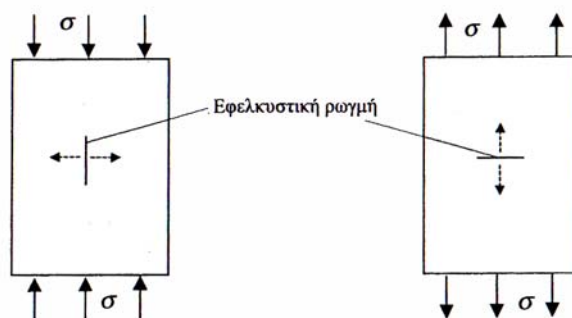


Σχ.2.3.2 Μοντέλο αστοχίας εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

- α) Τυχαία ρηγματώση κυρίως στη μεταβατική ζώνη.
- β) Συγκέντρωση τυχαίων μικρορηγματώσεων.
- γ) Εμφάνιση σημαντικής ρωγμής όπου και σχηματίζεται το επίπεδο διαχωρισμού του δοκιμίου.

2.3.2.3.3 Αστοχία του σκυροδέματος ως εφελκυστική αστοχία

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι έχουμε την αρχική εμφάνιση ρωγμών στη μεταβατική ζώνη οι οποίες επεκτείνονται περαιτέρω στον τσιμεντοπολτό. Επίσης παρατηρούμε ότι η αστοχία του σκυροδέματος γενικότερα προκύπτει λόγω την εμφάνισης ρηγματώσεων. Από τη μελέτη της αντοχής των υλικών γνωρίζουμε ότι οι ρωγμές εμφανίζονται κάθετα στις κύριες εφελκυστικές τάσεις. Επομένως η ρηγματώση του σκυροδέματος αποτελεί μια εφελκυστική αστοχία που συμβαίνει όχι μόνο εξαιτίας εφελκυστικής φόρτισης του δοκιμίου αλλά και κατά τη θλιπτική φόρτίσή του. Δηλαδή η θλιπτική αστοχία αποτελεί μια έμμεση “εφελκυστική αστοχία”.



Σχ.2.3.3 Η εφελκυστική ρωγμή

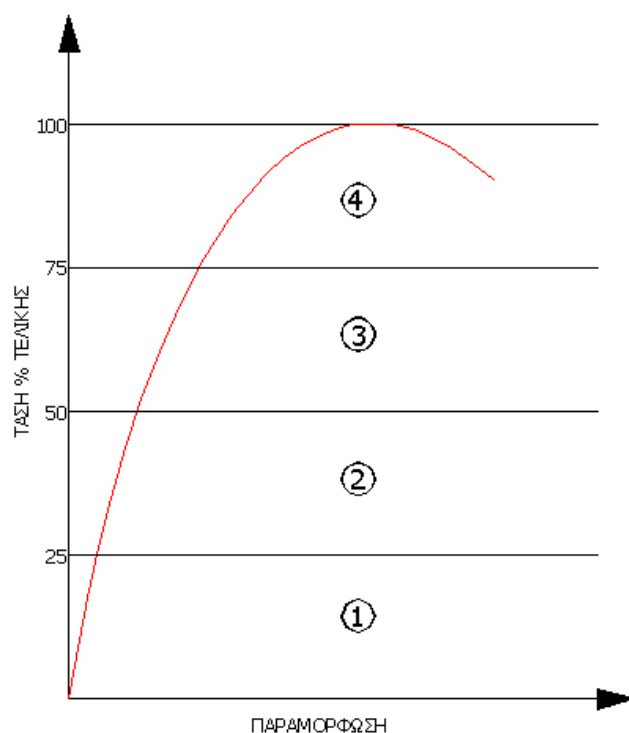
Ειδικότερα, κατά την εφελκυστική φόρτιση αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στις κύριες εφελκυστικές τάσεις. Είναι λογικό λοιπόν να αναπτυχθούν ρωγμές κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης, και αυτό συμβαίνει στην πραγματικότητα. Στην περίπτωση θλιπτικής φόρτισης του δοκιμίου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης και οι κύριες εφελκυστικές τροπές (τάσεις) εμφανίζονται κάθετα στις κύριες θλιπτικές τάσεις με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ρωγμών παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης.

Με άλλα λόγια κατά τη θλίψη το δοκίμιο δεν αστοχεί πρακτικά σε θλίψη αλλά σε εφελκυσμό εξαιτίας των εφελκυστικών τροπών που αναπτύχθηκαν ως αποτέλεσμα των θλιπτικών τάσεων. Επειδή όμως οι εφελκυστικές τάσεις (τροπές) αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της ύπαρξης των θλιπτικών τάσεων και της εγκάρσιας παραμόρφωσης του υλικού, δεν είναι ανάλογες προς αυτές. Για αυτό το λόγο η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή. Προκειμένου οι εφελκυστικές τάσεις, που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της θλιπτικής φόρτισης να φτάσουν σε μία σημαντική τιμή, όπου θα αναπτυχθούν ρωγμές, οι θλιπτικές τάσεις πρέπει να αυξηθούν

σημαντικά. Έτσι απαιτούνται μεγαλύτερες θλιπτικές δυνάμεις για να αστοχήσει το σκυρόδεμα από ότι εφελκυστικές. Επομένως η θλιπτική αντοχή του είναι αρκετά μεγαλύτερη από την εφελκυστική.

2.3.3 Πειραματική διερεύνηση αντοχής

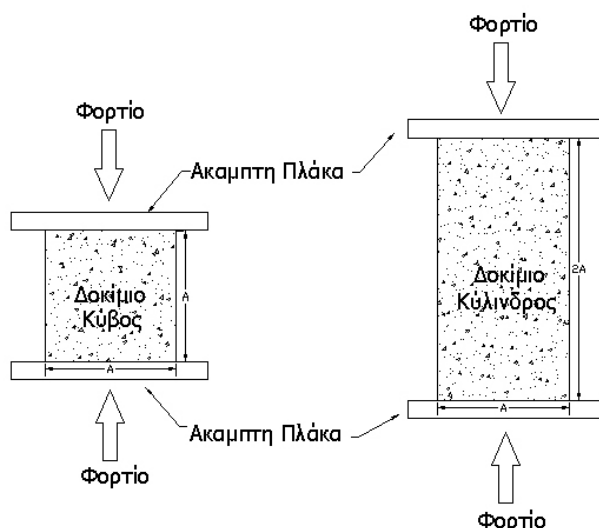
Το σκυρόδεμα αστοχεί σε θλίψη λόγω της ανάπτυξης και επέκτασης των ρωγμών μέσα στην μάζα του τσιμεντοπολτού. Ρωγμές προϋπάρχουν με τη μορφή μικρορηγματώσεων στη μεταβατική ζώνη. Με την αύξηση του φορτίου οι ρωγμές αυτές επεκτείνονται και ενώνονται με άλλες με τελικό αποτέλεσμα την αστοχία του δοκιμίου. Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης του σκυροδέματος δεν αποτελεί μια σχέση απόλυτα γραμμική-ελαστική. Η σχέση αυτή χαρακτηρίζεται και από φαινόμενα ελαστοπλαστικού χαρακτήρα που οφείλονται στην πολυπλοκότητα της δομής του σκυροδέματος για λόγους οι οποίοι έχουν προαναφερθεί. Ειδικότερα για τάση περίπου μέχρι το 30% της τελικής αντοχής του υλικού η σχέση τάσης-παραμόρφωσης εμφανίζει γραμμική-ελαστική συμπεριφορά. Για μεγαλύτερες τάσεις το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης απομακρύνεται όλο και περισσότερο από την γραμμικότητα. Για τάσεις περίπου από 50% μέχρι και 75% της τελικής αντοχής, στη φάση που ονομάζεται κρίσιμη κατά Chen οι ρωγμές στο σκυρόδεμα επεκτείνονται με πολύ γρήγορους ρυθμούς και το σύστημα τείνει να γίνει ασταθές. Για τάσεις πάνω από την κρίσιμη, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης εμφανίζει βαθμιαία καμπυλότητα και μετά την μέγιστη τάση, f_{cu} , η καμπύλη παρουσιάζει φθίνοντα κλάδο μέχρι και την τελική σύνθλιψη του υλικού.



Σχ.2.3.4 Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

2.3.3.1 Πειραματική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής

Για την πειραματική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, ένα δοκίμιο σταθερής διατομής υποβάλλεται σε ομοιόμορφα κατανεμημένη και συνεχώς αυξανόμενη τάση. Ο χρόνος της δοκιμής συνήθως διαρκεί δυο με τρία λεπτά μέχρι τη θραύση. Το αποτέλεσμα της δοκιμής εκφράζεται σε μονάδες φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας ($[F]/[L]^2$).



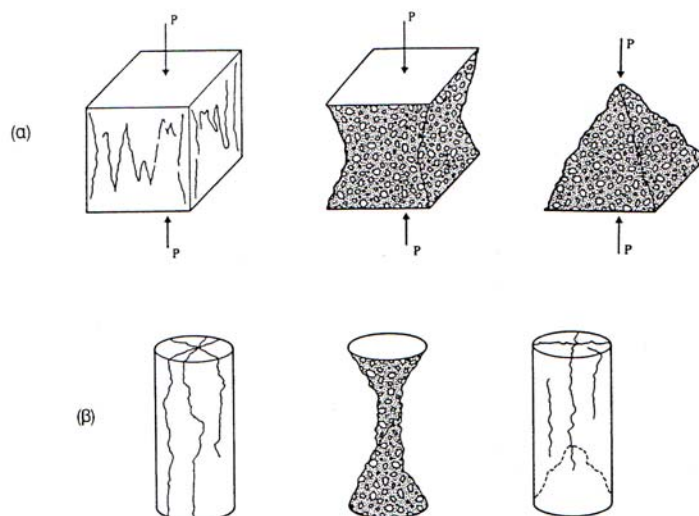
Σχ.2.3.5 Διάγραμμα δοκιμών και φόρτισης δοκιμών θλιπτικής αντοχής



Σχ.2.3.6 Κυβικό και κυλινδρικό δοκίμιο

Γενικότερα μεταξύ των χωρών υπάρχουν διαφορές στον τρόπο με τον οποίον ελέγχεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Έχουν γίνει στο παρελθόν προσπάθειες να οριστούν διεθνή πρότυπα για τη διαδικασία του ελέγχου της θλιπτικής αντοχής. Συνεχίζουν όμως και υπάρχουν διαφορές. Βασικό παράδειγμα των διαφορών αυτών είναι η γεωμετρία των δοκιμών που χρησιμοποιούνται. Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται κυβικά δοκίμια ενώ στην Αμερική κυλινδρικά δοκίμια.

Το σχήμα των δοκιμών έχει επιπτώσεις στη μορφή της αστοχίας. Οι επιπτώσεις αυτές φαίνονται στο σχήμα 2.3.7.



Σχ.2.3.7 Επιπτώσεις της γεωμετρίας των δοκιμών στην αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη

Για τη θραύση των δοκιμών χρησιμοποιούνται υδραυλικές πρέσες. Οι πρέσες αυτές έχουν την ικανότητα να επιβάλουν στο δοκίμιο είτε συνεχώς αυξανόμενο φορτίο ή συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση με ρυθμό που μπορεί να ορίσει ο εκάστοτε μελετητής. Με τη χρήση ειδικών διατάξεων μέτρησης των παραμορφώσεων και των δυνάμεων είναι δυνατόν να παραχθούν διαγράμματα φορτίου παραμόρφωσης. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος.

2.3.3.2 Πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής αντοχής

Η αστοχία δοκιμών σκυροδέματος σε εφελκυσμό οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στην επέκταση ρωγμών κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης. Τέτοιες ρωγμές μειώνουν την διατομή του δοκιμίου και επιφέρουν συγκεντρώσεις τάσεων. Τελικά η αστοχία επιφέρεται λόγω της απότομης επέκτασης ολίγων σχετικά ρωγμών με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να καταγραφεί πειραματικά το τμήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης μετά τη μέγιστη τάση.

Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι της τάξης του 0.07 - 0.13. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θεωρείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος πρακτικά ίση με το μηδέν. Έτσι κατά το σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα απαιτείται η χρήση σιδηρού οπλισμού για την παραλαβή των εφελκυστικών ορθών τάσεων που προκύπτουν σε κάθε φορτιζόμενο στοιχείο της κατασκευής. Η εκτίμηση όμως της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι απαραίτητη για τον καθορισμό σημαντικών παραγόντων που

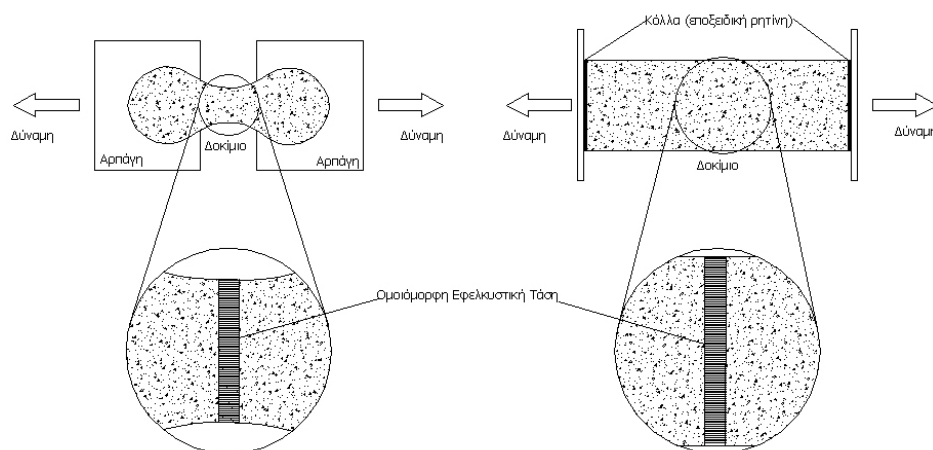
συνυπολογίζονται κατά το σχεδιασμό των κατασκευών. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι ο υπολογισμός των φορτίων που προκαλούν ρηγμάτωση.

Η πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής αντοχής πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

1. Άμεσος εφελκυσμός.
2. Έμμεσος εφελκυσμός από διάρρηξη.
3. Έμμεσος εφελκυσμός από κάμψη πρίσματος.

2.3.3.2.1 Άμεσος εφελκυσμός

Με τη μέθοδο του άμεσου εφελκυσμού προκύπτουν ποικίλα προβλήματα. Η υλοποίηση της μεθόδου είναι αρκετά περίπλοκη. Απαιτείται η χρήση ειδικών δοκιμίων και επιβολή φορτίου με αρπάγες εφελκυσμού ή η χρήση πρισματικών δοκιμίων με επικόλλησή τους σε μεταλλικές πλάκες εφαρμογής του φορτίου. Η μέθοδος αυτή είναι συχνά μη ακριβής λόγω της ανάπτυξης δευτερευουσών τάσεων. Οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται διακρίνονται στο σχήμα 2.3.8.



Σχ.2.3.8 Πειραματικές διατάξεις άμεσου εφελκυσμού

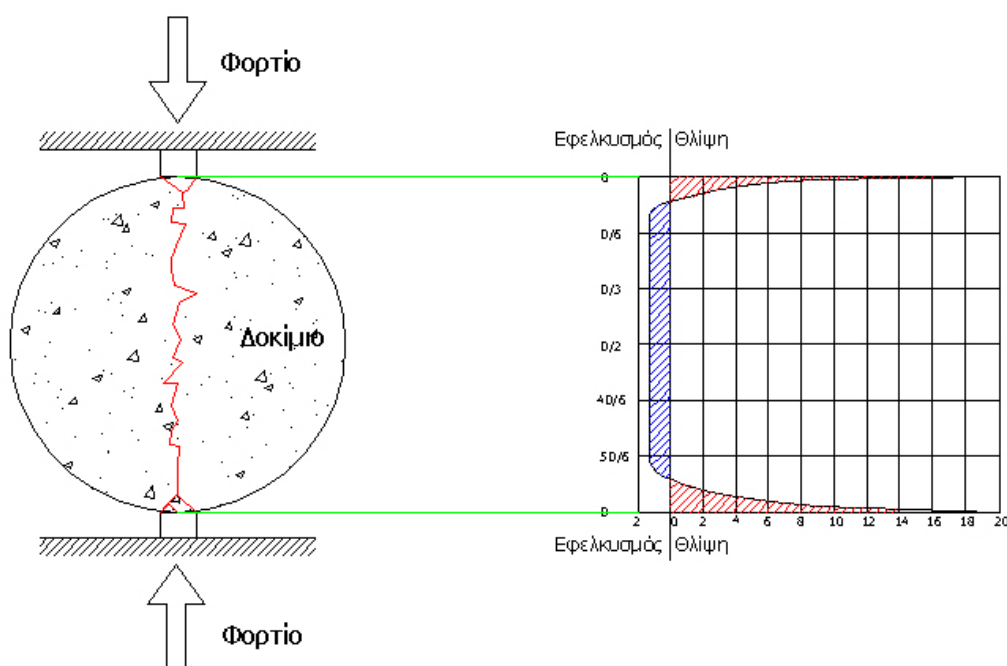
Η αστοχία επέρχεται με τη ρηγμάτωση του δοκιμίου και την αποκοπή των δύο ακραίων τμημάτων του δοκιμίου. Η επιφάνεια αστοχίας είναι συνήθως κάθετη στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου εφελκυστικού φορτίου. Παρατηρώντας κανείς την επιφάνεια αστοχίας κυρίως για σκυροδέματα κανονικής θλιπτικής αντοχής (16-30 MPa) θα δει ότι το ποσοστό των αποκομμένων αδρανών είναι σχετικά μικρό. Αυτό υποδηλώνει ότι στον συγκεκριμένο έλεγχο της εφελκυστικής αντοχής ο δεσμός μεταξύ των αδρανών και του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού είναι το ασθενέστερο σημείο.

2.3.3.2.2 Έμμεσος εφελκυσμός από διάρρηξη

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως Brazilian Split Test, (Βραζιλιάνικη δοκιμή). Αναπτύχθηκε από τους Carneiro και Barcellos

(1949,1953) το 1943 στη Βραζιλία και ανεξάρτητα στην Ιαπωνία από τον Akazawa (1953) . Είναι η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή κυλινδρικό δοκίμιο μήκους $L=300$ mm και διαμέτρου $D=150$ mm υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανεμημένες δυνάμεις P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειας. Αποτέλεσμα της φόρτισης αυτής είναι η ανάπτυξη ομοιόμορφα κατανεμημένων εφελκυστικών τάσεων κάθετα στο επίπεδο που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες, μεγέθους:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.3.1)$$



Σχ.2.3.9. Διάταξη ρωγμών και κατανομή τάσεων στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη

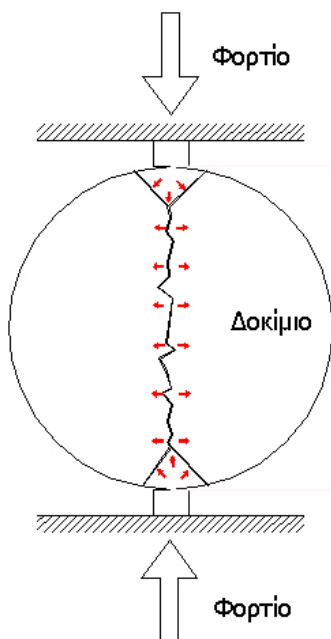
Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του δοκιμίου κάθετα στο επίπεδο που ενώνει τους δύο μεσημβρινούς του κυλίνδρου παρουσιάζουν μια διακύμανση στα άκρα. Εκεί οι τάσεις μετατρέπονται από εφελκυστικές στο μέσον του δοκιμίου σε θλιπτικές προς τα άκρα, παραμένοντας ομοιόμορφα εφελκυστικές στο μεγαλύτερο μήκος του εσωτερικού της διαμέτρου. Η κατανομή των τάσεων φαίνεται καθαρά στα σχήμα 2.3.9 και 2.3.10.

Έτσι, αναπτύσσεται μια ομοιόμορφη κατανομή εφελκυστικών τάσεων στο 80% της κατακόρυφης επιφάνειας μεταξύ των δύο γενέτειρων του δοκιμίου. Η ρηγμάτωση που αναπτύσσεται διατρέχει όλο το μήκος του δοκιμίου και εντέλει το διαχωρίζει στη μέση.

Σε αντίθεση με την αστοχία του σκυροδέματος σε συνθήκες άμεσου εφελκυσμού, εδώ στην επιφάνεια αστοχίας παρατηρεί κανείς ότι το ποσοστό των αποκομμένων αδρανών είναι σχετικά μεγάλο. Αυτό ίσως οφείλεται στη διάταξη των εφελκυστικών τάσεων σε όλο τον όγκο

του κυλίνδρου. Οι εφελκυστικές τάσεις έχουν μέγιστη τιμή μέσα στα περιορισμένα όρια μίας λεπτής λωρίδας κατά μήκος του κεντρικού κατακόρυφου επιπέδου των γενέτειρων φόρτισης που διατρέχει όλο το δοκίμιο. Γι' αυτό το λόγο όμως επηρεάζεται η έμμεση εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου από τα αδρανή. Ειδικότερα η αύξηση του μεγέθους των αδρανών προκαλεί και αύξηση της εφελκυστικής αντοχής.

Ο μηχανισμός της αστοχίας των δοκιμίων σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη θεωρείται ότι είναι όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.10.



Σχ.2.3.10 Μηχανισμός αστοχίας δοκιμίου σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη.

Η σχέση (2.3.1), βασίστηκε πάνω στις παραδοχές ότι: ο νόμος του Hooke ισχύει μέχρι την αστοχία του δοκιμίου και επίσης ότι ισχύει δισδιάστατη εντατική κατάσταση. Στην περίπτωση του σκυροδέματος όμως καμία από τις παραπάνω δύο παραδοχές ισχύει πραγματικά. Από υπολογισμούς που έγιναν, με παραδοχές από την θεωρία της πλαστικότητας, προέκυψαν τιμές λίγο μικρότερες από αυτές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο. Ενώ οι τιμές που προέκυψαν από υπολογισμούς βασισμένους σε άλλες σχετικές παραδοχές ήταν υψηλότερες (Seefried et al., 1967; Franca και Pincus, 1969). Οι Chen και Chang το 1978 έδειξαν ότι η αριθμητική μέση τιμή που προκύπτει από τις θεωρήσεις του άνω και κάτω ορίου είναι ακριβώς ίδια με αυτήν που προκύπτει από την παραπάνω σχέση. Επίσης είναι γενικά παραδεκτό ότι η αγνόηση των πλαστικών παραμορφώσεων δεν αποτελεί εντέλει αδυναμία για το θεωρητικό μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εφελκυστικές τάσεις δεν έχουν περιοχές συγκέντρωσης αλλά μοιράζονται ομοιόμορφα σε όλο το κεντρικό επίπεδο των γενέτειρων φόρτισης (Peltier, 1954). Αυτό έχει αποδειχθεί όχι μόνο μέσω της θεωρίας της ελαστικότητας αλλά και με βάση τη φωτοελαστικότητα (RILEM, 1975b; N.B. Mitchell, 1961 ; Rudnick et al., 1963).

Επίσης έγιναν δύο ακόμα παραδοχές για να προκύψει η προηγούμενη σχέση υπολογισμού της εφελκυστικής αντοχής. Στο θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού των τάσεων αγνοήθηκε η συμμετοχή των θλιπτικών δυνάμεων στην αστοχία του δοκιμίου. Καθώς και ότι το δοκίμιο θεωρείται ως ένα σώμα από ομογενές υλικό και όχι ως σώμα ανισοτροπικό.

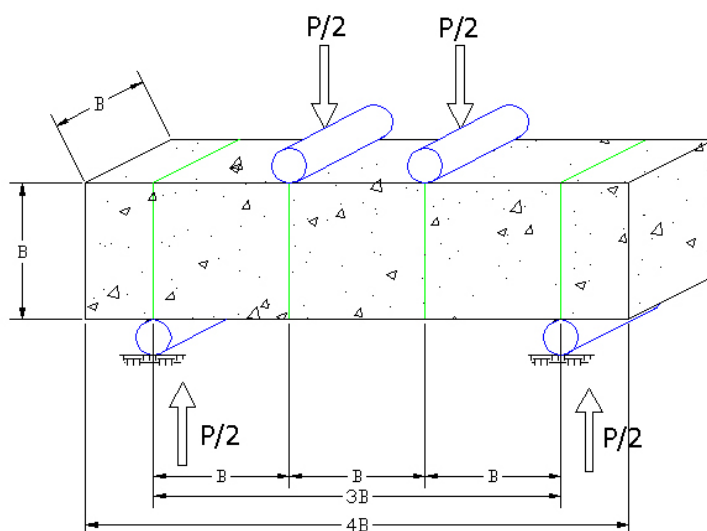
Η εφαρμογή της μεθόδου της διάρρηξης σε υλικά σχετικά χαμηλής αντοχής όπως είναι σκυρόδεμα ηλικίας μερικών ωρών δεν ενδείκνυται. Τα δοκίμια κατά την διάρκεια του ελέγχου υποβάλλονται σε σημαντικές πιέσεις που μεταβάλλουν την εντατική κατάσταση διανομής των τάσεων στο εσωτερικό (Frydman, 1964; Bynum et al., 1971)

Από συγκρίσεις που έγιναν μεταξύ των μεθόδων άμεσου και έμμεσου εφελκυσμού προκύπτει ότι η εφελκυστική αντοχή σε δοκίμια άμεσου εφελκυσμού είναι κατά δέκα 10% - 15% μειωμένη από αυτή σε δοκίμια έμμεσου εφελκυσμού.

2.3.3.2.3 Έμμεσος εφελκυσμός από κάμψη πρίσματος

Μια άλλη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού είναι η δοκιμή πρισμάτων 150 x 150 x 600 mm που υποβάλλονται σε κάμψη σαν αμφιέριστες δοκοί ανοίγματος 450 mm με φορτίο στη μέση ή δύο φορτία στα τρίτα του ανοίγματος. Η δοκιμή αυτή περιγράφεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ-739. Η μέγιστη εφελκυστική τάση, σ_{\max} , κατά τη θραύση του δοκιμίου δίνεται από τη σχέση 2.3.2.

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{Bh^2} \quad (2.3.2)$$



Σχ.2.3.11 Έμμεσος εφελκυσμός από κάμψη πρίσματος

Στη σχέση υπολογισμού της μέγιστης καμπτικής τάσης, M_{\max} , είναι η ροπή θραύσης του δοκιμίου ενώ b και h είναι το πλάτος και το ύψος

του δοκιμίου, αντίστοιχα. Η σχέση (2.3.2) προϋποθέτει γραμμική κατανομή των τάσεων καθ ύψος της διατομής, κάτι το οποίο όμως δεν είναι απόλυτα σωστό. Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος είναι μη γραμμική. Επίσης οι διαστάσεις του πρίσματος δεν δικαιολογούν την εφαρμογή της θεωρίας κάμψεως. Η παραπάνω σχέση στηρίζεται σε αυτή την θεωρία.

Επιπλέον, η μέγιστη τάση κάμψης δεν εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή του πρίσματος παρά μόνο στην ακραία ίνα της διατομής. Έτσι η πιθανότητα να βρεθεί αρχική ατέλεια από την οποία θα ξεκινήσουν οι ρωγμές είναι μικρότερη στην περίπτωση του άμεσου εφελκυσμού, όπου οι εφελκυστικές τάσεις είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την διατομή. Για το λόγο αυτό η εφελκυστική αντοχή που προκύπτει από την παραπάνω μέθοδο είναι 50% μεγαλύτερη αυτής με δοκίμια άμεσου εφελκυσμού.

2.3.3.3 Σχέση εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής

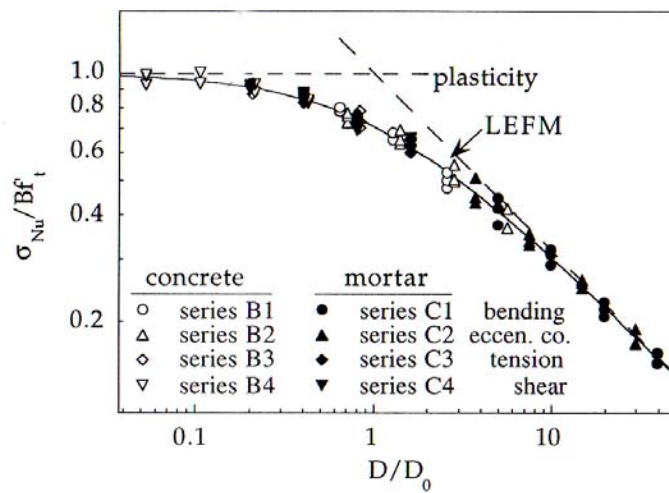
Αυτό το οποίο θα αναμενόταν είναι ότι με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής να αυξάνεται και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Δηλαδή η σχέση εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή να παραμένει περίπου σταθερή. Η ακριβής σχέση όμως μεταξύ των δύο αντοχών εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως:

- η μέθοδος πειραματικού προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής.
- ο χρόνος συντήρησης του σκυροδέματος.
- η ποιότητα του σκυροδέματος.
- τα χαρακτηριστικά των αδρανών.
- τυχόν πρόσθετα στο σκυρόδεμα.

Γενικά ο λόγος εφελκυστικής/θλιπτικής αντοχής μειώνεται με το χρόνο συντήρησης και την αύξηση της θλιπτικής αντοχής, ενώ αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους του μέγιστου κόκκου αδρανών και χρήση πρόσθετων ή προσμίξεων.

Κεφάλαιο 3

Φαινόμενα Κλίμακας



Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική αναφορά στις πειραματικές και θεωρητικές μελέτες στα φαινόμενα κλίμακας στο παρελθόν και στη σύγχρονη εποχή.

3. Φαινόμενα Κλίμακας

3.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα οικοδομικά υλικά. Η παγκόσμια ετήσια κατανάλωσή του ξεπερνάει σήμερα τους 5.5 δισεκατομμύρια τόνους. Η χρήση του είναι ευρεία και το φάσμα των εφαρμογών του ευρύ. Τα έργα που κατασκευάζονται από το υλικό αυτό έχουν μεγάλο εύρος διαστάσεων. Η χρήση του σκυροδέματος συναντάται από την κατασκευή οικοδομών μέχρι και την οικοδόμηση φραγμάτων.

Ως οικοδομικό υλικό ευρείας χρήσης υπάρχει εδώ και εκατό χρόνια. Κατά τον 20^ο αιώνα έχουν αναπτυχθεί δύο θεωρητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του. Η αρχική θεωρία ήταν η θεωρία της ελαστικότητας που αναπτύχθηκε κατά την περίοδο 1900 με 1930. Η δεύτερη θεωρητική επανάσταση συντελέστηκε την περίοδο 1940 με 1970 και ήταν η οριακή θεωρία της πλαστικότητας.

Όλα δείχνουν ότι η εφαρμογή της θεωρίας της θραυστομηχανικής στη συμπεριφορά του σκυροδέματος αποτελεί την τρίτη θεωρητική επανάσταση του αιώνα. Αναπτύχθηκε κυρίως μετά το 1980 και σήμερα εμφανίζεται ως μία ώριμη θεωρία ικανή να εξηγήσει αρκετά ικανοποιητικά ειδικές πτυχές της συμπεριφοράς σκυροδέματος.

Επίσης έχει αναπτυχθεί μια σειρά από νόμους και κανονισμούς για τον έλεγχο της αντοχής του σκυροδέματος και για τη σωστή οικοδομική χρήση του. Οι κανόνες αυτοί όμως έχουν στηριχτεί πάνω στην ισχύουσα θεωρητική προσέγγιση του υλικού.

Ο προσδιορισμός της αντοχής του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται σε μία κατασκευή καθορίζεται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος της εκάστοτε χώρας. Σε όλες τις χώρες όμως ορίζεται ότι η δειγματοληψία του σκυροδέματος πρέπει να γίνεται με ορισμένο τρόπο και τα δοκίμια που λαμβάνονται πρέπει να είναι συγκεκριμένων διαστάσεων. Οι διαστάσεις όμως των δοκιμών είναι ανεξάρτητες των διαστάσεων των στοιχείων του φορέα που κατασκευάζεται και των διαστάσεων των αδρανών του σκυροδέματος.

Η αντοχή των υπό εξέταση δοκιμών υποθετικά αντικατοπτρίζει την αντοχή τους σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή. Στην πραγματικότητα όμως έχει παρατηρηθεί ότι για το ίδιο σκυρόδεμα η αντοχή μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μέγεθος του δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο κλίμακας.

3.2 Φαινόμενα Κλίμακας

Τα φαινόμενα κλίμακας που παρουσιάζει το σκυρόδεμα στην εφελκυστική και θλιπτική συμπεριφορά του αποτελούν αντικείμενο ενδιαφέροντος της σύγχρονης επιστημονικής κοινότητας. Η μελέτη του φαινομένου έχει εμβαθύνει αρκετά στη συμπεριφορά άοπλου και

οπλισμένου σκυροδέματος και ήδη τα αποτελέσματα αυτά έχουν περιγραφεί σε Κανονισμό Σκυροδέματος σε άλλες χώρες.

Τα φαινόμενα κλίμακας αναφέρονται στη διαφορά που παρατηρείται στην αντοχή του σκυροδέματος μεταξύ δοκιμών διαφορετικού μεγέθους. Η διαφορά αυτή εκφράζεται από αύξηση της αντοχής με τη μείωση του μεγέθους του δοκιμίου. Παρατηρείται τόσο στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος όσο και στη θλιπτική. Το φαινόμενο όμως δεν περιορίζεται μόνο στο σκυρόδεμα. Εμφανίζεται σε μεγάλο εύρος ημιψαθυρών υλικών.

Ως φαινόμενο έχει παρατηρηθεί από πλήθος ερευνητών. Ο Sabnis το 1980 επανεξέτασε ένα μεγάλο αριθμό θεωρητικών μελετών της βιβλιογραφίας όπως Weibull (1939), Tucker(1941) και άλλους. Συγκεντρώθηκαν επίσης από τους Sabnis και Aroni (1971) και αργότερα από τους Sabnis και Mirza (1979) διάφορες πειραματικές μελέτες γύρω από το θέμα των φαινομένων κλίμακας στο σκυρόδεμα. Πρόσφατα ο Bazant και Kazemi (1988) και ο Bazant (1992) έχουν παρουσιάσει την ενεργειακή αντιμετώπιση του φαινομένου μέσω της θραυστομηχανικής.

Τα φαινόμενα κλίμακας αποτελούν σήμερα βασικό πεδίο έρευνας και μελέτης (π.χ. Aifantis, 1996, 1999). Η ένταξη τους στους κανονισμούς και στο σχεδιασμό επιβάλλεται κυρίως για ένα λόγο. Τα μοντέλα υπολογισμού και διαστασιολόγησης σήμερα δεν συμπεριλαμβάνουν τα φαινόμενα κλίμακας. Με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα για τη λανθασμένη διαστασιολόγηση ενός στοιχείου σκυροδέματος που μπορεί να υποβάλλεται σε φαινόμενα κλίμακας.

3.3 Παράγοντες επιρροής των Φαινομένων Κλίμακας

Ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων επηρεάζουν τις ιδιότητες της αντοχής των υλικών. Οι ιδιότητες αυτές των υλικών περιλαμβάνουν θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, αντοχή σε συνάφεια και κόπωση, καθώς και ερπυσμό. Μαζί με αυτές τις ιδιότητες, η φύση του υλικού καθώς και οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι πολύ σημαντικές. Τα υλικά μπορεί να είναι φυσικά όπως το ξύλο και τα πετρώματα μέχρι και τεχνητά όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και τα πλαστικά.

Σε μερικά από τα παραπάνω υλικά η αντοχή τους επηρεάζεται περισσότερο από διαφορές στην κλίμακα των στοιχείων παρά από άλλες ιδιότητες αντοχής. Ακόμα και τότε εξαρτάται από την βαρύτητα της ιδιότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί οι διαφορές στην αντοχή λόγω φαινομένων κλίμακας να μην επηρεάζει ιδιαίτερα το θεωρητικό μοντέλο. Τέτοια περίπτωση είναι και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος. Η επίδραση της τυχόν διαφοράς της θλιπτικής αντοχής του υλικού δεν επηρεάζει την αντοχή του συστήματος όσο την επηρεάζει η αντοχή του οπλισμού όταν η δοκός είναι υπερ-οπλισμένη ή υπο-οπλισμένη. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που τα φαινόμενα κλίμακας επηρεάζουν ιδιαίτερα τον ασφαλή σχεδιασμό. Τέτοια περίπτωση είναι ο σχεδιασμός προεντεταμένης δοκού. Στην προένταση ο παράγοντας της θλιπτικής

αντοχής του υλικού έχει μεγάλη βαρύτητα στην ασφάλεια και στον ορθολογικό σχεδιασμό. Οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα της δοκού είναι αρκετά υψηλές και η ύπαρξη τυχών φαινομένων κλίμακας μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην αστοχία.

Οι περισσότερες θεωρητικές μελέτες αντιμετωπίζουν τις μεταβολές των ιδιοτήτων αντοχής των υλικών σε στατιστική βάση. Η όλη θεώρηση του φαινομένου κλίμακας περιορίζεται στη λογική ότι όσο πιο μεγάλο είναι το στοιχείο τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να υπάρχουν μικρο-ατέλειες. Οι ατέλειες αυτές στη δομή του ετερογενούς υλικού επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του.

Γενικότερα όμως, η αντοχή δοκιμίων ίδιας γεωμετρίας ενός υλικού αλλά διαφορετικού μεγέθους επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Διαφορετικός ρυθμός πήξης και σκλήρυνσης
- Διαφορά στην ποιότητα (Πυκνότητα του υλικού)
- Διαφορετική ποιότητα του υλικού των καλουπιών λόγω συγκέντρωσης νερού στις πάνω στρώσεις ή λόγω διήθησης νερού μέσα από την επιφάνειά τους.
- Διαφορετικός ρυθμός ξήρανσης των δοκιμίων.
- Διαφορετικές συνθήκες φόρτισης των δοκιμίων λόγω διαφορών στην ποιότητα του “καπελώματος” των δοκιμίων.
- Στατιστικές διακυμάνσεις αντοχής λόγω διαφορετικού όγκου του υλικού.
- Ρυθμός φόρτισης
- Μέθοδος φόρτισης
- Κατανομή των τάσεων κυρίως σε δοκιμές κάμψης.

3.4 Θεωρητικές Μελέτες Φαινομένων Κλίμακας

Γενικότερα, αυτό το οποίο παρατηρείται είναι ότι τα δοκίμια μικρότερων μεγεθών παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή. Επίσης η διασπορά των αποτελεσμάτων σε μικρότερα μεγέθη είναι μεγαλύτερη. Τα φαινόμενα κλίμακας και η διασπορά που παρατηρήθηκε οδήγησαν στις θεωρίες που αναπτύχθηκαν για την εξήγησή τους. Πρακτικά αναπτύχθηκαν στατιστικές εξισώσεις με σκοπό την πρόβλεψη της τυχαίας εμφανιζόμενης ετερογένειας του υλικού και διασποράς. Οι εξισώσεις αυτές προσεγγίζουν την πραγματική συμπεριφορά του υλικού και τον πραγματικό μηχανισμό αστοχίας μέσω ειδικών στατιστικών μεταβλητών. (Θεωρητικές μελέτες του φαινομένου κλίμακας έγιναν από τους Weibull (1939), Tucker(1941), Wright και Garwood (1952), Nielsen (1954), και Glucklich και Cohen (1968)).

Η αντιμετώπιση του φαινομένου ακολούθησε δύο τρόπους προσέγγισης της στατιστικής πραγματικότητας των φαινομένων κλίμακας. Η πρώτη ήταν η θεωρία της συνολικής αστοχίας παράλληλων ινών που αναπτύχθηκε από τον Freudenthal (1968) και η δεύτερη ήταν η θεωρία της ελάχιστης αστοχίας ινών σε σειρά (η θεωρία του πιο αδύναμου κρίκου).

Η τελευταία θεωρία ανέφερε ότι η τελική αντοχή εξαρτάται από την αντοχή του ασθενέστερου στοιχείου. Η ύπαρξη σημαντικού ελαττώματος σε κάποιο από τα στοιχεία που αποτελούσαν ένα υλικό ήταν αρκετό να οδηγήσει σε αστοχία όλου του υλικού. Ενώ με βάση τη πρώτη θεωρία η αντοχή δεν εξαρτάται από την αντοχή του ασθενέστερου στοιχείου αλλά από την αντοχή όλων των στοιχείων στην άμεση περιοχή. Το στοιχείο θεωρείται ότι αποτελείται από παράλληλες ίνες οι οποίες ήταν ενωμένες μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο που η συνολική αντοχή του υλικού εξαρτάται από την αντοχή όλων των ινών.

Οι παραπάνω θεωρίες αποτελούν εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις του προβλήματος. Στην πραγματικότητα οι ιδιότητες αντοχής των υλικών δεν ακολουθούν απόλυτα καμία από της παραπάνω θεωρίες. Αντίθετα, η πραγματικότητα βρίσκεται κάπου ανάμεσα.

Η επιρροή εφαρμογών θραυστομηχανικής στο σκυρόδεμα (Bazant 1989) έδειξε ότι οι παραπάνω θεωρίες αγνοούν το φαινόμενο κλίμακας που προκύπτει εξαιτίας της ανακατανομής των τάσεων που συμβαίνει λίγο πριν την αστοχία. Μάλιστα υποστηρίχτηκε η άποψη ότι χρησιμοποιώντας τη θεωρία της θραυστομηχανικής και την απελευθέρωση ενέργειας που συμβαίνει κατά την ανάπτυξη μίας ρωγμής προκύπτουν φαινόμενα κλίμακας.

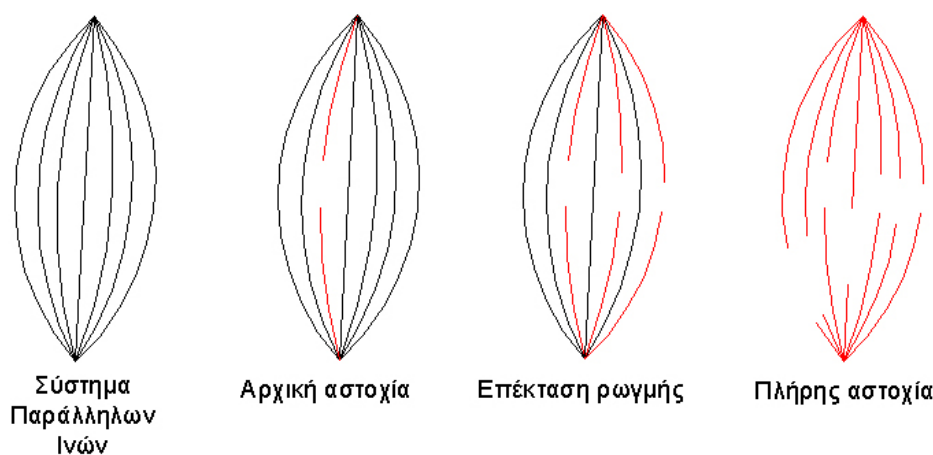
3.4.1 Θεωρία συνολικής αντοχής παράλληλων ινών (Bundled Strength)

Η θεωρία αυτή ορίζει ότι το σώμα του δοκιμίου αποτελείται από συστήματα παράλληλων ινών ή στοιχείων. Η αστάθεια του ενός στοιχείου δεν θα οδηγήσει στην συνολική αστοχία όλου του σώματος για το λόγο ότι δεν θα υπάρξει επέκταση της ρωγμής από το τοπικό επίπεδο στο καθολικό. Η αντοχή των διπλανών ινών –στοιχείων θα εμποδίσει την ανάπτυξή της. Αυτό δηλώνει ότι το ασθενές στοιχείο περιτριγυρίζεται από στοιχεία με μεγαλύτερη αντοχή τα οποία μπορούν να παραλάβουν τις τάσεις μετά την ανακατανομή τους που ακολουθεί την αρχική αστοχία.

Το στατιστικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Fruendenthal (1968) αντικαθιστά το σώμα του δοκιμίου με ένα σύστημα παράλληλων ινών διατομής A και μήκους L . Όλες οι ίνες προέρχονται από την ίδια πηγή ώστε η στατιστική κατανομή της τοπικής αντοχής των ινών είναι ομογενής και σταθερή. Η ύπαρξη μιας τυχαίας προβληματικής ίνας είναι πιθανή και αποτελεί τον αδύναμο κρίκο του συστήματος. Η αστοχία της ίνας αυτής μπορεί να προκαλέσει μια αλυσιδωτή διαδικασία αστοχίας. Η τάση που έφερε η αδύναμη ίνα ανακατανέμεται στις υπόλοιπες ίνες μετά την αρχική αστοχία της. Αυτό όμως δεν έχει ως αποτέλεσμα την ρηγμάτωση. Μόνο όταν η τάση που αναπτύσσεται στις εναπομείναντες ίνες είναι αρκετή για την σταδιακή αστοχία όλων των ινών του δέματος θα έχουμε την επέκταση της ρωγμής.

Η προσέγγιση αυτή οδήγησε στη θεωρητική επεξήγηση της διαδικασίας θραύσης των ψαθυρών υλικών, όπου αναμένεται διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων με την αύξηση του μεγέθους του

δοκιμίου. Η θεωρία ανταποκρίνεται ιδιαίτερα καλά σε υλικά όπου υπάρχουν πραγματικά ισοδύναμα συστήματα παράλληλων ινών με την μορφή μεγάλων μοριακών αλυσίδων και σε υλικά όπου η θραύση ενεργοποιείται για μεγάλες τάσεις (ψαθυρά υλικά). Η αντιμετώπιση όμως του προβλήματος είναι πιο αποτελεσματική μέσα από τη θεωρία της μικρότερης αντοχής ινών σε σειρά (του πιο αδύναμου κρίκου).



Σχ.3.1 Σχεδιάγραμμα μηχανισμού της θεωρίας της συνολικής αστοχίας παράλληλων ινών

3.4.2 Θεωρία της ελάχιστης αντοχής ινών σε σειρά (Weakest Link Strength)

Η θεώρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ευρύτερα για την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού προσομοιωμάτων αστοχίας που διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς τη μορφή της εμπλοκής του φαινομένου του πιο αδύναμου κρίκου. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε από τον Weibull (1939) ο οποίος βασίστηκε σε παλαιότερες προσπάθειες ανάπτυξης θεωρίας περί της αντοχής της μάλλινης κλωστής.

Ο Weibull προέβαλε την αδυναμία της αντιμετώπισης της αντοχής των υλικών ως μία οντότητα. Αντίθετα με τις τάσεις της εποχής του εισήγαγε μια νέα οπτική γωνία επί του θέματος της αντοχής. Η αντοχή στα μάτια της μηχανικής δεν αποτελούσε πια μία οντότητα αλλά ένα σύνολο παραμέτρων. Η ύλη δεν αποτελείται από ένα ομογενές υλικό του οποίου η αντοχή ήταν μια ξεκάθαρη έννοια. Το υλικό θεωρητικά αποτελείται από ένα σύνολο πρωτευόντων στοιχείων και η αντοχή του εκφράζεται από την αντοχή των στοιχείων αυτών. Με τη διαφορά εδώ ότι η συνολική αντοχή εξαρτάται από την αντοχή του ασθενέστερου στοιχείου. Του πιο αδύναμου “κρίκου” δηλαδή.

Η όλη φιλοσοφία ακολουθεί την λογική ότι η ύλη παρομοιάζεται με μια αλυσίδα. Η αλυσίδα αυτή αποτελείται από πολλούς κρίκους. Ο κάθε κρίκος συμβολίζει μία παράμετρο της αντοχής. Η ύλη ως προς την αντοχή της θα συμπεριφέρεται όπως ακριβώς μία αλυσίδα. Θα είναι τόσο ισχυρή όσο ο πιο αδύναμος κρίκος της.

Αν η πιθανότητα αστοχίας ενός πρωτεύοντος στοιχείου για τάση μεταξύ 0 και σ είναι ίση με S_0 τότε η πιθανότητα επιβίωσης του στοιχείου αυτού είναι $1-S_0$. Επίσης εάν S εκφράζει την συνολική πιθανότητα αστοχίας ενός δοκιμίου συνολικού όγκου V τότε η πιθανότητα επιβίωσης του συνολικού δοκιμίου, θεωρώντας στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των στοιχείων, δίνεται από τη σχέση 3.1

$$(1-S) = (1-S_0)^V \quad (3.1)$$

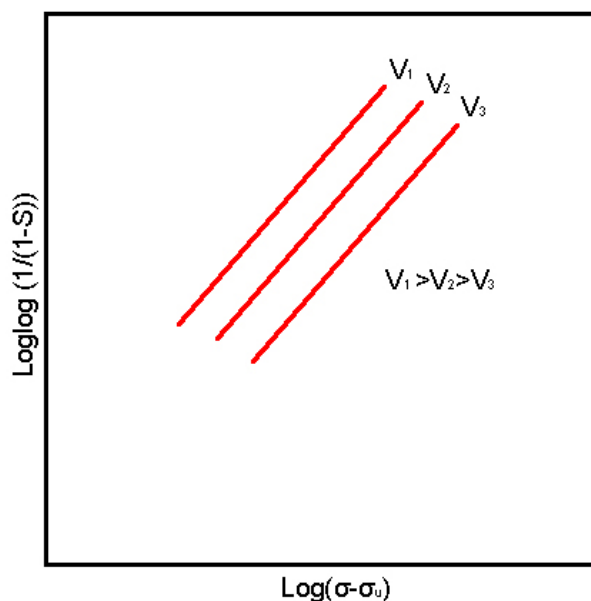
Η μαθηματική έκφραση 3.1 θα μπορούσε να διατυπωθεί σαν μία από τις δύο ακόλουθες ισοδύναμες μαθηματικές σχέσεις:

$$\frac{1}{1-S} = \exp \left[V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.2a)$$

ή

$$\log \log \frac{1}{1-S} = m \log(\sigma - \sigma_u) - m \log \sigma_0 + \log V \quad (3.2b)$$

Οι εξισώσεις 3.2a και 3.2b εκφράζονται γραφικά στο Σχ. 3.2.



Σχ.3.2 Γράφημα του Weibull για τη θεωρία του πιο αδύναμου "κρίκου"

Όπως φαίνεται και στο γράφημα του σχήματος 3.2 οι μαθηματικές εξισώσεις 3.2 δηλώνουν ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δοκιμίου και συνεπώς και ο όγκος του V , η μέση αντοχή μειώνεται, κάτι το οποίο επιβεβαιώνουν και τα πειραματικά δεδομένα. Ο Weibull εφάρμοσε την θεωρία του σε πλήθος περιπτώσεων όπως είναι η εφελκυστική αντοχή ράβδων γυαλιού, η καμπτική αντοχή πορσελάνης και η εφελκυστική

αντοχή τσιμέντου, ξύλου, γύψου, σιδήρου και άλλων υλικών. Σε όλες τις περιπτώσεις επιβεβαίωσε την γραμμική σχέση μεταξύ των ποσοτήτων $\log \log (1/(1-S))$ και $\log(\sigma-\sigma_u)$ με βάση πειραματικά αποτελέσματα. Έκτοτε η θεωρία του αδύναμου κρίκου του Weibull χρησιμοποιήθηκε από πλήθος ερευνητών.

3.5 Θραυστομηχανική

Η θραυστομηχανική αποτελεί καινούργια θεωρία που αναπτύχθηκε κυρίως μετά την δεκαετία του 1970. Το ερέθισμα για την ανάπτυξη της θραυστομηχανικής δόθηκε από την δημοσίευση του Inglis (1913). Στην δημοσίευσή του ο Inglis απέδειξε την ελαστική λύση του προσδιορισμού της τιμής των τάσεων στα άκρα μιας ελλειψοειδούς ρωγμής μέσα σε ένα άπειρο στερεό. Παρατήρησε ότι η τιμή των τάσεων στα άκρα της ρωγμής έτεινε προς το άπειρο καθώς το σχήμα της ελλειψοειδούς ρωγμής προσέγγιζε την γραμμική ρωγμή. Ο Griffith (1921, 1924) κατέληξε στην άποψη ότι στην παρουσία μίας ρωγμής η τιμή των τάσεων στην ρωγμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δικαιολόγηση της αστοχίας. Ο λόγος οφείλεται στην ίδια την ελαστική λύση. Η τιμή της τάσεως στα άκρα της ρωγμής μέσα σε έναν ελαστικό ημίχωρο θα ήταν πάντα άπειρο ανεξάρτητα από την τιμή των εφαρμοζόμενων δυνάμεων. Επομένως οι αιτίες επέκτασης της ρωγμής και επομένως η αστοχία έπρεπε να εξηγηθούν με άλλον τρόπο προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν.

Αυτό οδήγησε τον Griffith να προτείνει μια ενεργειακή λύση στο αδιέξοδο. Η λύση του θεωρήθηκε ως μία έκφραση της ενεργειακής ισορροπίας και αποτελεί την βάση της γραμμικής ελαστικής θραυστομηχανικής καθώς και των πιο γενικών μορφών της θραυστομηχανικής όπου η γραμμικότητα δεν είναι υποχρεωτική. Σύμφωνα με τον Griffith μία ρωγμή στο υλικό θα επεκτείνονταν όταν η ενέργεια που προσφέρεται για την επέκταση της ρωγμής κατά μία μοναδιαία επιφάνεια ήταν τόσο όσο χρειαζόνταν για την επέκτασή της. Με άλλα λόγια οι ρωγμές αναπτύσσονται στο υλικό σαν επιφάνειες διακοπής της συνοχής του. Κάθε μοναδιαία επιφάνεια προκειμένου να διακοπεί χρειάζεται ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Η ρωγμή θα επεκταθεί σε τόση επιφάνεια όση είναι η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην ενέργεια που προσφέρεται για την επέκτασή της.

Στην αρχή ο Griffith θεώρησε ότι η ενέργεια αυτή ήταν ίση με $2\gamma_s$, όπου το γ_s είναι η συγκεκριμένη επιφανειακή ενέργεια του ελαστικού στερεού. Αντιπροσώπευε την ενέργεια που έπρεπε να δαπανηθεί προκειμένου να αποκοπούν οι δεσμοί σύνδεσης του υλικού σε μικροσκοπικό επίπεδο και επομένως να δημιουργηθεί μια μονάδα νέας επιφάνειας.

Σύντομα όμως συνειδητοποιήθηκε ότι η ενέργεια που χρειαζόνταν για την επέκταση μιας ρωγμής ήταν πολύ μεγαλύτερη. Μια ρωγμή αναπτύσσεται στα περισσότερα υλικά κατά μία επιφάνεια που δεν είναι λεία αλλά τραχεία. Επίσης με την ανάπτυξη των ρωγμών

δημιουργούνται μικρορωγμές και αναπτύσσεται τριβή σε μία σημαντική περιοχή γύρω από την άκρη της ρωγμής. Για τον λόγο αυτό η συγκεκριμένη ποσότητα $2\gamma_s$ αντικαταστάθηκε από μία πιο γενική έκφραση R , ρωγματική αντίσταση, (Crack growth resistance). Το R στην πιο απλή της μορφή αποτελεί μια σταθερά. Ο προσδιορισμός όμως αυτής της σταθεράς αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα από τα πιο μεγάλα προβλήματα της πειραματικής θραυστομηχανικής. Ένα άλλο βασικό πρόβλημα της γραμμικής ελαστικής θραυστομηχανικής είναι ο προσδιορισμός για μία συγκεκριμένη κατασκευή της ποσότητας ενέργειας που είναι διαθέσιμη για την επέκταση της ρωγμής. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ρυθμός ενεργειακής απελευθέρωσης και συμβολίζεται με G . Ο ρυθμός αυτός είναι ανάλογος με το μήκος της ρωγμής όχι του χρόνου.

Η αρχική εργασία του Griffith θεωρήθηκε ακαδημαϊκού χαρακτήρα αρχικώς γιατί αναφερόταν σε υλικά πολύ ψαθυρά όπως είναι το γυαλί. Η ανάπτυξη όμως της ελαστικής θραυστομηχανικής συντελέστηκε την περίοδο 1940 με 1970. Το ερέθισμα για την ανάπτυξη της υπήρξε μια σειρά από περίεργες αστοχίες μεταλλικών κατασκευών όπως ήταν η ρηγμάτωση που αναπτύσσονταν στα κοίτη των πλοίων τύπου Liberty. Κατά την παραπάνω περίοδο συντελέστηκε αρκετή θεωρητική, πειραματική και αριθμητική δουλειά ώστε να φτάσει η ελαστική γραμμική θραυστομηχανική στα σημερινά επίπεδα.

Το μεγαλύτερο μέρος της θεωρητικής δουλειάς επικεντρώθηκε στον σκοπό να γενικοποιηθεί η θεωρία του Griffith, που είχε αναπτυχθεί για κάτι συγκεκριμένο, ώστε να ισχύει για κάθε υλικό σε οποιαδήποτε κατάσταση και γεωμετρία. Επίσης συνδέθηκε το G με τα πεδία τάσης παραμόρφωσης. Το τελευταίο βήμα της ενεργειακής προσέγγισης έγινε με την ανακάλυψη του J ολοκλήρωσης από τον Rice (1968a,b). Ο παράγων ολοκλήρωσης J έκλεισε σε γενικές γραμμές τον κύκλο σχετίζοντας το G με διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης κοντά στο άκρο της ρωγμής για οποιαδήποτε ελαστικό υλικό είτε είναι γραμμικό ή όχι. Σήμερα το J ολοκλήρωσης αποτελεί θεμελιώδη λίθο της ελαστοπλαστικής θραυστομηχανικής. Η πειραματική δουλειά την παραπάνω περίοδο είχε ως σκοπό τον υπολογισμό του R .

3.6 Κλασσικές Μη-Γραμμικές Θεωρίες Θραυστομηχανικής

Με την ανάπτυξη της θραυστομηχανικής προέκυψαν γραμμικές θεωρίες για την ερμηνεία της μετάδοσης των ρωγμών σε ένα σώμα. Στην συνέχεια όμως έγινε αντιληπτό ότι οι γραμμικές θεωρίες οδηγούσαν σε καλά αποτελέσματα μόνο για πολύ ψαθυρά υλικά. Αυτό σήμαινε ότι η κατασκευή έπρεπε να εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά μέχρι την έναρξη της ρωγμής. Κάτι όμως που δεν ισχύει για το πλήθος των πρακτικών εφαρμογών. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται ευρύτερα σαν δομικό υλικό δεν ακολουθεί την λογική αυτή. Εμφανίζει μεγάλες

πλαστικές περιοχές κοντά στην ακμή μιας ρωγμής πριν την επέκτασή της.

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών αναπτύχθηκαν μη γραμμικές θεωρίες. Οι μη γραμμικές θεωρίες ακολούθησαν διαφορετικό τρόπο ερμηνείας της επέκτασης των ρωγμών. Κυρίως αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Το πρώτο μοντέλο ονομάστηκε ισοδύναμο ελαστικό μοντέλο θραύσεως και το δεύτερο μοντέλο ρωγμών συνοχής.

Στο ισοδύναμο ελαστικό προσομοίωμα θραύσεως η μη-γραμμική περιοχή μιας ρωγμής προσομοιώνεται με την εξής λογική. Η ανάπτυξη μιας ρωγμής πάνω σε ένα σώμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας του. Αυτό ισοδυναμεί με μία άλλη κατάσταση όπου το μήκος της ρωγμής στο σώμα είναι μεγαλύτερο ενώ όλες οι υπόλοιπες περιοχές του παραμένουν ελαστικές. Αυτή η ρωγμή με το μεγαλύτερο μήκος ονομάζεται ισοδύναμη ρωγμή. Η αντιμετώπιση του μοντέλου είναι ίδια με τη γραμμική προσέγγιση. Ορισμένοι κανόνες πρέπει να προστεθούν μόνο προκειμένου να εκφραστεί το πώς επεκτείνεται η ρωγμή στο σώμα. Μέσα στα πλαίσια αυτής της θεώρησης ο Irwin (1958) και αργότερα οι Krafft, Sullivan και Boyle (1961) πρότειναν την έννοια της καμπύλης αντίστασης σε ρηγμάτωση. Σύμφωνα με αυτήν την άποψη η αντίσταση επέκτασης της ρωγμής R μεταβάλλεται ανάλογα με την επέκταση της ρωγμής με τρόπο που καθορίζεται εμπειρικά. Η απλή αυτή μεθοδολογία αποτελεί σημαντικό εργαλείο με την προϋπόθεση ότι η μορφή της καμπύλης R υπολογιστεί με ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του στοιχείου.

Για το σκυρόδεμα τα προσομοιώματα ισοδύναμης ρωγμής που προτάθηκαν από τους Jenq και Shah (1985a,b) καθώς και από τον Bazant και συνεργάτες του είναι από τα πιο εκτενή. Η άποψη ότι τα φαινόμενα κλίμακας αποτελούν συνέπεια της θραυστομηχανικής εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Μια απλή εξίσωση για την επίδραση του μεγέθους της κατασκευής στην αντοχή του σκυροδέματος έχει διατυπωθεί από τον Bazant (1984a). Η εξίσωση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την επεξήγηση μη γραμμικών-ιδιοτήτων της θραυστομηχανικής. Οι ιδιότητες αυτές είναι η ενέργεια θραύσης, το μήκος της περιοχής θραύσης και η καμπύλη θραύσης.

Ο Bazant δεν ήταν ο μόνος που διατύπωσε έκφραση για το φαινόμενο κλίμακας. Ο Carpinteri επίσης διατύπωσε μια άλλη έκφραση η οποία σύμφωνα με αυτόν προσεγγίζει καλύτερα το φαινόμενο. Λεπτομέρειες για τις παραπάνω εξισώσεις θα δοθούν στα κεφάλαια 3.8 και 3.19.

Το μοντέλο ρωγμών συνοχής αποτελεί το δεύτερο μοντέλο ερμηνείας της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού στις περιοχές επέκτασης των ρωγμών. Το συγκεκριμένο μοντέλο εκφράζει την άποψη ότι κατά την επέκταση της ρωγμής το υλικό συνεχίζει και μεταφέρει τάσεις διαμέσου των ρωγμών. Δηλαδή δυνάμεις συνεχίζονται να μεταφέρονται από την μία επιφάνεια θραύσης της ρωγμής στην άλλη. Το πρώτο μοντέλο ρωγμών συνοχής προτάθηκε από τον Barenblatt

(1959,1962) σε μία προσπάθεια να συνδεθεί η μακροσκοπική αντίσταση ρηγμάτωσης με τις μικροσκοπικές δυνάμεις συνοχής των ατόμων του υλικού. Ταυτόχρονα παρακάμπτεται η απροσδιοριστία της απειροστής τάσης στη κορυφή της ρωγμής που δίνει η ελαστική λύση. Στο μοντέλο του Barenblatt οι ατομικές δυνάμεις συνοχής προσομοιώνονται με κατανεμημένες τάσεις συνοχής στις επιφάνειες θραύσης της ρωγμής. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από το βαθμό διαχωρισμού των επιφανειών της ρωγμής. Η κατανομή των κατανεμημένων δυνάμεων συνοχής υπολογίζεται έτσι ώστε η απροσδιοριστία της ελαστικής λύσης να μην υφίσταται. Η περιοχή όμως των κατανεμημένων δυνάμεων συνοχής περιορίζονται μόνο στην άμεση περιοχή της ακμής της ρωγμής. Σύμφωνα με τον Barenblatt, το προφίλ της ρωγμής στην ζώνη αυτή είναι ανεξάρτητη από τη γεωμετρία και το μέγεθος του στοιχείου.

Εκτός από τα δύο βασικά παραπάνω μοντέλα της θραυστομηχανικής υπήρξαν και άλλα μοντέλα με διάφορα ονόματα, Dugdale – Barenblatt, μοντέλο της “ισοδύναμης” ρωγμής, μοντέλο της γεφυρωμένης ρωγμής κτλ. Από τα παραπάνω μοντέλα όμως το μοντέλο της “ισοδύναμης” ρωγμής αξίζει αναφορά. Ενώ όλα τα άλλα μοντέλα προκειμένου να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτική εφαρμογή προϋποθέτουν την ύπαρξη μιας αρχικής ρωγμής, το μοντέλο της “ισοδύναμης” ρωγμής δεν έχει αυτόν τον περιορισμό. Η μη ύπαρξη αρχικής ρωγμής έχει ως αποτέλεσμα την μη εφαρμογή των κλασσικών μη-γραμμικών μοντέλων. Ούτε η γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική ούτε η μη-γραμμική ελαστική θραυστομηχανική μπορούν να ερμηνεύσουν την επέκταση μιας ρωγμής που δεν προϋπήρχε. Το μοντέλο της “ισοδύναμης” ρωγμής του Hillerborg αποτελεί μεν ένα κλασσικό μοντέλο ρωγμής συνοχής αλλά είναι κάτι παραπάνω από αυτό. Συμπεριλαμβάνει κανόνες έναρξης της ρηγμάτωσης για οποιαδήποτε κατάσταση ακόμα και εάν δεν υπάρχει αρχική ρωγή. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα χωρίς αρχική ρηγματωμένη κατάσταση. Δηλαδή να εξηγήσει την έναρξη και την επέκταση των ρωγμών στην κατασκευή καθώς αυτή περνάει από τα διάφορα στάδια αστοχίας.

3.7 Σημερινές τάσεις στην θραύση ημιψαθυρών υλικών

Σήμερα εισερχόμαστε σε μία εποχή όπου η ενσωμάτωση της θραυστομηχανικής στους κανονισμούς είναι επιτακτική. Αυτό θα οδηγήσει στην επίτευξη πιο ομοιόμορφων συντελεστών ασφαλείας ειδικά στην περίπτωση κατασκευών διαφορετικών μεγεθών. Θα βελτιωθεί επίσης η οικονομία και η αξιοπιστία των κατασκευών. Θα ενισχυθεί η χρήση νέων σκυροδεμάτων και νέων μεθόδων σχεδιασμού. Η θραυστομηχανική θα είναι ιδιαίτερα σημαντική για κατασκευές από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ινοπλισμένο σκυρόδεμα καθώς και για κατασκευές ιδιαίτερα μεγάλου μεγέθους. Η εφαρμογή της θραυστομηχανικής είναι ιδιαίτερα σημαντική για κατασκευές ιδιαίτερης

σημασίας όπως είναι φράγματα και πυρηνικοί σταθμοί όπου η πιθανή αστοχία θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες.

Η θραυστομηχανική θα μπορούσε να ενσωματωθεί εύκολα στον κανονισμό σκυροδέματος μέσω των φαινομένων κλίμακας.

3.8 Αντιμετώπιση των φαινομένων κλίμακας μέσω θραυστομηχανικής

Ο Bazant τη δεκαετία του 1980 έδειξε ότι το φαινόμενο κλίμακας μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα μέσω της θραυστομηχανικής. Οι προηγούμενες θεωρητικές μελέτες του φαινομένου ήταν ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση του. Η πραγματικότητα βρισκόταν κάπου ανάμεσα στις δύο κύριες θεωρητικές αντιμετωπίσεις του φαινομένου της εποχής εκείνης. Έκτοτε πλήθος από πειράματα επιβεβαίωσαν την σχέση του φαινομένου με την θραυστομηχανική και την ενεργειακή θεώρησή του.

Το φαινόμενο κλίμακας στο σκυρόδεμα στις δύο διαστάσεις εκφράζεται από τον Bazant σε σχέση με την ονομαστική τιμή της τάσης στην αστοχία:

$$\sigma_N = c_n \frac{P_u}{bd}, \quad (3.3)$$

όπου

P_u = μέγιστο φορτίο

b = Πάχος δοκιμίου ή κατασκευής

d = Χαρακτηριστική διάσταση (μέγεθος: π.χ. διάμετρος)

c_n = Συντελεστής που εισάγεται ανάλογα

Έχει αποδειχθεί ότι τα φαινόμενα κλίμακας μπορούν να περιγραφούν από τον παρακάτω νόμο (Size effect law, Bazant 1984):

$$\sigma_N = \frac{B f'}{\sqrt{1 + \beta}} \quad , \quad \beta = \frac{d}{d_0}, \quad (3.4)$$

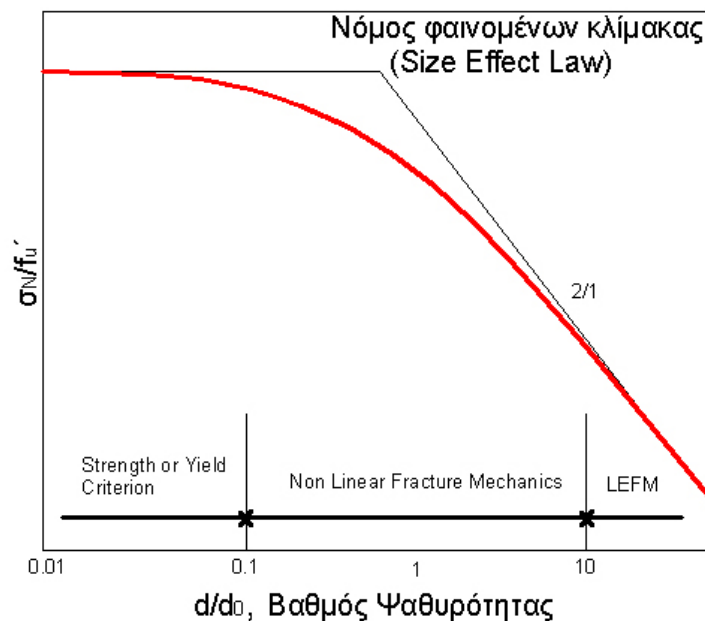
όπου

f' = μέτρο της θλιπτικής/εφελκυστικής αντοχής του υλικού

B και d_0 είναι εμπειρικοί συντελεστές που αντιπροσωπεύουν τη γεωμετρία και το μέγεθος του δοκιμίου.

β = συντελεστής ψαθυρότητας

Η παραπάνω εξίσωση θεωρεί ότι το πάχος του στοιχείου, b , παραμένει σταθερό για διαφορετικές χαρακτηριστικές διαστάσεις d . Η γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης σε διλογαριθμική κλίμακα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.



Σχ.3.3 Γράφημα του νόμου φαινομένων κλίμακας του Bazant

Όταν το δοκίμιο είναι μικρό η πλαστιμότητα είναι επίσης μικρή ($\beta < 0.1$). Για τις μικρές αυτές τιμές του β δεν υπάρχουν φαινόμενα κλίμακας και επομένως καταλήγει ο νόμος σε οριζόντια γραμμή. Για ενδιάμεσες τιμές του β , όπου $0.1 < \beta < 10$, υπάρχει ομαλή μεταβολή της καμπύλης από την οριζόντια σε κλίση ίση με $-1/2$. Σε αυτήν την περιοχή ισχύει η μη-γραμμική θραυστομηχανική. Για μεγέθη του $\beta > 10$ μέχρι $\beta \rightarrow \infty$ υπάρχουν έντονα τα φαινόμενα κλίμακας. Σε αυτό το εύρος τιμών ισχύει η γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική και η εφαπτομένη στην καμπύλη πλησιάζει την κλίση $-1/2$ (Shah et al., 1995).

Ο Bazant και Cao (1987) έχουν δείξει ότι αυτή η έκφραση των φαινομένων κλίμακας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό άλλων φυσικών μεγεθών εκτός της αντοχής, f' . Θα μπορούσε η έννοια της f' να αντικατασταθεί από εκφράσεις της τέμνουσας και της κάμψης. Επίσης ο νόμος των φαινομένων κλίμακας θα μπορούσε να αποδοθεί και γραμμικά με τη μορφή:

$$y = mx + c, \quad (3.5)$$

$$\text{όπου } x=d, \quad y = \left(f' / \sigma_N \right)^2, \quad B = c^{-1/2} \text{ και } d_0 = c/m$$

Ο Bazant και ο Kazemi (1988) έδειξαν ότι η παραπάνω εξίσωση θα μπορούσε να μεταλλαχτεί προκειμένου να συμπεριλάβει και παραμέτρους υλικών. Μια τέτοια εξίσωση θα μπορούσε να γραφεί ως:

$$\rho_N = \sqrt{\{EG_f / (c_f + D)\}}, \quad (3.6)$$

όπου G_f και c_f αποτελούν παράμετροι συντελεστές θραύσεως του υλικού, ρ_N είναι η ονομαστική αντοχή ανεξαρτήτου σχήματος και D εκπροσωπεί την ανεξαρτήτου σχήματος διάσταση της κατασκευής.

Η ρ_N ορίζεται από την έκφραση 3.7.

$$\rho_N = (P_u / bd) \sqrt{g'(a_0)}, \quad (3.7)$$

όπου $g'(a_0)$ είναι η τιμή της πρώτης παραγώγου της $g(a/b)$ για $a = a_0$

Η σχέση που ορίζει την D δίνεται παρακάτω:

$$D = \{(g(a_0)/g'(a_0))\}d \quad (3.8)$$

Σημειώνεται ότι για εύρος της κλίμακας 1/20 για το οποίο εφαρμόζεται ο νόμος των φαινομένων κλίμακας, οι τιμές του g και g' επηρεάζονται ιδιαίτερα από το σχήμα της κατασκευής. Η μεταβλητή β της σχέσης 3.4 εκφράζει ψαθυρότητα και επιτρέπει τρία εύρη του β για να διαχωρίζει τη συμπεριφορά λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα κλίμακας όπως παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3.3.

3.9 Ανακεφαλαίωση των θεωρητικών μελετών

Οι προαναφερθέντες θεωρητικές επεξηγήσεις των φαινομένων κλίμακας απλά αντιμετωπίζουν στατιστικά την ετερογένεια του υλικού. Η θεωρία του “αδύναμου κρίκου” συγκεντρώνει την προσοχή του στην πιο κρίσιμη ατέλεια του υλικού χωρίς να εξετάζει την αλληλεπίδραση του συνόλου των ατελειών που υπάρχουν σε ένα συνεχές σύστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο θεμελιώδης λίθος της θεωρίας είναι η στατιστική ανεξαρτησία των πιθανών ατελειών. Ενώ η αντιμετώπιση του προβλήματος από την άποψη της θραυστομηχανικής αποτελεί μια θεωρητικά ορθή λύση που επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά δεδομένα.

Πειραματικά δεδομένα όμως έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για την εξήγηση των φαινομένων κλίμακας. Αυτό έχει συμβεί στο παρελθόν γιατί οι υπάρχουσες θεωρίες δεν μπορούσαν να εξηγήσουν την ύπαρξη του φαινομένου. Αυτό βέβαια οδήγησε σε αναθεώρηση των θεωριών. Οι νέες θεωρίες που αναπτύχθηκαν έπρεπε να συμφωνούν και με τα πειραματικά δεδομένα.

Για τον πιο πάνω λόγο οι προηγούμενες θεωρητικές εξηγήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν με προσοχή. Αποτελούν μεν θεωρητικά ασφαλείς λύσεις αλλά πρέπει να στηρίζουν επαρκώς και τα πειραματικά δεδομένα. Στα σκυροδέματα η θεωρία του “αδύναμου κρίκου” εφαρμόζεται αρκετά καλά. Πρέπει όμως να στηριχτεί αρκετά ικανοποιητικά μέσω προσεκτικά εκτελούμενων πειραμάτων.

3.10 Πειραματικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα φαινόμενα κλίμακας

Η ετερογένεια του υλικού οδήγησε στην ανάπτυξη των προαναφερθέντων θεωριών. Επειδή όμως οι θεωρίες αυτές αναπτύχθηκαν εξαιτίας των πειραματικών δεδομένων είναι σημαντικό να διερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα τελικά δεδομένα. Οι παράγοντες αυτοί προκαλούν διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του υλικού με τη μεταβολή του μεγέθους του δοκιμίου. Κατανοώντας τους παράγοντες αυτούς μπορεί να βοηθήσει στην πιο σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

- **Τυχαία αντοχή.** Η στατιστική ετερογένεια του υλικού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τους μικρομηχανισμούς της ύλης που καθορίζει την αντοχή του εκάστοτε δοκιμίου. Η ύπαρξη ατελειών μέσα στην μάζα της ύλης αποτελεί τυχαίο φαινόμενο. Ακόμα και όταν γίνεται απόπειρα εξήγησης του φαινομένου χρησιμοποιώντας πιθανοστατιστικά μοντέλα τύπου Weibull δεν είναι επαρκείς σε περιπτώσεις που η αστοχία είναι ψαθυρή. Κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες κατασκευές από σκυρόδεμα. Επιτυχία της μεθόδου έχουμε σε περιπτώσεις όπου η τάση είναι ομοιόμορφη στην κατασκευή και σε περιπτώσεις που η αστοχία επέρχεται στην κατασκευή με την έναρξη της πρώτης ρωγμής.
- **Φαινόμενο “τοιχου” (Wall effect).** Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην διαφορετική σύσταση της επιφανειακής στρώσης σκυροδέματος από το εσωτερικό του δοκιμίου. Αυτή η στρώση έχει πάχος τη διάσταση ενός αδρανούς και έχει διαφορετική αντοχή από το εσωτερικό. Έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε μεγάλα αδρανή και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Σε μικρά μεγέθη δοκιμίων το φαινόμενο αυτό είναι πιο εμφανές γιατί το πάχος της επιφανειακής στρώσης είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του δοκιμίου. Για μεγάλες διατομές το φαινόμενο αυτό μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Πρέπει κανείς να διαχωρίσει την επίδραση αυτή για μία πλήρη κατανόηση των φαινομένων κλίμακας.
- **Μέγεθος των αδρανών.** Οι παράμετροι της θραύσεως και ο νόμος των φαινομένων κλίμακας ισχύουν μεταξύ δοκιμίων με το ίδιο σκυρόδεμα. Δηλαδή ισχύουν μεταξύ δοκιμίων με το ίδιο μέγεθος αδρανών. Εάν μεταβληθεί το μέγεθος των αδρανών μεταβάλλονται και οι παράμετροι του νόμου. Ο Bazant και ο Kim το 1984 πρότειναν μια μετατροπή της εξίσωσης του νόμου των φαινομένων κλίμακας όπου συμπεριλαμβάνουν την επιρροή του μεγέθους των αδρανών. Η νέα εξίσωση αυτή είναι η εξής:

$$\sigma_N = B f_t' / \sqrt{1 + \beta}, \text{ για} \quad (3.9)$$

$$f_t' = f_t^0 (1 + \sqrt{c_0 / d_a}) \text{ και } \beta = d / d_0$$

όπου f_t^0 είναι η αντοχή σκυροδέματος σε άμεσο εφελκυσμό, f_t' είναι η αντοχή σε άμεσο εφελκυσμό για μέγιστο μέγεθος αδρανών d_0 και c_0 είναι εμπειρική σταθερά. Η εξίσωση 3.9 είναι ανάλογη με την σχέση του Petch για την επίδραση του μεγέθους του κόκκου στην αντοχή πολυκρυσταλλικών μετάλλων. Η παραπάνω εξίσωση συμφωνεί επίσης με μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων. Για μικρότερα μεγέθη δοκιμίων εμφανίζεται μεγαλύτερη αντοχή για μικρότερα μεγέθη αδρανών d_0 . Ενώ για μεγαλύτερα μεγέθη δοκιμίων εμφανίζεται μεγαλύτερη αντοχή για επίσης μεγαλύτερα μεγέθη αδρανών d_0 . Για ενδιάμεσα μεγέθη κατασκευών το μέγεθος των αδρανών δεν έχει μεγάλη επίδραση. Αναφορές στο φαινόμενο δίνεται και από Shah et al (1995).

- **Αντοχή του μητρώου συνοχής και σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.** Η αύξηση τη αντοχής του σκυροδέματος επιτεύχθηκε μέσω της ενίσχυσης της αντοχής του μητρώου συνοχής. Ως μητρώο συνοχής ορίζεται το σύστημα αλληλεπίδρασης αδρανών και τσιμεντοπολτού. Στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής οι διαφορές στην αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού είναι πολύ μικρότερες από ότι στο κανονικό σκυρόδεμα. Ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής συμπεριφέρεται περισσότερο ως ομογενές υλικό έχοντας παράλληλα και μικρότερη ζώνη θραύσης (fracture process zone). Με βάση τη θραυστομηχανική μια κατασκευή από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής θα συμπεριφερθεί πλησιέστερα προς τη θεωρία της γραμμικής-ελαστικής θραυστομηχανικής. Με άλλα λόγια θα συμπεριφερθεί πιο ψαθυρά από ότι μια ίδια κατασκευή από σκυρόδεμα χαμηλότερης αντοχής.
- **Πυκνότητα συμπίκνωσης.** Η πυκνότητα συμπίκνωσης του σκυροδέματος αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την αντοχή του. Η παράμετρος αυτή δεν μπορεί να συσχετιστεί γραμμικά με την αντοχή. Αυτό βέβαια οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όσο μικρότερο είναι το δοκίμιο τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός συμπίκνωσης και επομένως τόσο μεγαλύτερη η αντοχή. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα με τις τυποποιημένες διαδικασίες συμπίκνωσης. Όταν τα δοκίμια υποβάλλονται σε συγκεκριμένο αριθμό κτύπων με ράβδο ή για ορισμένο χρονικό διάστημα δόνηση η συμπίκνωση των μικρότερων δοκιμίων είναι πιο αποτελεσματική. Τα μεγαλύτερα δοκίμια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσουν ατέλειες ή κενά στη μάζα τους. Επομένως τα μεγαλύτερα δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή. Εάν εξασφαλιστεί ομοιόμορφη συμπίκνωση στα δοκίμια τότε θα ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του παράγοντα αυτού στο φαινόμενο της κλίμακας. Αυτό έχει αποδειχθεί για κονιάματα γύψου από τον Loh (1969).

- **Απώλεια νερού.** Η απώλεια νερού από τα δείγματα εξαρτάται από το μέγεθος τους. Προκαλεί διαφορά στην ποιότητα του υλικού και επομένως επηρεάζει την αντοχή. Για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου αυτού πρέπει η διαδικασία σκυροδέτησης των δοκιμών να γίνεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Επίσης, το υλικό των καλουπιών επηρεάζει την τυχόν απώλεια του νερού. Προτείνονται καλούπια από Plexiglas ή polyvinylchloride (PVC).
- **Ωρίμανση και ξήρανση των δοκιμών.** Η ωρίμανση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αντοχή του σκυροδέματος. Δύο διαφορετικά δοκίμια διαφορετικών μεγεθών ωριμάζουν με διαφορετικό ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό λόγο επιφάνειας προς όγκο. Ο λόγος αυτός μεγεθύνεται όσο μειώνονται οι διαστάσεις του δοκιμίου. Επίσης μεταξύ δοκιμών διαφορετικού μεγέθους το μήκος της διαδρομής της υγρασίας στο εσωτερικό της μάζας μεταβάλλεται.

Η αντοχή του σκυροδέματος στην επιφάνεια διαφέρει από αυτή στο εσωτερικό των δοκιμών. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του δοκιμίου καθώς η ενυδάτωση του σκυροδέματος δεν είναι ομοιόμορφη μέσα στην μάζα του. Προηγούμενες μελέτες που συγκεντρώθηκαν από τον Sabnis και Aroni (1971) δείχνουν ότι όταν ελέγχονται οι συνθήκες ωρίμανσης η άνοδος της αντοχής εξαιτίας της μείωσης του μεγέθους ελαχιστοποιείται. Ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν σε πυρήνες από φράγματα σκυροδέματος μετά από περίοδο πέντε ετών έδειξαν αμελητέα διαφορά στην αντοχή μεταξύ κυλίνδρων διαμέτρου 250 και 560 mm. Αυτό μάλλον οφείλεται στις ομοιόμορφες συνθήκες ωρίμανσης του σκυροδέματος στο φράγμα και του μεγάλου χρονικού διαστήματος ενυδάτωσης.

Για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου αυτού πρέπει η διαδικασία της πήξης και σκλήρυνσης των δοκιμών να γίνεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Η τοποθέτηση των δοκιμών μέσα σε ειδική δεξαμενή νερού ελεγχόμενης θερμοκρασίας ενδείκνυται για τα δοκίμια.

Τυχόν ξήρανση των δοκιμών θα οδηγήσει σε υψηλότερες αντοχές, αλλά ακόμα και αυτό θα εξαρτηθεί από τον λόγο επιφάνειας προς όγκο. Σε δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων η διαδρομή μετανάστευσης της υγρασίας από το εσωτερικό στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη και επομένως χρειάζονται περισσότερο χρόνο ξήρανσης. Η ξήρανση βέβαια επιδρά και στο φαινόμενο κλίμακας που παρουσιάζεται σε περιπτώσεις μακροχρόνιας φόρτισης (ερπυσμός).

- **Ρυθμός Φόρτισης.** Υψηλότεροι ρυθμοί φόρτισης οδηγούν σε υψηλότερη αντοχή. Σε πρέσα όπου ο ρυθμός μετακίνησης του εμβόλου διατηρείται σταθερός τα μικρότερα δοκίμια θα υφίστανται μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης των τάσεων. Με την μείωση του μεγέθους του δοκιμίου θα πρέπει να μειώνεται

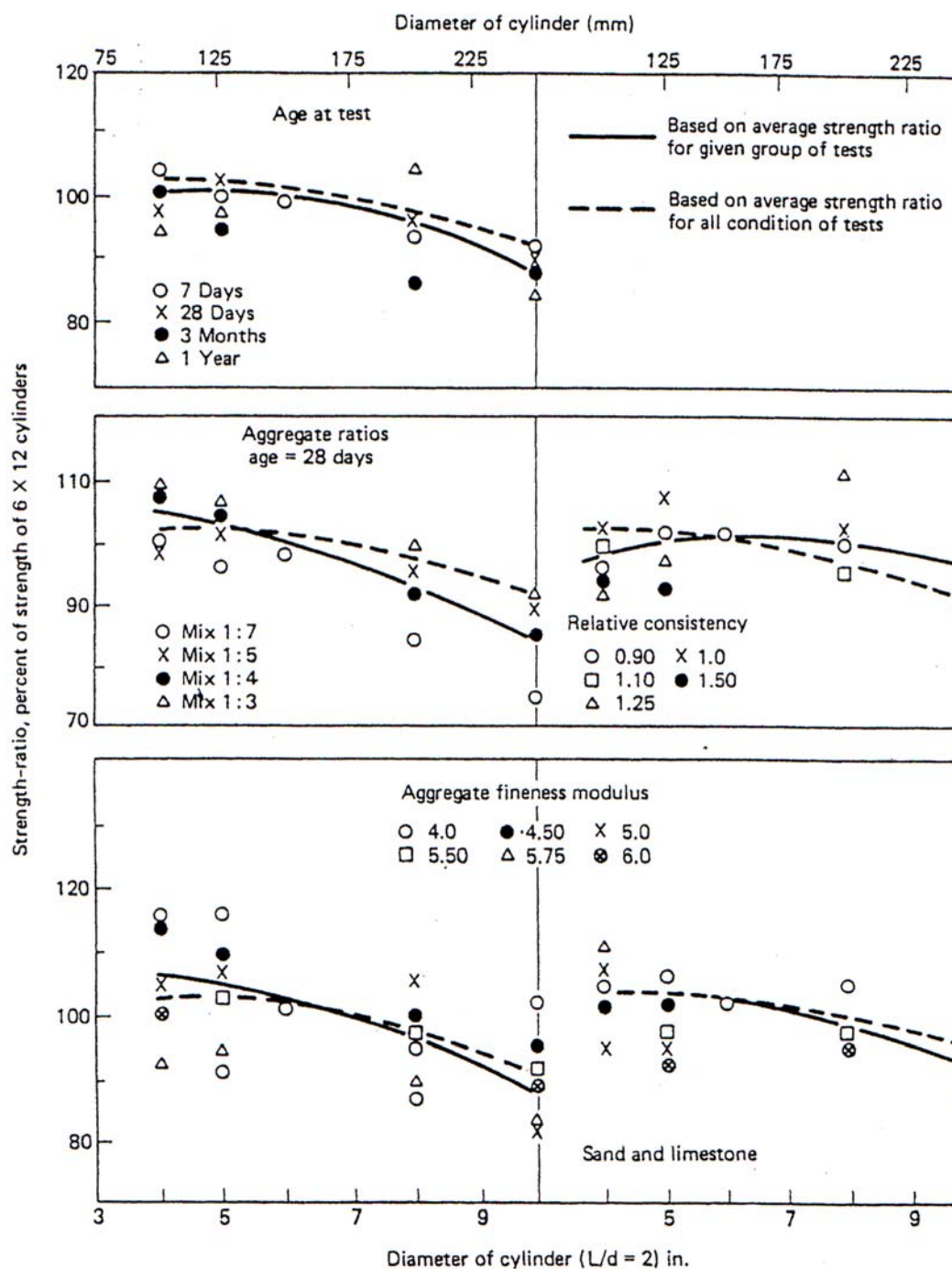
ανάλογα και ο ρυθμός μετακίνησης του εμβόλου. Σε περιπτώσεις δοκιμών μικρότερου μεγέθους ο ανάλογος ρυθμός μετακίνησης του εμβόλου δεν μπορεί να επιτευχθεί με τα περισσότερα μηχανήματα που υπάρχουν σήμερα. Η επίδραση όμως του ρυθμού φόρτισης στα φαινόμενα κλίμακας είναι αμελητέα σε κάθε άλλη περίπτωση εκτός από την δυναμική φόρτιση.

- **Είδος εντατικής κατάστασης.** Το είδος της εντατικής κατάστασης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή. Η εντατική κατάσταση μπορεί να προκαλείται από εφελκυσμό, θλίψη ή κάμψη. Στην περίπτωση της θλίψης η αντοχή είναι επιρρεπής στην πιθανή μη επιπεδότητα των ακμών καθώς και σε προβλήματα παραλληλισμού αυτών. Το τελευταίο μάλιστα πρόβλημα συμβαίνει κυρίως στις περιπτώσεις όπου οι κεφαλές των εμβόλων στην πρέσα δεν έχουν την ικανότητα στροφής. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στο “καπέλωμα” στην περίπτωση των μικρότερων κυλινδρικών δοκιμών με αποτέλεσμα να προκύψει αυξημένη η αντοχή στα μεγέθη αυτά σε σχέση με δοκίμια όπου οι ακμές δεν είναι απόλυτα επίπεδες και παράλληλες. Δοκιμές των Wright και Garwood (1952) έδειξαν ότι η καμπτική τάση αυξάνεται με την μείωση του μεγέθους του δοκιμίου.
- **Πρέσα και κεφαλές των εμβόλων.** Οι ιδιότητες της πρέσας και η δυσκαμψία των κεφαλών των εμβόλων επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της φόρτισης. Κεφαλές με μεγαλύτερη δυσκαμψία τείνουν να εφαρμόζουν πιο ομοιόμορφες συνθήκες παραμόρφωσης στα δοκίμια με αποτέλεσμα υψηλότερες αντοχές, ενώ κεφαλές με μικρότερη δυσκαμψία τείνουν να εφαρμόζουν πιο ομοιόμορφες συνθήκες τάσεως. Επίσης οι κεφαλές των εμβόλων τείνουν να περιορίσουν εγκάρσιες μετακινήσεις στα άκρα των δοκιμών με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται και εγκάρσιες τάσεις. Οι τάσεις αυτές δημιουργούν συνθήκες τριαξονικής θλίψης στα δοκίμια με αποτέλεσμα υψηλότερη αντοχή. Όσο μικρότερο είναι το δοκίμιο τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αντοχή εξαιτίας του φαινομένου αυτού.

3.11 Παλαιότερη πειραματική διερεύνηση των φαινομένων κλίμακας

Ο Sabnis και ο Mirza συγκέντρωσαν και επανεξέτασαν το 1979 το σύνολο των παλαιότερων πειραματικών διερευνήσεων στο θέμα αυτό. Ο Gonnerman (1925) πραγματοποίησε την πρώτη πειραματική διερεύνηση στα φαινόμενα κλίμακας. Η μελέτη του ήταν εκτεταμένη ελέγχοντας την επίδραση της ηλικίας, του λόγου αδρανών προς τσιμέντο, τη σχετική συνέχεια (relative consistency) και ποιότητα αδρανών (aggregate fineness) στην θλιπτική αντοχή σκυροδέματος. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια με λόγο μήκους προς διάμετρο ίσο με 2. Οι διάμετροι διέφεραν από 100 μέχρι 250 mm. Το μέγεθος των αδρανών ήταν λιγότερο από 40% της διαμέτρου του κυλίνδρου. Κάθε σημείο στα διαγράμματα του Σχ. 3.4, όπου

παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα της μελέτης του Gonnherman (1925), αποτελεί το μέσο όρο 5 μέχρι 30 δοκιμών.



Σχ.3.4 Γραφήματα των αποτελεσμάτων της πειραματικής διερεύνησης του Gonnherman J. F. (1925)

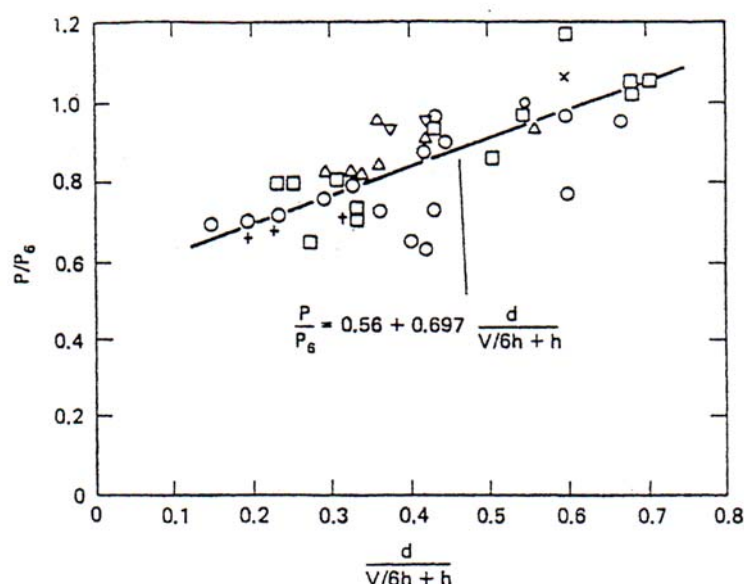
Πειράματα πραγματοποιήθηκαν αργότερα από τον Johnson (1962), για να μελετήσει την επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος του μεγέθους των αδρανών σε κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια. Το 1963 ο Harris και οι συνεργάτες του μελέτησαν την επίδραση της ηλικίας του σκυροδέματος στο φαινόμενο της κλίμακας κυλινδρικών δοκιμίων (1963, Harris et al.). Το 1966 ο Neville μελέτησε το φαινόμενο σε σχέση με τον

τύπο του σκυροδέματος, τον τρόπο ωρίμανσης και την ηλικία (1966, Neville). Επίσης: οι Sabnis και White (1967) και ο Fuss (1968) μελέτησαν το φαινόμενο για κυλινδρικούς κοίλους και συμπαγείς κάτω από την επίδραση 100% σχετικής υγρασίας.

Άλλες περιπτώσεις πειραματικής διερεύνησης είναι: Meininger (1968, cores of various diameter specimens from a slab, and a thick concrete wall and moisture cured for 3 months) και Mirza et al. (1972, size effects with a major emphasis on curing and compaction). Ο Neville το 1966 ανέπτυξε τη σχέση:

$$\frac{P}{P_6} = 0.56 + 0.697 \frac{d}{(V/6h) + h} \quad (3.10)$$

Τα μεγέθη d (διάμετρος) και h (ύψος) κυλινδρικού δοκιμίου είναι σε ίντσες και το V είναι σε κυβικές ίντσες. Ο δείκτης "6" αναφέρεται σε κυβικά δοκίμια των 6 ίντσών του ίδιου σκυροδέματος. Η παραπάνω σχέση αναπτύσσεται γραφικά παρακάτω στο σχήμα 3.5.



Σχ.3.5 Γράφημα της εξίσωσης του Neville (1966)

Ο Mirza και οι συνεργάτες του το 1972 πραγματοποίησαν δοκιμές σε περισσότερα από 500 κυλινδρικά δοκίμια με διαστάσεις που κυμαίνονταν από 25 x 50 mm μέχρι 150 x 300 mm και σε ηλικίες των 3, 7 και 14 ημερών. Οι συνθήκες ωρίμανσης όλων των δοκιμίων ήταν ενιαίες. Τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε χώρο με σταθερή υγρασία. Η διαδικασία αυτή θεωρήθηκε πιο ικανοποιητική σε σχέση με άλλες. Στην περίπτωση της ξήρανσης στον αέρα η κατανομή της υγρασίας στη μάζα του δοκιμίου δεν είναι ομοιόμορφη αφού η μετανάστευση της υγρασίας από το εσωτερικό των μικρότερων δοκιμίων στην ατμόσφαιρα είναι πιο γρήγορη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αντοχές για τα μικρότερα δοκίμια από ότι για τα μεγαλύτερα. Η διαδικασία της ελεγχόμενης υγρασίας εξομαλύνει το πρόβλημα αυτό και η άνοδος της

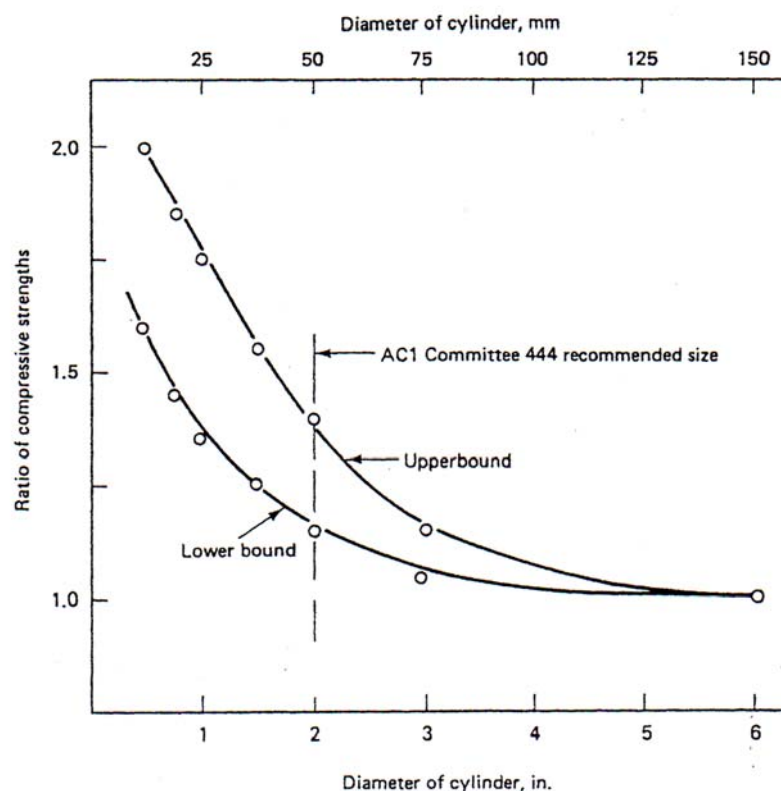
αντοχής με τη μείωση του μεγέθους του δοκιμίου ελαχιστοποιείται. Επομένως απομένει το καθαρό φαινόμενο κλίμακας χωρίς τυχόν παρεμβολές από προβλήματα κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης. Η διαδικασία της επιφανειακής επικάλυψης του δοκιμίου μέσω επάλειψής του με χημικό μονωτή δεν έχει καλή απόδοση. Η προστατευτική επικάλυψη επιτρέπει τη διαφυγή υγρασίας από το εσωτερικό. Επομένως η αντοχή των μικρότερων δοκιμίων είναι μεν υψηλότερη αλλά όχι τόσο όσο της ελεύθερης ατμοσφαιρικής ωρίμανσης και ξήρανσης. Στη μελέτη του Mirza τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν 5% - 15% αύξηση της αντοχής για δοκίμια διαμέτρου 75 - 100 mm και 40% αύξηση της αντοχής για δοκίμια διαμέτρου 50mm πάνω από την αντοχή των δοκιμίων διαμέτρου 150mm. Τα αποτελέσματα αυτά φυσικά ήταν ελεύθερα από τυχόν παρεμβολές εξαιτίας της διαδικασίας ωρίμανσης.

Το φαινόμενο της κλίμακας δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαδικασία επιλογής πρωτότυπου μεγέθους κυλινδρικού δοκιμίου. αφού όλοι οι κύλινδροι με μέγεθος μεγαλύτερο από 50 x 100mm αντιστοιχούν στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης αντοχής. Στης περιπτώσεις όμως μοντέλων μικρότερης κλίμακας η επιλογή του πρότυπου μεγέθους των δοκιμίων μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στην τιμή της θλιπτικής αντοχής. Γενικά το μέγεθος του δοκιμίου για τον έλεγχο του σκυροδέματος μίας κατασκευής πρέπει να έχει διαστάσεις που να είναι συγκρίσιμες με τις διαστάσεις της ίδιας της κατασκευής. Η Τεχνική Επιτροπή ACI 444 (1979) πρότεινε το μέγεθος 50 x 100 mm για κυλινδρικά δοκίμια που σχετίζονται με σκυροδέματα για φυσικά προσομοιώματα μικρού μεγέθους. Επίσης η Επιτροπή ACI 444 προτείνει ότι για στοιχεία μοντέλων πολύ μικρών χαρακτηριστικών διαστάσεων (λιγότερο από 12.5 mm) η αντοχή που προκύπτει από τα δοκίμια μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικής αντοχής του υλικού στο μοντέλο. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρόσθετοι έλεγχοι πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κυλινδρικά δοκίμια με λόγο μήκους προς διάμετρο 2 και διάμετρο ίση με το χαρακτηριστικό μήκος του μοντέλου.

Οι Pahl και Soosaar (1964) προτείνουν τους ακόλουθους εμπειρικούς κανόνες:

- Η αντοχή του υλικού στο μοντέλο πρέπει να είναι ίδια με αυτή των κυλίνδρων με διάμετρο ίση με τη μικρότερη διάσταση της κατασκευής στην αναμενόμενη περιοχή αστοχίας.
- Το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου αδρανών που χρησιμοποιείται στο μίγμα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ένα πέμπτο της διαμέτρου του κυλίνδρου, ούτε μεγαλύτερο του 80% της απόστασης μεταξύ των ράβδων οπλισμού στο μοντέλο.

Στο σχήμα 3.6 υπάρχουν συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα πολλών ερευνών με κυλινδρικά δοκίμια που ωρίμασαν κάτω από τυπικές συνθήκες χωρίς επιφανειακή μόνωση.



Σχ.3.6 Συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων κυλινδρικών δοκιμίων με λόγο διαστάσεων 2

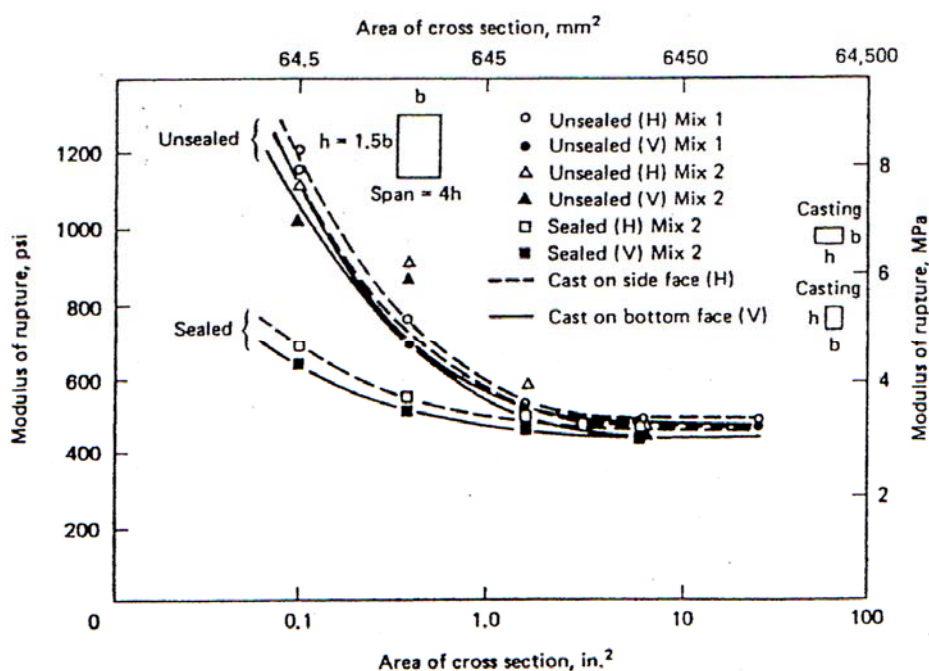
3.12 Παλαιότερη πειραματική διερεύνηση-εφελκυστική καμπτική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αποτελεί βασική παράμετρο της αντοχής του. Επηρεάζει πολλούς σημαντικούς παράγοντες στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος όπως είναι η διατμητική αντοχή, η αντοχή συνάφειας του σκυροδέματος με οπλισμό με νευρώσεις, η αντοχή σε ρηγμάτωση καθώς και η διάταξη των ρωγμών, η ενεργή ροπή αδρανείας, και η μη-γραμμική απόκριση. Υπάρχουν αρκετοί έλεγχοι αντοχής εφελκυσμού όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2. Η καλύτερη επιλογή του ελέγχου εξαρτάται από την κατανομή των τάσεων και συνεπώς και της παραμόρφωσης μέσα στο στοιχείο. Ο έλεγχος του άμεσου εφελκυσμού πετυχαίνει ομοιόμορφη κατανομή εφελκυστικών τάσεων στο στοιχείο. Είναι όμως δύσκολος έλεγχος να πραγματοποιηθεί και χρησιμοποιείται σπάνια. Περισσότερο χρησιμοποιούνται οι έλεγχοι του έμμεσου εφελκυσμού και της κάμψης. Στους ελέγχους αυτούς η βασική κατανομή των τάσεων είναι διαφορετική. Η κατανομή αυτή συζητείται καλύτερα στο κεφάλαιο 2. Από τους παραπάνω ελέγχους, ο έλεγχος σε κάμψη χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε σχέση με το οπλισμένο και το προεντεταμένο σκυρόδεμα.

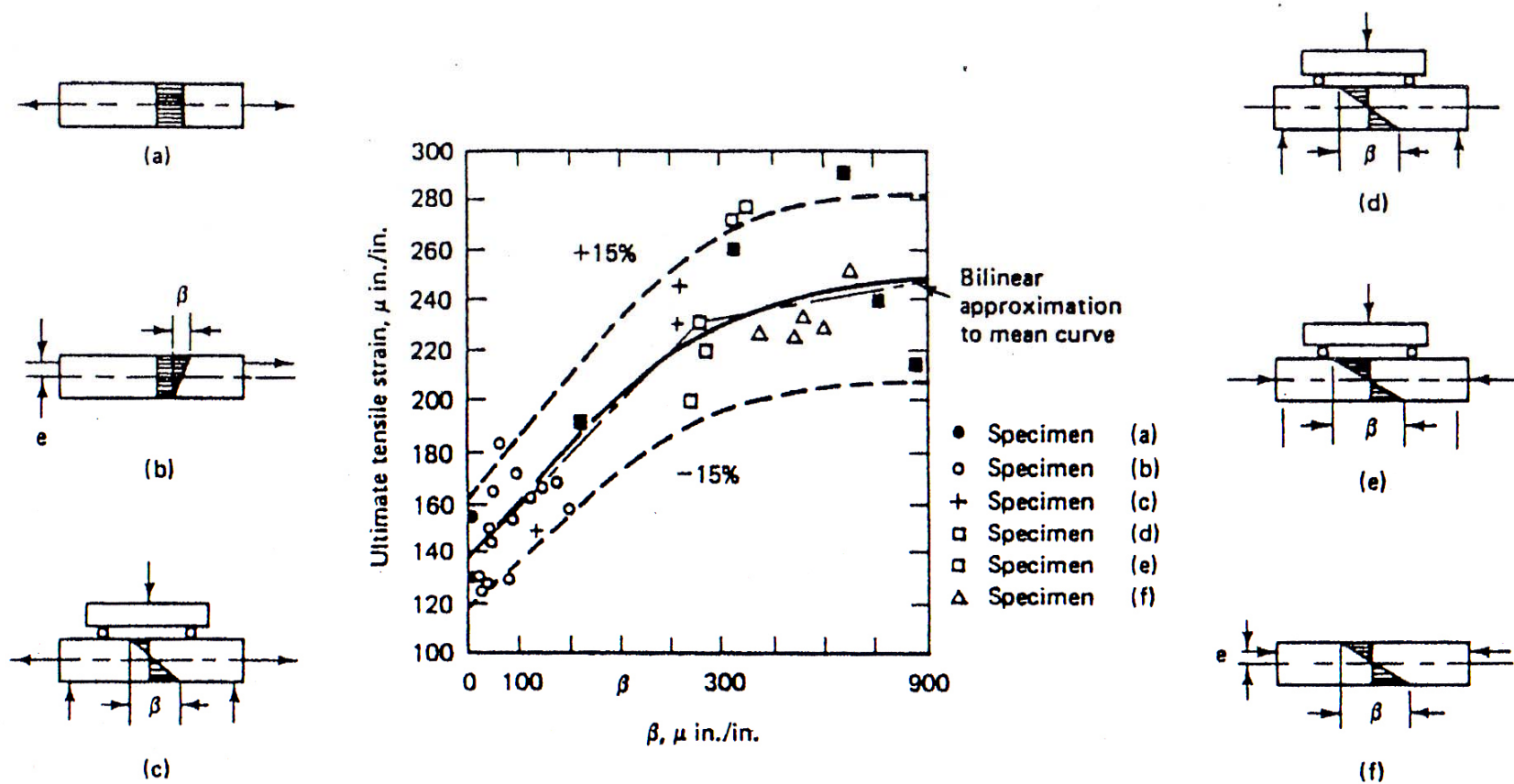
Η κατανομή των τάσεων και της παραμόρφωσης μελετήθηκε καλύτερα από τον Blackman et al. (1958) σε τρία όμοια δοκίμια. Το ένα φορτίστηκε αξονικά, το άλλο καθαρά καμπτικά και το τελευταίο σε μία ενδιάμεση κατάσταση. Σε όλες τις τασικές κατανομές η αστοχία πραγματοποιήθηκε στα σημεία που εμφανίζεται εφελκυσμός. Η

επίδραση της κατανομής όμως έγινε εμφανές από το γεγονός ότι η τελική μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης της κατανομής (strain gradient). Το φαινόμενο μεγιστοποιείται στα μικρότερα δοκίμια (δοκοί) όπου η κλίση της κατανομής των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερη. Δοκιμές δοκών από τους Wright και Garwood (1952) δείχνουν μεγαλύτερη εφελκυστική καμπτική αντοχή με την αύξηση της κλίσης της κατανομής. Παρακάτω παρατίθεται το σχήμα 3.8 που περιέχει τα αποτελέσματα της μελέτης των Blackman et al. (1958).

Σε σχέση με τη μέθοδο της παρασκευής του δοκιμίου και της μεθόδου ελέγχου έχουν αποδειχθεί φαινόμενα κλίμακας για κονιάματα γύψου και τσιμέντου, για δοκούς που παρασκευάστηκαν στο πλευρό τους ή σε όρθια θέση (σωστή θέση). Αποτελέσματα των Sabnis και White (1968) δείχνουν καθαρά ότι η αντοχή των δοκών που παρασκευάστηκαν σε πλευρική θέση είναι υψηλότερη σε σχέση με τις δοκούς που παρασκευάστηκαν στην ορθή θέση. Αυτό συμβαίνει γιατί στις δοκούς της πλευρικής παρασκευής το τμήμα της διατομής που φέρει εφελκυστικές τάσεις περιέχει υλικό που σκυροδετήθηκε σε στρώσεις με διαφορετική αντοχή. Επομένως, περιέχει πιο ετερογενές υλικό και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής βρίσκονται στο σχήμα 3.7.



Σχ.3.7 Συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων μελέτης Sabnis and White 1968



Σχ.3.8 Συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων μελέτης Blackman et al. (1958).

Ο Abrams (1922) ήταν μάλλον ο πρώτος να παρουσιάσει αποτελέσματα για δοκιμές σε κάμψη στο σκυρόδεμα. Οι δοκιμές του Abrams συνυπολόγιζαν μεγάλο αριθμό μεταβλητών σε σχέση με την αντοχή του σκυροδέματος. Αν και ο στόχος των ερευνών του δεν ήταν η διερεύνηση των φαινομένων κλίμακας τα αποτελέσματά του έδειχναν ακριβώς αυτό. Παρατήρησε διαφορές στην αντοχή του σκυροδέματος σε δοκούς των οποίων διαστάσεων διέφεραν ως προς το βάθος της διατομής τους από 100 μέχρι 250 mm. Οι διαφορές αυτές στην αντοχή κυμαίνονταν γύρω στα 10% ανάλογα με το ύψος της δοκού. Οι δοκοί με μεγαλύτερο ύψος είχαν και τη χαμηλότερη αντοχή. Άλλες μελέτες επί του θέματος έγιναν από τους: Blackman et al.(1958) axial tensile and flexural specimens to investigate the effect of strain distribution. Harris et al. (1963) influence in the size/depth in the flexural tensile strength. Mirza (1967) tensile splitting and square beams. Kadlecsek and Spetla (1977) size effect in cylinder and prism tests in direct tension. Malhotra (1969) size effect on tensile strength using direct tension, ring tension, and splitting tension tests.

Από τους παραπάνω οι Kadlecsek και Spetla ανέπτυξαν τη σχέση 3.11.

$$f_t = AV^{-B} \quad (3.11)$$

όπου: f_t = εφελκυστική αντοχή σε kg/cm²

V= όγκος του δοκιμίου σε cm³ x 10⁻³

A, B σταθερές για καλύτερη εφαρμογή των αποτελεσμάτων

Οι τιμές των A και B κυμαίνονται από 23.32 μέχρι 29.56 και 0.021 μέχρι 0.041 αντίστοιχα. Αυτή η σχέση υπονοεί ότι η αντοχή μειώνεται συνεχώς καθώς το μέγεθος του δοκιμίου αυξάνεται. Μια διόρθωση από τον Rao το 1972 βελτίωσε την σχέση:

$$f_t = f_{lim} (1 + CV^{-D}) \quad (3.12)$$

όπου: f_t = ελάχιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής

f_{lim} = Η αντοχή τυπικού δοκιμίου στη διερεύνηση

C, D = πειραματικές σταθερές

Mirza et al. (1972) παρατήρησαν ότι η αντοχή έμμεσου εφελκυσμού κάμψεως, f_{sp} , είναι 10% της θλιπτικής αντοχής, f'_c , καθώς και ότι η αντοχή f_{sp} συνδέεται με την f'_c με την εμπειρική σχέση 3.13.

$$f_{sp} = 6.45\sqrt{f'_c} \quad (f_{sp}, f'_c \text{ σε psi}) \quad (3.13)$$

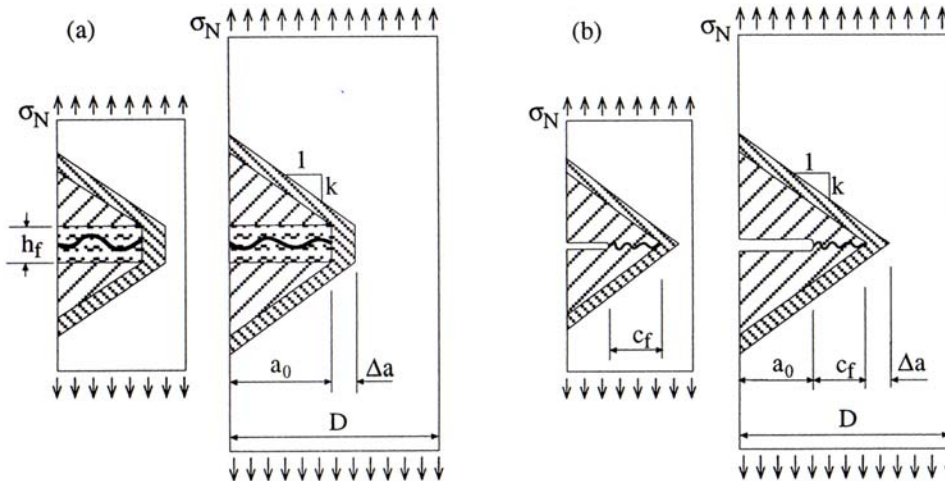
3.13 Αντιμετώπιση των φαινομένων κλίμακας κατά Bazant

Σύμφωνα με τη νέα τάση στα φαινόμενα κλίμακας η θραυστομηχανική παίζει σημαντικό ρόλο στην εξήγηση του φαινομένου. Ο Bazant ήταν ένας από τους πρώτους που εισήγαγε τη θραυστομηχανική ως μέσο εξήγησης των φαινομένων κλίμακας. Ο νόμος των φαινομένων κλίμακας που βασίζεται στη θραυστομηχανική δημοσιεύθηκε από τον Bazant το 1984. Η γενικότερη τάση του φαινομένου εμφανίζεται γραφικά στο σχήμα 3.3.

Η σύνδεση της θραυστομηχανικής με τα φαινόμενα κλίμακας έκτοτε είναι αποδεκτή από το μεγαλύτερο μέρος της επιστημονικής κοινότητας. Το πώς έχουν συνδεθεί τα δύο μπορεί να γίνει αντιληπτό από την παρακάτω εξήγηση:

Έστω ότι υπάρχει πλάκα με ομοιόμορφη εφελκυστική τάση, σ_N . Η θραύση επέρχεται με τη μορφή ζώνης ρωγμών πάχους h_f περνώντας από το κεντρικό τμήμα της πλάκας. (Βλέπε σχήμα 3.9). Η επέκταση της ζώνης ρωγμών κατά ένα μοναδιαίο μέγεθος απαιτεί μία ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ανά μοναδιαίο πάχος του δοκιμίου ονομάζεται ενέργεια θραύσης και συμβολίζεται με G_f . Η τιμή της G_f μπορεί να θεωρηθεί για την παρούσα εξήγηση ως σταθερά του υλικού. Προκειμένου να εξακριβωθεί η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την επέκταση της ζώνης ρωγμών πρέπει να επιστρατευτεί ο νόμος της ενεργειακής ισορροπίας. Η ενέργεια που προσφέρεται είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για την επέκταση της ζώνης.

Προκειμένου να συμβαίνει αυτό πρέπει κανείς να θεωρήσει ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται από το δοκίμιο το οποίο βρίσκεται συνεχώς υπό τάση σ_N (όπου σ_N είναι κατάσταση μέγιστου φορτίου αντοχής) χρησιμοποιείται για την επέκταση της ζώνης ρωγμών. Ως προσέγγιση θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι η παρουσία της ζώνης πάχους h_f μειώνει την πυκνότητα της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy) στην ζώνη και στην περιοχή με την απλή διαγράμμιση από $\sigma_N^2/2E$ (για το ανέπαφο τμήμα της πλάκας) σε μηδέν (όπου E = μέτρο ελαστικότητας). Η περιοχή με την απλή διαγράμμιση έχει όρια 2 γραμμές με εμπειρική κλίση k . Όταν η ζώνη των ρωγμών επεκταθεί κατά Δa η πρόσθετη ενέργεια παραμόρφωσης που απελευθερώνεται προέρχεται από την περιοχή της πυκνής διαγράμμισης. Εάν η διαδικασία της αστοχίας είναι ίδια, όπως συμβαίνει τις περισσότερες φορές, όσο μεγαλύτερη είναι η πλάκα τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της ζώνης ρωγμών τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου. Επίσης σε μεγαλύτερες πλάκας η περιοχή της διπλής διαγράμμισης θα έχει μεγαλύτερο εμβαδόν. Επομένως σε μεγαλύτερη κατασκευή περισσότερη ενέργεια απελευθερώνεται κατά την επέκταση της ζώνης κατά το ίδιο μήκος. Αυτή είναι και η πηγή των φαινομένων κλίμακας.



Σχ.3.9 Γράφημα της επέκτασης των ρωγμών σε πλάκες διαφορετικού μεγέθους

Ποσοτικά η ενέργεια που απελευθερώνεται, ανά μονάδα πάχους της πλάκας, δίνεται από το εμβαδόν της περιοχής της πυκνής διαγράμμισης. Επομένως η συνολική απελευθερωμένη ενέργεια από την ζώνη ρωγμών για μια πλάκα πάχους b , που ισούται με την ενέργεια που χρειάζεται για να σχηματιστεί η ζώνη θραύσης, $G_f b \Delta a$, είναι:

$$b(h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a) \frac{\sigma_N^2}{2E} = G_f b \Delta a \quad (3.14)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την τάση σ_N προκύπτει ο νόμος των φαινομένων κλίμακας:

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (3.15)$$

$$\text{όπου: } Bf_t' = \sqrt{\frac{2G_f E}{h_f}} = \text{σταθερά και } D_0 = \frac{h_f D}{2ka_0} = \text{σταθερά}$$

Το μέγεθος D_0 εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου μέσω της σταθεράς k αλλά είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του στοιχείου εφόσον τα στοιχεία είναι γεωμετρικά όμοια ($D/a_0 = \text{σταθερό}$), f_t' είναι η εφελκυστική αντοχή και h_f είναι το πλάτος της ζώνης ρωγμών, που εδώ αντιμετωπίζεται ως σταθερά, ανεξάρτητα από το μέγεθος του δοκιμίου.

Η εξήγηση αυτή δεν λειτουργεί μόνο για ζώνες ρωγμών αλλά και για λεπτές γραμμικές ρωγμές. Έστω δυο πλάκες διαφορετικού μεγέθους όπως στο σχήμα 3.9 b, όπου η αστοχία επέρχεται με τη μορφή γραμμικής ρωγμής και όχι ζώνης ρωγμών. Υπάρχει πάντα μια

πεπερασμένη περιοχή θραύσης που προηγείται του άκρου της ρωγμής. Η ζώνη αυτή έχει πεπερασμένο μήκος και μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί σταθερού μήκους. Κατά το μήκος αυτής της ζώνης η τιμή της ορθής τάσης μειώνεται από f_t σε μηδέν. Εξαιτίας της ύπαρξης της περιοχής αυτής η ελαστική ισοδύναμη ρωγμή που προκαλεί απελευθέρωση της ενέργειας από το παράπλευρο υλικό έχει μεγαλύτερο μήκος. Η ισοδύναμη ρωγμή έχει μεγαλύτερο μήκος από a_0 κατά c_f που μπορεί να θεωρηθεί και ως σταθερά του υλικού.

Όταν η ρωγμή επεκτείνεται κατά ένα μήκος Δa η ζώνη θραύσης που προηγείται της ρωγμής μεταφέρεται με την μετακίνηση του άκρου της. Η περιοχή από την οποία απελευθερώνεται ενέργεια είναι η πυκνά γραμμοσκιασμένη περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9b. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν παρατηρούμε ότι η συνολική ενεργειακή απελευθέρωση, που πρέπει να ισούται με την ενέργεια που χρειάζεται για την επέκταση της ρωγμής ($G_f b \Delta a$), είναι:

$$b2k(a_0 + c_f)\Delta a \frac{\sigma_N^2}{2E} = G_f b \Delta a \quad (3.16)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την τάση σ_N προκύπτει ο νόμος των φαινομένων κλίμακας:

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (3.17)$$

$$\text{όπου: } Bf_t' = \sqrt{\frac{G_f E}{kc_f}} = \text{σταθερά και } D_0 = c_f \frac{D}{a_0} = \text{σταθερά}$$

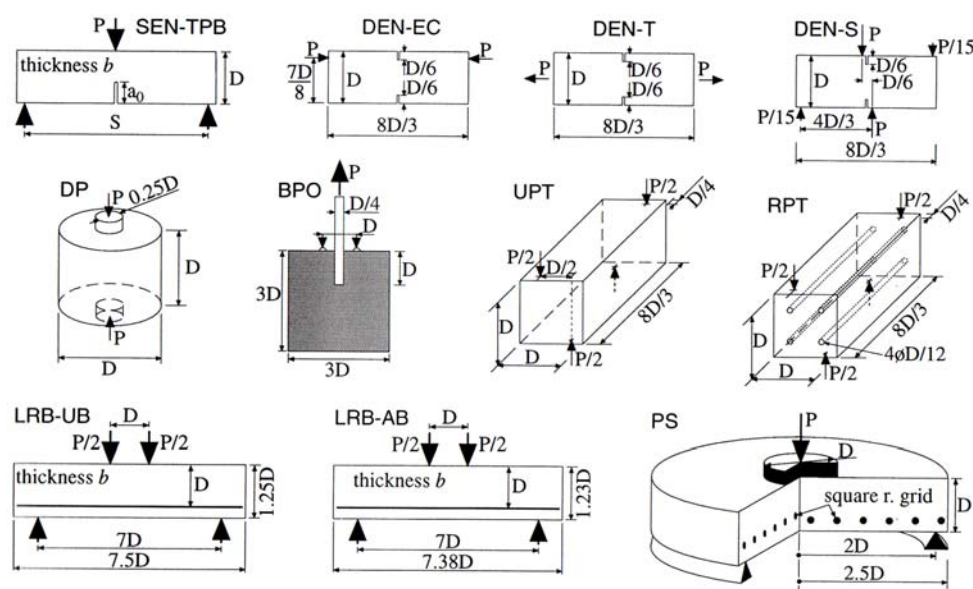
Οι παραπάνω εξισώσεις είναι προσεγγιστικές εξαιτίας των απλοποιητικών παραδοχών στις οποίες βασίστηκαν. Η παραπάνω λογική όμως είναι σωστή. Προκειμένου να προκύψουν πιο αναλυτικές εξισώσεις απαιτείται ακριβής χρήση της θεωρίας της θραυστομηχανικής.

3.14 Πειραματικές έρευνες και αποδείξεις

Ο νόμος των φαινομένων κλίμακας που προτάθηκε από τον Bazant έχει επιβεβαιωθεί από μεγάλο πλήθος πειραματικών ερευνών. Στις πειραματικές μελέτες υπήρξε μεγάλη διαφοροποίηση του τύπου και του σχήματος των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις έρευνες αυτές προέρχονται από δοκίμια με και χωρίς αρχική εγκοπή. Η αρχική εγκοπή χρησιμοποιείται για να επιτρέψει την εφαρμογή ορισμένων μη-γραμμικών θεωριών θραυστομηχανικής που απαιτούν την προϋπαρξη αρχικής ρωγμής-εγκοπής. Γραφικός πίνακας όπου παρουσιάζεται ο τύπος και το είδος των δοκιμίων που

χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση του νόμου των φαινομένων κλίμακας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.

Αποτελέσματα από 23 πειραματικές σειρές χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση του νόμου των φαινομένων κλίμακας του Bazant. Τα πειραματικά αποτελέσματα διαχωρίζονται σε δύο διαφορετικές υποσειρές. Η μία υποσειρά περιέχει τα αποτελέσματα των δοκιμών με αρχική εγκοπή ενώ η άλλη τα δοκίμια χωρίς αρχική εγκοπή. Και στις δύο περιπτώσεις τα πειράματα έδειξαν αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν τον νόμο των φαινομένων κλίμακας. Τα αποτελέσματα προήλθαν από τις μελέτες των Walsh (1972), Bazant and Pheiffer (1987), Bazant and Pheiffer (1986), Gettu, Bazant and Karr (1990), Fathy (1992), Bazant, Gettu and Kazemi (1991), McKinney and Rice (1981), Marti (1989), Bazant and Sener (1988), Bazant, Sener and Prat (1988), Bazant and Kazemi (1991) και Bazant and Cao (1987).



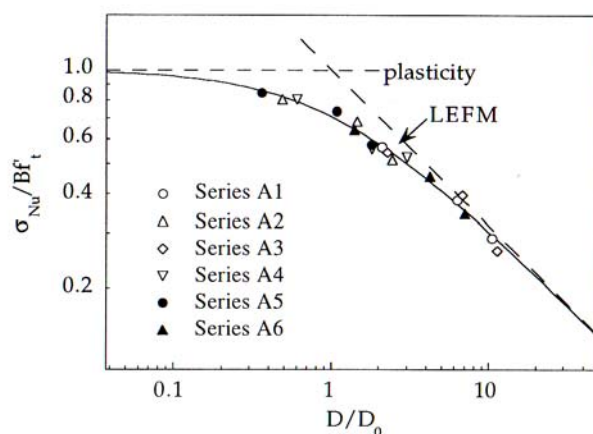
Σχ.3.10 Σχεδιάγραμμα όπου περιγράφονται τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σε πειραματικές έρευνες για την επιβεβαίωση του νόμου των φαινομένων κλίμακας (Σχέσεις 3.15 και 3.17)

3.14.1 Κατασκευές με εγκοπές ή ρωγμές

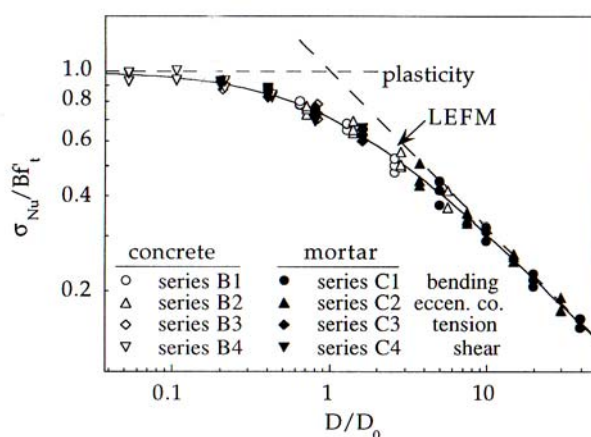
Ο νόμος των φαινομένων κλίμακας επιβεβαιώθηκε αρχικά μέσω συγκρίσεων με τις δοκιμές του Walsh (1972) του οποίου τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά στο σχήμα 3.11. Τα δοκίμια του Walsh ήταν δοκοί που είχαν εγκοπή στην μια τους ίνα. Στα δοκίμια αυτά εφαρμόστηκε η δοκιμή κάμψεως τριών σημείων. Ο Walsh ήταν ο πρώτος που σχεδίασε τα αποτελέσματα σε διάγραμμα $\log \sigma_{Nu}$ συναρτήσεως του $\log D$ αλλά δεν προσπάθησε να περιγράψει με μαθηματικά το διάγραμμα ούτε το γενίκευσε. Οι δοκιμές του Walsh ήταν περιορισμένου εύρους σε σχέση με τη διασπορά που προέκυψε και επομένως η σύγκριση με το νόμο του Bazant δεν ήταν αδιαμφισβήτητη.

Ισχυρότερη πειραματική τεκμηρίωση προέκυψε από τους Bazant και Pfeiffer (1986, 1987) καλύπτοντας μεγαλύτερο εύρος μεγεθών καθώς και γεωμετρία δοκιμίων (SEN-TPB, DEN-EC, DEN-S σύμφωνα με το Σχ. 3.10). Η έρευνα περιείχε δοκιμές σε σκυρόδεμα (Σειρά B1-4) και κονίαμα (Σειρά C1-4). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας και η εφαρμογή του νόμου στα πειραματικά δεδομένα φαίνεται στο Σχ. 3.12. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τον νόμο των φαινομένων κλίμακας του Bazant.

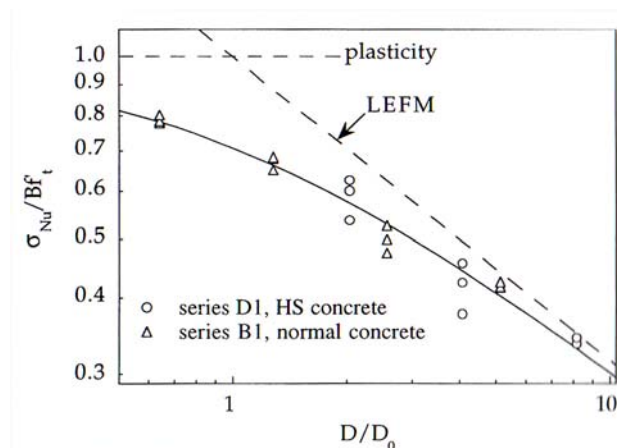
Μελέτη των φαινομένων κλίμακας σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC-High Strength Concrete) πραγματοποιήθηκε από τους Gettu, Bazant και Karr (1990). Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια SEN-TPB (σύμφωνα με το Σχ. 3.10). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 3.13 σε σχέση με τη καλύτερη εφαρμογή του νόμου φαινομένων κλίμακας και τις ασυμπτωτικές του.



Σχ.3.11 Αποτελέσματα Walsh (1972)



Σχ.3.12 Αποτελέσματα Bazant Pfeiffer (1986, 1987)

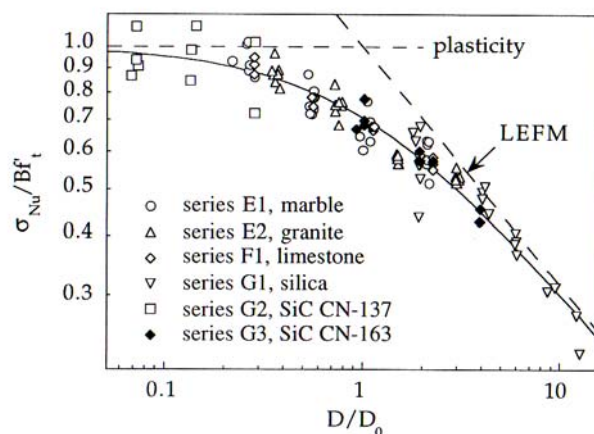


Σχ.3.13 Αποτελέσματα Gettu, Bazant Karr (1990)

Για το σκυρόδεμα τα αποτελέσματα συμπληρώνονται από τα ιδιαίτερα εκτενή πειραματικά δεδομένα για τα δοκίμια τύπου SEN – TPB (σύμφωνα με το σχ. 3.10) που δημοσιεύθηκαν από τους Bazant και Gettu (1992).

Ερευνήθηκε επίσης η ικανότητα του νόμου των φαινομένων κλίμακας να περιγράφει τη διακύμανση της ονομαστικής αντοχής δοκιμών με εγκοπές από υλικά διαφορετικά από το σκυρόδεμα. Ιδιαίτερα για διάφορα πετρώματα και κεραμικά. Ο Fathy (1992) δοκίμασε μάρμαρο και γρανίτη, οι Bazant, Gettu και Kazemi (1991) ασβεστόλιθο και οι McKinney και Rice (1981) τα υλικά SiO₂ και SiC CN-137. Το σχήμα 3.14 περιγράφει τα αποτελέσματα όλων των προαναφερθέντων.

Σύγχρονα αποτελέσματα δείχνουν κάποιο βαθμό συμφωνίας με το νόμο για υλικά όπως ο πάγος και διάφορα συνθετικά. Οι Bazant, Daniel και Li (1996) δοκίμασαν δοκίμια τύπου DEN-S από εποξικές ίνες σε εφελκυσμό και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με το νόμο για εύρος μεγεθών σε αναλογία 1:8. Οι Adamson et al. (1995) και Mulmule, Demsey και Adamson (1995) πραγματοποίησαν διάφορες δοκιμές σε θαλάσσιο πάγο χρησιμοποιώντας μεγάλη ποικιλία δοκιμών. Σε μία σειρά τα δοκίμια είχαν εύρος μεγεθών 1:160. Αυτές οι δοκιμές αποτελούν το μεγαλύτερο εύρος μεγεθών που δοκιμάστηκε ποτέ. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν μία αρκετά καλή εφαρμογή με το νόμο του Bazant.



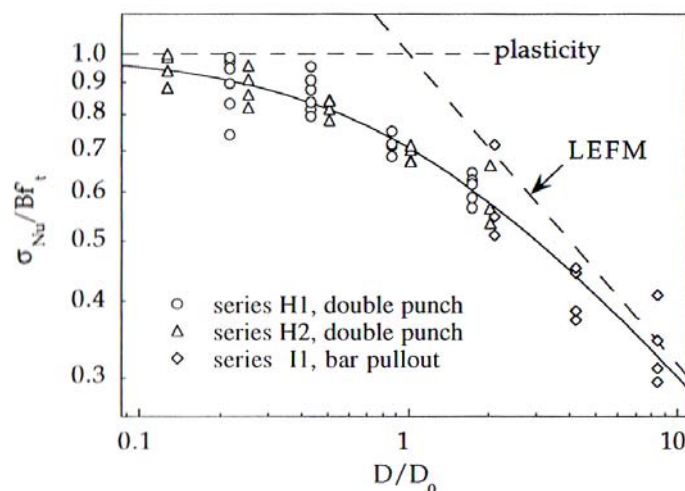
Σχ.3.14 Fathy (1992), Bazant, Gettu και Kazemi (1991) και McKinney and Rice (1981)

3.14.2 Κατασκευές χωρίς εγκοπές ή ρωγμές

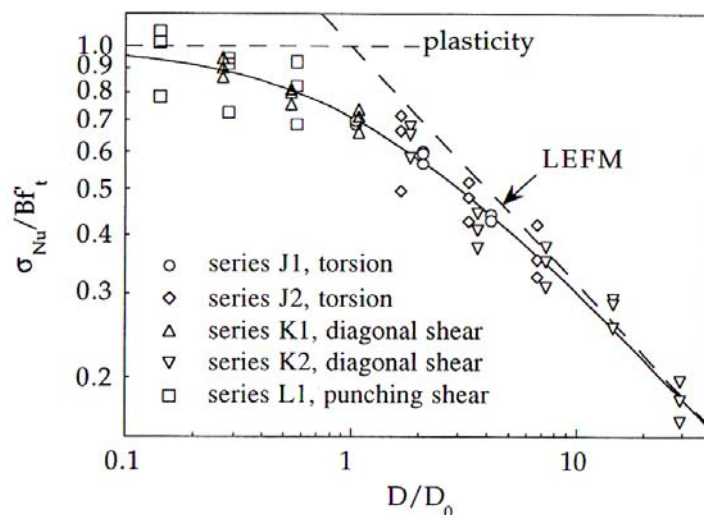
Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα δοκίμια χωρίς εγκοπές για την επιβεβαίωση του νόμου των φαινομένων κλίμακας. Ικανοποιητική συμφωνία με το νόμο έχει βρεθεί για τα παρακάτω δοκίμια:

1. Κυλινδρικά δοκίμια διπλής διάτρησης (Marti 1989, Double punch tests of cylinders)
2. Αστοχία συνάφειας οπλισμού (Bazant and Sener (1988) Pullout failure of bars, Elingehausen and Ozbolt (1990) Pullout of studed anchors, Sener (1992) bond splices)
3. Αστοχία σωλήνων από άοπλο σκυρόδεμα (Gustafsson and Hillerborg (1985), Bazant and Cao (1986))
4. Στρεπτική αστοχία σε δοκούς (Bazant, Sener and Prat 1988)
5. Διαγώνια αστοχία τέμνουσας σε δοκούς με διαμήκη οπλισμό με ή χωρίς εγκάρσιο οπλισμό με ή χωρίς προένταση (Diagonal shear failure of longitudinally reinforced beams without or with stirrups, unprestressed or prestressed, Bazant and Kim (1984), Bazant and Sun (1987), Bazant and Kazemi (1991))
6. Αστοχία διάτρησης διαφραγμάτων (Punching shear failure of slabs Bazant and Cao (1987))

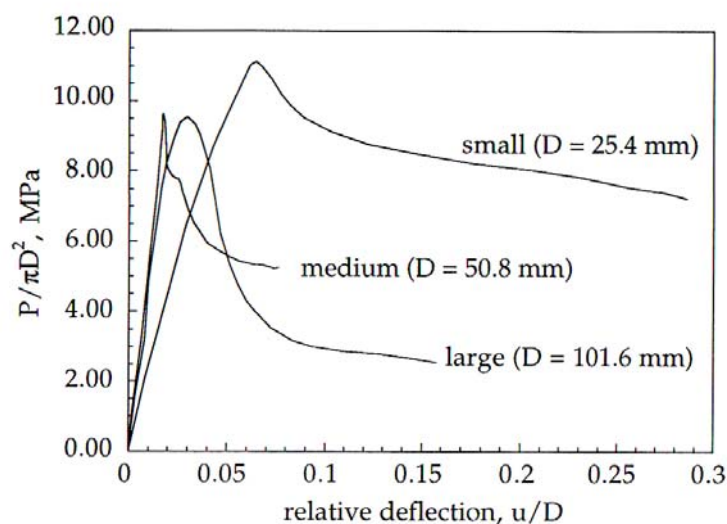
Στα σχήματα 3.15 και 3.16 παρουσιάζονται τα δεδομένα και η σύγκριση τους με το νόμο του Bazant. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως απόδειξη της εφαρμογής της θραυστομηχανικής στη ψαθυρή αστοχία του σκυροδέματος. Πρόσθετη απόδειξη της εφαρμογής της θραυστομηχανικής αποτελεί η έρευνα Bazant and Cao (1987). Στην έρευνα αυτή προκύπτει ότι για τη διατρητική αστοχία διαφραγμάτων ο ρυθμός πτώσης της εφαρμοζόμενης δύναμης στο φθίνοντα κλάδο (post peak load drop) είναι μεγαλύτερος όσο αυξάνεται το μέγεθος του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μεγαλύτερο δοκίμιο απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την επέκταση της ρωγμής. Το φορτίο πρέπει να πέσει ανάλογα ώστε να ανταποκριθεί στην απελευθέρωση της ενέργειας.



Σχ.3.15 Αποτελέσματα διπλής διάτρησης και αστοχία συνάφειας



Σχ.3.16 Αποτελέσματα στρέψης, διαγώνια τέμνουσας και διατρητικής τέμνουσας

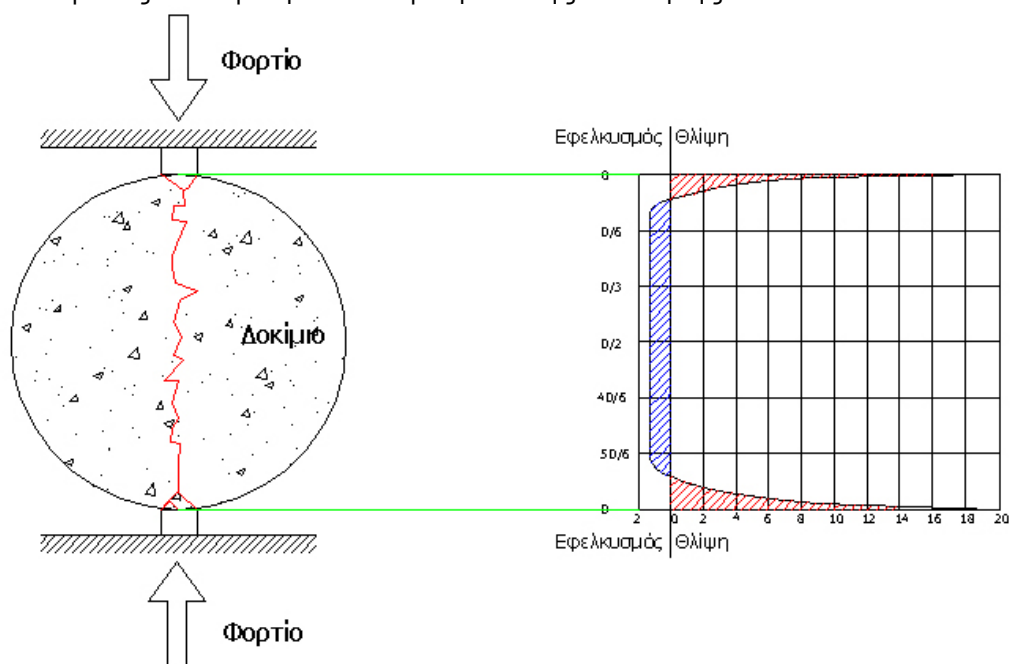


Σχ.3.17 Αποτελέσματα Bazant and Cao (1987)

3.15 Φαινόμενα κλίμακας σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian splitting test)

Το σκυρόδεμα καθώς επίσης και άλλα ψαθυρά υλικά, αστοχούν σε θλίψη είτε μετά κεκλιμένες διατμητικές ρωγμές είτε από αξονικό διαχωρισμό. Ένα παράδειγμα του αξονικού διαχωρισμού είναι η βραζιλιάνικη δοκιμή διάσπασης κυλίνδρων (Brazilian Split Cylinder Test). Η εισαγωγή αυτής της δοκιμής από Carneiro και τον Barcellos (1953) στη Βραζιλία παρακινήθηκε από το γεγονός ότι η ελαστική λύση για συγκεντρωμένες δυνάμεις που εφαρμόζονται σε διαμετρικά αντίθετες γενέτειρες ενός κυλινδρικού δοκιμίου παράγουν σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης κατά μήκος της γραμμής των φορτίων, εκτός από τις συγκεντρωμένες εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις στις σχετικά μικρού εύρους περιοχές κάτω από τα φορτία. Γι'αυτόν το λόγο, η δοκιμή έχει χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της εφελκυστικής αντοχής

και έχει συμπεριληφθεί στα περισσότερα πρότυπα ως τυπική μέθοδος διερεύνησης της εφελκυστικής αντοχής (ASTM C496, BS 1881-117, ISO 4108). Η μεθοδολογία της δοκιμής επεκτάθηκε για να περιλάβει εκτός από κυλίνδρους και πρίσματα τετραγωνικής διατομής.



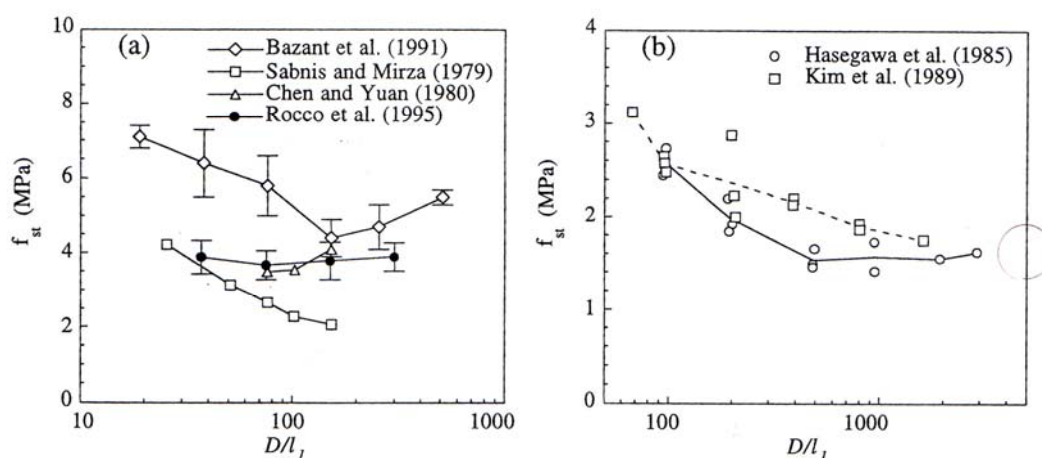
Σχ.3.18 Κατανομή εγκάρσιων τάσεων στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη και διάταξη ρωγμών.

Όπως σε όλες τις αστοχίες που οφείλονται σε ρηγματώσεις έτσι και στο σκυρόδεμα αναμένουμε φαινόμενα κλίμακας να επηρεάσουν την τελική αντοχή του υλικού. Και πράγματι σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού που έγιναν στο παρελθόν επιβεβαιώνεται ακριβώς αυτό. Το μέγεθος του δοκιμίου επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή που προκύπτει από τη δοκιμή. Παρόλο όμως που πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων πάνω στο θέμα δεν εμφανίστηκε μια συγκεκριμένη ομοιομορφία αποτελεσμάτων. Τα πειράματα των (a) Sabnis and Mirza (1979), (b) Kim et al (1989) και (c) Ross, Thomson and Tedesco (1989) δείχνουν μια συνεχή μείωση της αντοχής με την αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου. Τα πειράματα των Chen and Yuan (1980) δείχνουν μια αύξηση μετά από ορισμένη διάμετρο.

Πειραματικές δοκιμές μεγαλύτερου εύρους κλίμακας πραγματοποιήθηκε το 1985 (Hasegawa et al.). Στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια με διαμέτρους από 100 mm – 3000 mm. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν μία πιο περίπλοκη τάση. Για τις μικρές διαμέτρους η έμμεση εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου. Όταν όμως η διάμετρος υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή η τάση των αποτελεσμάτων αντιστρέφεται. Η αντοχή αυξάνει με την αύξηση της διαμέτρου. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στις δοκιμές του Lundborg σε γρανίτη παρόλο που το εύρος της κλίμακας ήταν περιορισμένο. Ομοίως τα πειράματα του Bazant et al (1991) δείχνουν μια μείωση της αντοχής με την αύξηση της

διαμέτρου, μετά όμως έχουμε σταθεροποίηση έως και μικρή αύξηση της αντοχής καθώς οι διάμετροι αυξάνονται.

Advanced Size Effect Analysis



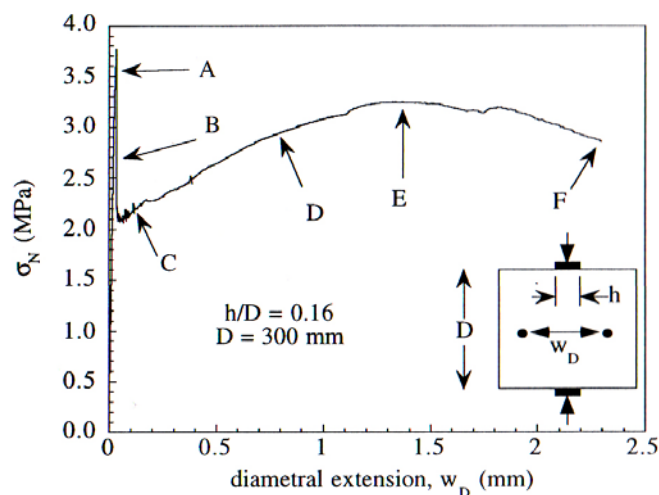
Σχ.3.19 Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις πειραματικών αποτελεσμάτων έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη.

Η πολυπλοκότητα και οι διαφορές της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς μπορεί να οφείλεται κυρίως σε τρεις παράγοντες. (α) Εκτός από τις δοκιμές Rocco et al (1995), δεν υπάρχει ανεξάρτητος προσδιορισμός των ιδιοτήτων θραύσης, και, ως εκ τούτου, δεν υπάρχει καμία αναφορά κλίμακας ως προς το υλικό. Τα αποτελέσματα μπορούν πιθανώς να συμφωνούν το ένα με το άλλο αλλά με τους κατάλληλους άξονες. (β) Η δύναμη διάσπασης είναι ευαίσθητη ως προς τις συνοριακές συνθήκες, ιδιαίτερα στο σχετικό πλάτος h/D της λωρίδας φόρτισης (όπου h το πλάτος της λωρίδας και D η διάμετρο του κυλίνδρου). Το σχετικό πλάτος της λωρίδας h/D πρέπει να κρατηθεί σταθερό για να εξασφαλιστεί η πλήρη ομοιότητα των συνοριακών συνθηκών. Μερικές από τις αναφερόμενες δοκιμές μπορεί να μην έχουν χρησιμοποιήσει καν τις λωρίδες φόρτισης ή χρησιμοποιήσαν λωρίδες σταθερού πλάτους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ομοιότητα δεν είναι εγγυημένη. (γ) Όπως με όλα τα φαινόμενα στο σκυρόδεμα, η αντοχή διάσπασης είναι ένα εξαρτώμενο μέγεθος. Εάν ο ρυθμός φόρτισης δεν ρυθμιστεί, μπορεί να βρεθεί αναλογικά σημαντική απόκλιση στα αποτελέσματα.

3.15.1 Ο μηχανισμός ρηγμάτων στη διάρρηξη

Ο Rocco (1996) πραγματοποίησε δοκιμές σε ευσταθή διάρρηξη σε κυλινδρικά δοκίμια από γρανίτη και κύβους σκυροδέματος με προσεκτικό έλεγχο των συνοριακών συνθηκών. Η διαμετρική παραμόρφωση μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών με αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης ο οποίος επεκτείνονταν διαμετρικά κατά ένα μήκος $0.75D$. Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του σερβοϋδραυλικού συστήματος της πρέσας. Με άλλα λόγια τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν ελέγχοντας τον ρυθμό της διαμετρικής

παραμόρφωσης. Η ευστάθεια της διάρρηξης επέτρεψε τη βιντεοσκόπηση της επέκτασης και διάνοιξης της ρωγμής. Ένα τυπικό διάγραμμα φορτίου – διαμετρικής παραμόρφωσης φαίνεται στο Σχ. 3.20. Η αναλογία των διαστάσεων της διαμέτρου προς την διάσταση των λωρίδων φόρτισης ήταν 0.16 (ASTM C496).

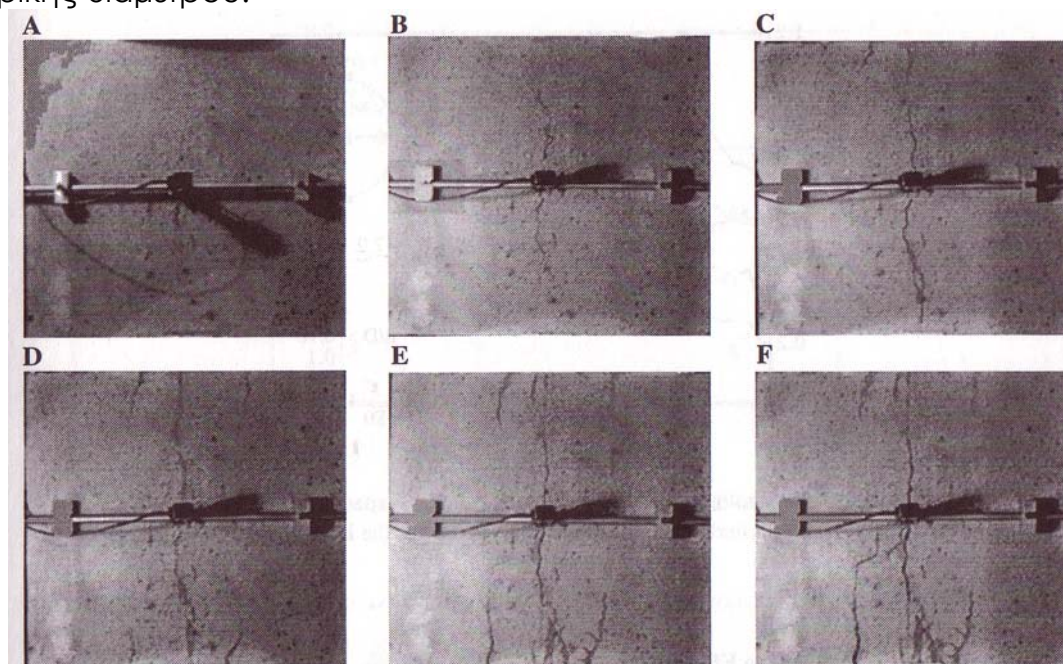


Σχ.3.20 Διάγραμμα φορτίου (τάση) – Διαμετρική παραμόρφωση

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.20 βλέπει κανείς έξι χαρακτηριστικά σημεία (A,B,C,D,E,F). Τα έξι αυτά σημεία ανταποκρίνονται στις φωτογραφίες του σχήματος 3.21. Από το παραπάνω διάγραμμα όμως μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαδικασία της επέκτασης της ρωγμής κατά τη διάρκεια ενός πειράματος διάρρηξης. Αμέσως μετά τη κορυφή A μπορεί να παρατηρήσει κανείς μία μικρή ρωγμή πίσω από τον αισθητήρα (Σχ. 3.21 A). Το σημείο A του διαγράμματος (Σχ. 3.20) σηματοδοτεί την έναρξη της ρηγμάτωσης. Αμέσως μετά την κορυφή σημείο A, η ρωγμή επεκτείνεται ραγδαία από το σημείο B μέχρι το σημείο C. Στο σημείο C η ρηγμάτωση σταματάει, ενώ η ρωγμή έχει επεκταθεί ήδη σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Παράλληλα υπάρχει και η εμφάνιση μιας δεύτερης ρωγμής επάνω αριστερά ενώ εμφανίζεται και μία κάτω δεξιά. Φτάνοντας στο σημείο D του διαγράμματος (Σχ. 3.20) εμφανίζονται καθαρά πλέον στο δοκίμιο (Σχ. 3.21 D) τέσσερις ρωγμές (μία από κάθε πλευρά των 2 λωρίδων φόρτισης). Στο σημείο E η δευτερεύουσα ρωγμή κάτω αριστερά ανοίγει περισσότερο από κάθε άλλη, ενώ διάχυση ρωγμών εμφανίζεται κάτω από την λωρίδα φόρτισης στο κάτω μέρος. Στο σημείο F η δευτερεύουσα ρωγμή στο κάτω αριστερό μέρος έχει επεκταθεί μέχρι το κέντρο του δοκιμίου με αποτέλεσμα να σχηματιστεί μηχανισμός αστοχίας.

Η διαδικασία αυτή ήταν τυπική για τα πειράματα του Rocco. Μικρές διαφορές ως προς την συμμετρία των ρηγμάτων μπορεί να εμφανίζονταν αλλά ο μηχανισμός της αστοχίας ήταν πάντα ίδιος με την εξής σειρά. Βασική ρωγμή → Μέγιστη κορυφή διαγράμματος → σχετικά συμμετρικές δευτερεύουσες ρωγμές → δευτερεύουσα κορυφή διαγράμματος → απώλεια συμμετρίας και αστοχία. Οι δευτερεύουσες

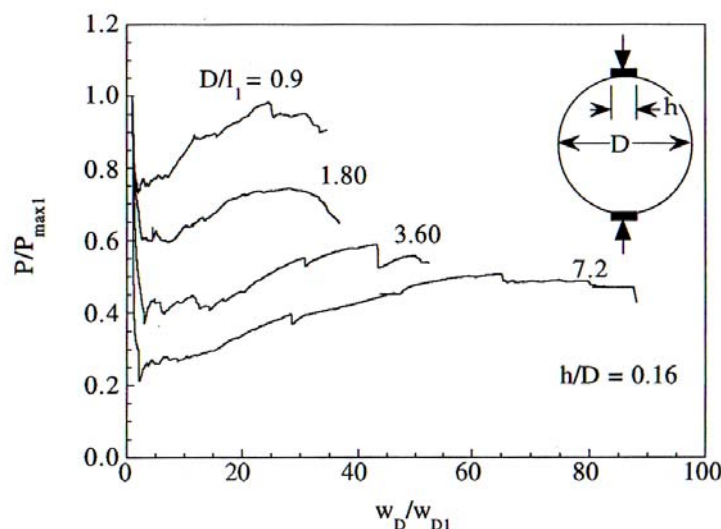
ρωγμές εμφανίζονται σχετικά στα σημεία μέγιστης εφελκυστικής αντοχής όπως υπολογίστηκε με βάση πλαστική ανάλυση πεπερασμένων σημείων για ένα δοκίμιο όπου υπήρχε μια ρωγμή κατά μήκος της κεντρικής διαμέτρου.



Σχ.3.21 Φωτογραφίες των φάσεων της αστοχίας Rocco 1996

Ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα της μελέτης του Rocco, ήταν το γεγονός ότι το σχετικό ύψος της δευτερεύουσας κορυφής στο διάγραμμα (Σχ. 3.20 σημείο E) επηρεάζεται από το λόγο h/D (πλάτος λωρίδας φόρτισης προς διάμετρο δοκιμίου) και κυρίως από το μέγεθος του δοκιμίου (σε σχέση με το χαρακτηριστικό μήκος l_1). Αυτό φαίνεται καθαρά από το Σχ. 3.22 όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες δοκιμών διάφορων μεγεθών με σταθερό λόγο h/D . Η δευτερεύουσα κορυφή του διαγράμματος ανεβαίνει καθαρά με τη μείωση του μεγέθους του δοκιμίου ενώ πλησιάζει την μέγιστη αρχική κορυφή για μέγεθος $D=0.9 l_1$. Για μικρότερα μεγέθη δοκιμών η συνολικά μέγιστη κορυφή του διαγράμματος είναι η δευτερεύουσα κορυφή και επομένως το μέγιστο φορτίο που καταγράφεται στη δοκιμή δεν σχετίζεται με την κεντρική ρωγμή, η οποία μάλιστα σχετίζεται άμεσα με την αστοχία σε διάρρηξη. Τα αποτελέσματα του Rocco δείχνουν επίσης ότι όσο πλατύτερη είναι η λωρίδα φόρτισης τόσο υψηλότερη είναι η δευτερεύουσα κορυφή του διαγράμματος.

Μια πρακτική επίπτωση των παραπάνω είναι ότι το πλάτος της λωρίδας φόρτισης που προτείνεται από ASTM C496 είναι μάλλον μεγάλο ($h/D = 0.16$). Η χρήση ενός μικρότερου λόγου της τάξης του 0.08 προτείνεται προκειμένου να αντιστοιχεί η μέγιστη κορυφή του διαγράμματος με την κεντρική ρωγμή.



Σχ.3.22 Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου – διαμετρικής παραμόρφωσης

3.15.2 Τροποποιημένος νόμος του Bazant

Οι Bazant et al. (1991), Size effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and fracture analysis, πρότειναν ότι ο νόμος των φαινομένων κλίμακας σε συνάρτηση με τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του υλικού μπορούσε να γραφεί ως:

$$\sigma_N = \frac{c_n K_{if}}{[g'(a_0)c_f + g(a_0)d]^{1/2}}, \quad (3.18)$$

όπου: K_{if} = ο συντελεστής εντάσης της κρίσιμης τάσης (critical stress intensity factor – fracture toughness)

c_f = ενεργό μήκος της ζώνης θραύσης για δοκίμιο άπειρου μεγέθους (effective length of fracture process zone for a specimen of infinite size)

c_n = συντελεστής που εισάγεται ανάλογα

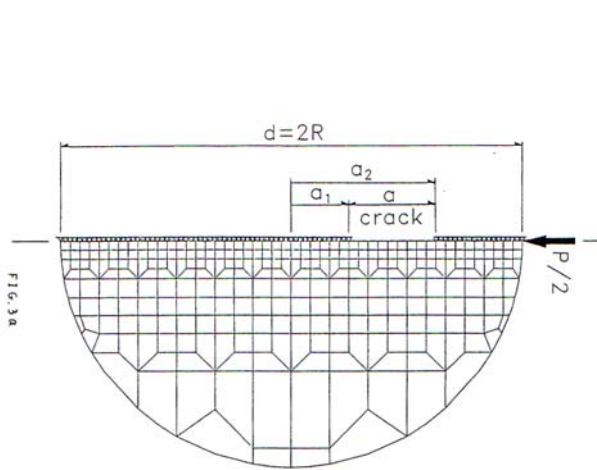
$g'(a) = dg(a)/da$ = παράγωγος της συνάρτησης $g(a)$

$g(a)$ = αδιάστατος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας υπολογισμένος για το σχετικό μήκος της ρωγμής $a=a/d$ σύμφωνα με τη γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική (Nondimensionalized energy released rate calculated for the relative crack length $a = a/d$ according to linear elastic fracture mechanics)

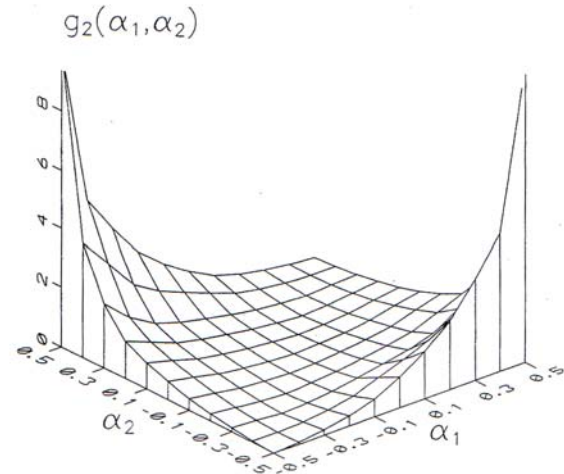
a = μήκος της ρωγμής και $a_0=a_0/d$ όπου a_0 είναι η αρχική τιμή του a και $d=D$ = διάμετρος του δίσκου

Η συνάρτηση $g(a)$ προέρχεται από ελαστικές λύσεις και είναι χαρακτηριστική της γεωμετρίας του δοκιμίου. Μπορεί να βρεθεί μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ή από τη βιβλιογραφία για συνηθισμένες γεωμετρίες δοκιμίων (Tada, Paris and Irwin και Murakami), χρησιμοποιώντας τη σχέση $g(a) = k^2(a) = (K_I b/P)^2 d$ όπου K_I = συντελεστής έντασης της τάσης οφειλόμενη στο φορτίο P_0 .

Για κυκλικό δίσκο με ακτινική ρωγμή της οποίας τα άκρα βρίσκονται σε αποστάσεις a_1 και a_2 από το κέντρο του δίσκου οι τιμές της συνάρτησης $g(a)$ είναι διαφορετικές για κάθε άκρο. Οι συναρτήσεις συμβολίζονται με $g_1(a_1, a_2)$ και $g_2(a_1, a_2)$ για κάθε άκρο a_1 και a_2 , αντίστοιχα, όπου $\alpha_1 = a_1/d$, $\alpha_2 = a_2/d$, d = διάμετρος του δίσκου και $a_2 - a_1 = a$ που συμβολίζει το μήκος της ρωγμής. Προφανώς $g_1(-a_2, -a_1) = g_2(a_1, a_2)$ λόγω συμμετρίας. Για διάφορους συνδυασμούς (a_1, a_2) οι τιμές της συνάρτησης $g_2(a_1, a_2)$ υπολογίστηκαν από γραμμική-ελαστική ανάλυση πεπερασμένων σημείων. Το πλέγμα των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 3.23, ενώ στο σχήμα 3.24 φαίνεται το γράφημα της συνάρτησης $g(a)$ στο δεύτερο άκρο της ρωγμής. Παραπάνω πληροφορίες σχετικά με τον υπολογισμό της συνάρτησης $g(a)$ περιέχονται στη δημοσίευση Bazant et al. (1991), ACI Materials Journal.



Σχ.3.23 Το πλέγμα των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στη γραμμική-ελαστική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

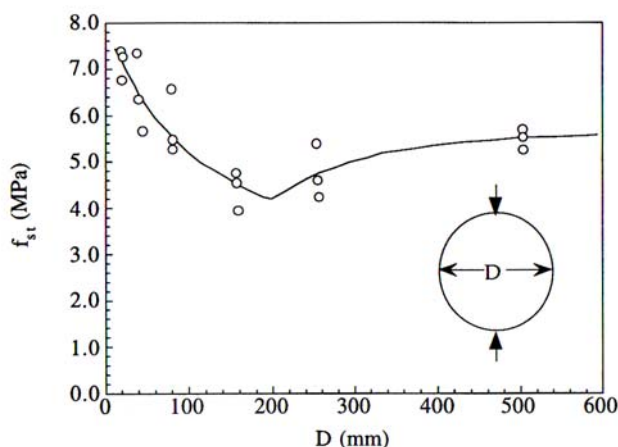


Σχ.3.24 Το διάγραμμα της συνάρτησης $g(a)$ για το δεύτερο άκρο της ρωγμής.

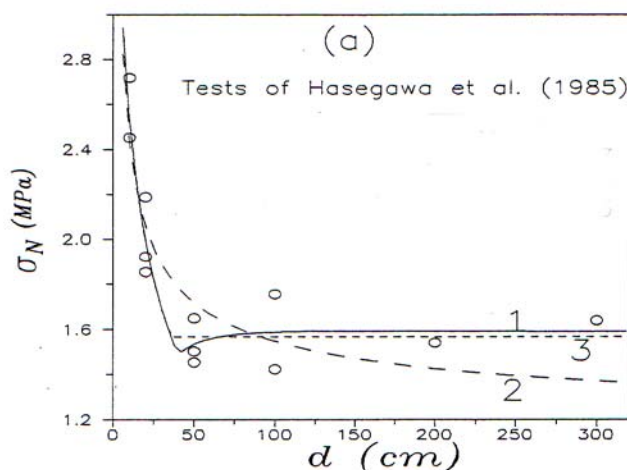
Προκειμένου να ισχύει ο κλασικός νόμος του Bazant πρέπει ο λόγος a_0/d να παραμείνει σταθερός. Σύμφωνα με Bazant et al. (1991) βρέθηκε ότι πράγματι το μέγεθος a_0 είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο του δοκιμίου για διαμέτρους μικρότερες του d_t (d_t : κρίσιμο μέγεθος – transition size). Για μεγέθη μεγαλύτερα του d_t , το a_0 παραμένει σταθερό και ίσο με a_t . Επομένως ονομάζοντας το $a_0 = a_0d$ με $a_0 = a_t/d_t$ για $d < d_t$ και $a_0 = a_t$ ($a_0 = a_t/d$) για $d > d_t$, η αρχική εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\sigma_N = \frac{c_n K_{If}}{\left[g' \left(\frac{a_t}{d_t} \right) c_f + g \left(\frac{a_t}{d_t} \right) d \right]^{1/2}} \quad \text{for } d \leq d_t \quad (3.19a)$$

$$\sigma_N = \frac{c_n K_{If}}{\left[g' \left(\frac{a_t}{d} \right) c_f + g \left(\frac{a_t}{d} \right) d \right]^{1/2}} \quad \text{for } d > d_t \quad (3.19b)$$



Σχ.3.25 Η εξίσωση και τα πειραματικά αποτελέσματα Bazant et al. (1991)



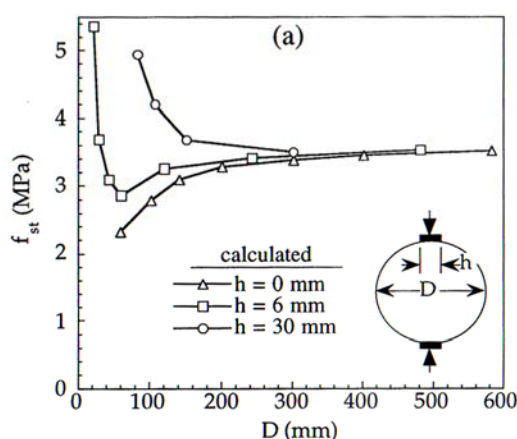
Σχ.3.26 Η εξίσωση και τα πειραματικά αποτελέσματα Hasegawa, Shioya and Okada (1985)

Η προηγούμενη εξίσωση αντικατόπτρισε πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα των Bazant et al. (1991). Επίσης η εξίσωση συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα των Hasegawa, Shioya and Okada (1985). Παρόλο που η προσαρμογή ήταν καλή, η εξίσωση αυτή πρέπει να αντιμετωπιστεί σαν προσωρινή διότι η αύξηση της αντοχής για διαμέτρους μετά από κάποια διάσταση δεν έχει επιβεβαιωθεί από όλα τα πειράματα.

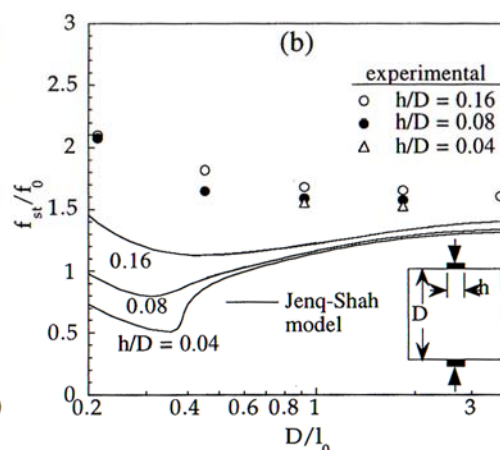
3.15.3 Τα φαινόμενα κλίμακας και το μοντέλο Jenq – Shah.

Οι Tang, Shah και Ouyang (1992) ανέλυσαν τη δοκιμή της διάρρηξης κυλίνδρων σύμφωνα με το μοντέλο των δύο παραμέτρων των Jenq και Shah. Θεώρησαν συμμετρική ανάπτυξη ρωγμών από κεντρική εγκοπή θεωρώντας διαφορετικά μεγέθη εγκοπών και διάφορα πλάτη για τις λωρίδες φόρτισης. Με το μαθηματικό αυτό μοντέλο προέκυψαν οι καμπύλες που φαίνονται στο σχήμα 3.27. Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζονται οι καμπύλες σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα

του Rocco 1995. Στο σχήμα 3.27 οι καμπύλες παρουσιάζονται για σταθερό πλάτος της λωρίδας φόρτισης h και όχι για σταθερό σχετικό πλάτος h/D ενώ στο σχήμα 3.28 η προσαρμογή των καμπύλων στα πειραματικά αποτελέσματα δεν ήταν δυνατή γιατί ο Rocco υπολόγισε τις τιμές των δύο παραμέτρων K_{Ic} και w_{Tc} σύμφωνα με τις προτάσεις του RILEM Draft 1990α.



Σχ.3.27 Οι καμπύλες Jenq and Shah



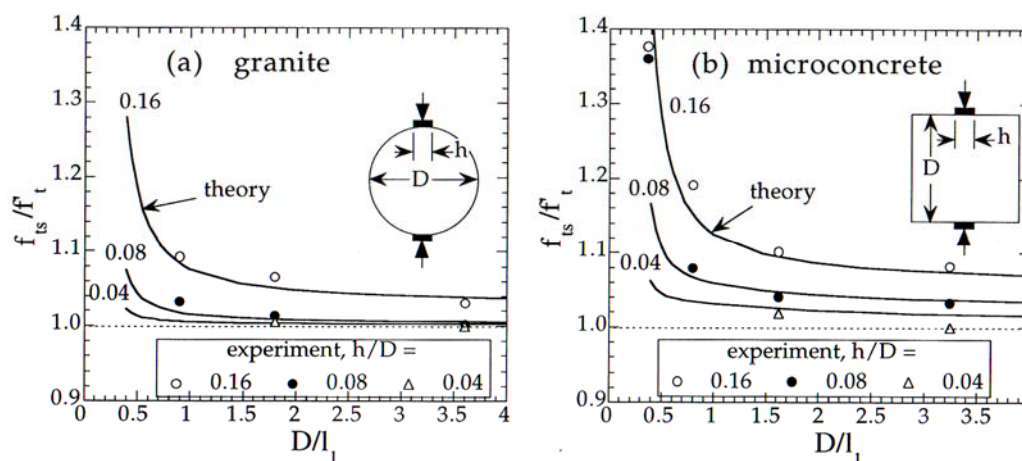
Σχ.3.28 Οι καμπύλες Jenq and Shah με τα αποτελέσματα του Rocco (f : τάση και l_0 : διάσταση)

3.15.4 Τα φαινόμενα κλίμακας και το μοντέλο των ρωγμών συνοχής

Η αντοχή κυβικών πρισμάτων σκυροδέματος σε διάρρηξη μπορεί να αναλυθεί μέσω του μοντέλου των ρωγμών συνοχής. Αυτό πραγματοποιήθηκε από τον Modeer (1979) χρησιμοποιώντας γραμμική εξίσωση για το φθίνοντα κλάδο συμπεριφοράς (linear softening function) και λωρίδα φόρτισης με πλάτος $h=0.1D$. Θεώρησε μία ρωγμή κατά μήκος του πεδίου φόρτισης και το υλικό ως ελαστικά συμπεριφερόμενο. Υπήρξαν ισχυρά φαινόμενα κλίμακας για μικρά μεγέθη ($D < 0.5 l_{ch}$, όπου l_{ch} εσωτερικό χαρακτηριστικό μήκος του υλικού) και ασθενή για μεγαλύτερα μεγέθη. Εξέφρασε όμως την επιφύλαξη ότι η ανάλυσή του πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο ως ένδειξη της ύπαρξης ισχυρών φαινομένων κλίμακας. Αυτό γιατί στους υπολογισμούς υπήρξε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής σε περιοχές εκτός της κύριας ρωγμής. Παρόλο που πραγματοποίησε δοκιμές διάρρηξης σε δοκίμια τσιμεντοπολτού και κονιάμα τους δεν έγινε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την θεωρητική του προσέγγιση.

Προσφάτως ο Rocco 1996 χρησιμοποίησε το μοντέλο του Modeer αλλά με πυκνότερο δίκτυο στοιχείων και με αναβαθμισμένη αριθμητική μέθοδο. Το μοντέλο προσέγγιζε τον πραγματικό μηχανισμό αστοχίας που παρατηρήθηκε στα πειράματά του. Βρέθηκε ότι η μέγιστη τιμή της αντοχής προέκυπτε αρκετά πριν από την πλήρη ρηγμάτωση του δοκιμίου. Επομένως ότι και αν ήταν ο φθίνοντας κλάδος φορτίου – παραμόρφωσης, η αρχική γραμμικότητα του διαγράμματος επαρκούσε

να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή (Σχ.3.20). Τα αποτελέσματα του Rocco παρουσιάζονται στο σχήμα 3.29. Εδώ όπως και στο μοντέλο του Jenq και Shah δεν υπήρξε καλύτερη παραμετρική προσέγγιση των καμπυλών στα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχ.3.29 Οι καμπύλες του μοντέλου των ρωγμών συνοχής και τα πειραματικά αποτελέσματα για κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια σε διάρρηξη. Rocco 1996 (f : τάση και I_1 : διάσταση)

3.16 Φαινόμενα κλίμακας σε δοκιμές θλίψης

Παρόμοια με την εφελκυστική αντοχή, πολλές μορφές θλιπτικής αστοχίας ημιψαθυρών υλικών όπως το σκυρόδεμα, πετρώματα, πάγος, κεραμικά και συνθετικά παρουσιάζουν φαινόμενα κλίμακας (Van Mier (1986), Gonnermann (1925), Blanks and McNamara (1935), Marti (1989), Jishan and Xixi (1990)). Ο μηχανισμός της θλιπτικής αστοχίας όμως και τα φαινόμενα κλίμακας που παρουσιάζονται είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και δεν έχει κατανοηθεί πλήρως. Αποτελεί την πιο επικίνδυνη μορφή αστοχίας παρουσιάζοντας μεγάλη ψαθυρότητα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή η αστοχία δεν ελέγχεται από το κριτήριο της αντοχής του υλικού όπως έχει θεωρηθεί ως σήμερα. Αντίθετα μάλιστα υπάρχουν αρκετοί ερευνητές (Ingraffea (1977), Bazant, Lin and Lippmann (1993), Bieniawski (1974), Hoek and Bieniawski (1965), Cotterell (1972), Paul (1968)) που υποστηρίζουν ότι επηρεάζεται από την απελευθέρωση αποθηκευμένης ενέργειας με παρόμοιο τρόπο όπως η εφελκυστική αντοχή.

Είτε το αποτέλεσμα της αστοχίας είναι η χαλάρωση του υλικού ή η ψαθυρότητα, που συμβαίνει στο σκυρόδεμα όταν υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο, πρέπει να αναμένονται φαινόμενα κλίμακας. Τα φαινόμενα κλίμακας είναι η πιο σοβαρή συνέπεια της ρηγμάτωσης και θραύσης της ύλης και επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό.

3.16.1 Μηχανισμοί θλιπτικής αστοχίας

Σε όλκιμα υλικά η αστοχία σε θλίψη οφείλεται στη πλαστική ολίσθηση της ύλης κατά τη διεύθυνση κεκλιμένων διατμητικών λωρίδων

(ζωνών). Αυτή η μορφή αστοχίας είναι όλκιμη χωρίς την ιδιαίτερη πτώση του εφαρμοζόμενου φορτίου μετά την επίτευξη της υψηλότερης τιμής του. Τέτοιο είδος αστοχίας δεν παρουσιάζει φαινόμενα κλίμακας.

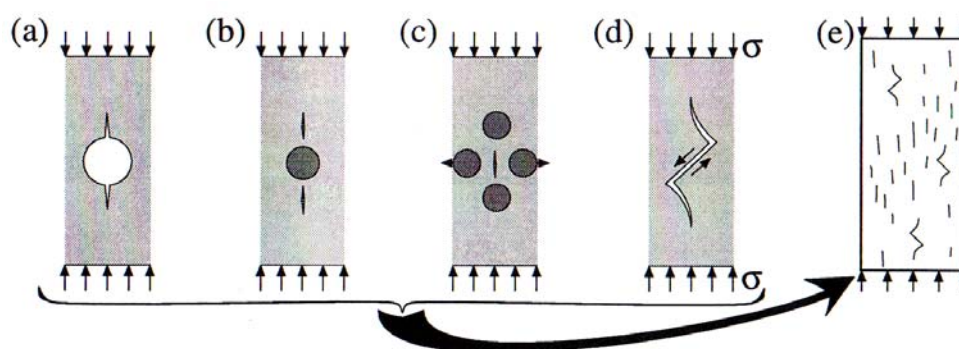
Σε ημιψαθυρά υλικά όμως τέτοιο είδος αστοχίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με την ύπαρξη υψηλών εγκάρσιων περιοριστικών τάσεων. Εξαιτίας της ανυπαρξίας τέτοιων τάσεων η διατμητική ολίσθηση δεν μπορεί να αναπτυχθεί σε ημιψαθυρά υλικά όπως το σκυρόδεμα. Η αλληλεμπλοκή των ανώμαλων επιφανειών θραύσης των ρωγμών μεταξύ τους υπό γωνία στην κύρια θλιπτική τάση δεν επιτρέπει την εμφάνιση διατμητικής ολίσθησης. Ολίσθηση μπορεί να εμφανιστεί μόνο εάν τα δύο χείλη των ρωγμών έχουν ανοίξει αρκετά και έχει καταστραφεί η αλληλεμπλοκή των αδρανών. Η διατμητική αστοχία μπορεί βέβαια να παρατηρηθεί μακροσκοπικά, αλλά ο μικροσκοπικός μηχανισμός δε βασίζεται στην προαναφερθέντα ολίσθηση. Συνήθως οφείλεται σε εφελκυστική μικρο-ρηγμάτωση σε κεκλιμένη διεύθυνση.

Μικροσκοπικά τρεις είναι οι μηχανισμοί που οδηγούν στη θλιπτική αστοχία.

1. Οι πόροι και οι μικρορωγμές: Είναι γνωστό ότι το πορώδες αποτελεί βασικό παράγοντα της θλιπτικής αντοχής. Η γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική χρησιμοποιήθηκε για να αποδειχθεί ότι οι πόροι προκαλούν την έναρξη και επέκταση αξονικών μικρορωγμών κάτω από ολοένα αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από πλήθος μελετητών: (Cotterell (1972), Sammis and Ashby (1986), Ashby and Hallam (1986), Kemeny and Cook (1987), Kemeny and Cook (1991), Shetty, Rosenfield and Duckworth (1986), Nesetova and Lajtai (1973), Carter, Lajtai and Yuan (1992), Carter (1992), Yuan, Lajtai and Ayari (1993)). Οι μικρορωγμές αυτές όμως μπορούν να επεκταθούν μόνο για μία περιορισμένη απόσταση από τον πόρο. Η μέγιστη απόσταση επέκτασης τους ισούται με τη διάμετρο του πόρου. Επομένως ο μηχανισμός αυτός δεν μπορεί να εξηγήσει τη συνολική αστοχία.
2. Ενσωματωμένα στοιχεία και μικρορωγμές: Η ύπαρξη ενσωματωμένων άκαμπτων στοιχείων (πχ. αδρανή) στο μαλακό μίγμα του τσιμεντοπολτού προκαλεί την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων σε κάποια απόσταση πάνω και κάτω από τα ξένα αυτά σώματα. Οι τάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν μικρές ρωγμές. Πιο αποτελεσματικοί μηχανισμοί παραγωγής εγκάρσιων ρωγμών μέσα σε ένα πεδίο ομοιόμορφης μονοαξονικής θλίψης είναι ομάδες στοιχείων. Τέτοια περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη δύο αδρανών σφηνωμένων μεταξύ δύο άλλων. Ένας τέτοιος μηχανισμός αστοχίας (που προτάθηκε για το σκυρόδεμα από τους Brandt and Baker) μπορεί να προκαλέσει μικρο-ρωγμές ανάμεσα στα στοιχεία. Ένα βασικό σημείο βέβαια του μηχανισμού αυτού είναι το γεγονός ότι οι ρωγμές που αναπτύσσονται έχουν μικρό μήκος, συγκρίσιμο δε με το μέγεθος των στοιχείων (αδρανών για το σκυρόδεμα). Επομένως ούτε αυτός ο μηχανισμός εξηγεί με τρόπο ικανοποιητικό τη συνολική αστοχία.

3. Μικρορωγμές με άκρα τύπου πτερυγίων (wingtip microcracks):
 Μέσα σε ένα υλικό χωρίς πόρους ή ενσωματωμένων στοιχείων μπορούν να αναπτυχθούν ρωγμές σε ένα ομοιόμορφα θλιπτικό πεδίο μέσω ασθενών κεκλιμένων κρυσταλλικών ενώσεων. Ολίσθηση κατά τη διεύθυνση των κεκλιμένων ρωγμών προκαλεί την ανάπτυξη καμπύλων ρωγμών που σταδιακά στρίβουν προς τη διεύθυνση των θλιπτικών τάσεων. Οι ρωγμές αυτές ονομάζονται ρωγμές με άκρα τύπου πτερυγίων. Ο μηχανισμός αυτός έχει αναλυθεί εκτενώς από πλήθος ερευνητών αριθμητικά και αναλυτικά (Hawkes and Mellor (1970), Ingraffea (1977), Ashby and Hallam (1986), Nemat-Nasser and Obata (1988), Horii and Nemat-Nasser (1982), Horii and Nemat-Nasser (1986), Kachanov (1982), Lehner and Kachanov (1996), Sanderson (1988), Schulson (1990), Batto and Schulson (1993), Costin (1991) και Schulson and Nickolayev (1995)), ενώ έχει αναλυθεί αυστηρώς από τον Nixon (1996). Καμπύλες ρωγμές υπό θλιπτική φόρτιση έχουν αποσαφηνιστεί από τους Cotterell και Rice (1980). Μια πλήρης ρεαλιστική ανάλυση των ρωγμών αυτών είναι η τρισδιάστατη, κάτι το οποίο μάλιστα πραγματοποιήθηκε πρόσφατα. Σημαντική σημείωση αποτελεί το γεγονός ότι το μήκος των ρωγμών αυτών είναι της τάξεως, του μήκους των κεκλιμένων ρωγμών ολίσθησης. Επομένως ούτε αυτός ο μηχανισμός δεν εξηγεί της καθολική αστοχία.

Σχεδιαγράμματα των παραπάνω μηχανισμών εμφανίζονται στο Σχήμα 3.30.



Σχ.3.30 Μικροσκοπικοί μηχανισμοί ανάπτυξης μικρορωγμών σε θλίψη. (α) λόγω πόρων (β) λόγω ενσωματωμένου στοιχείου (γ) λόγω μηχανισμού ενσωματωμένων στοιχείων (δ) λόγω μικρορωγμών με άκρα τύπου πτερυγίων (ε) δοκίμιο με ομοιόμορφα κατανεμημένη βλάβη που δημιουργήθηκε από συνδυασμό των παραπάνω μηχανισμών (Bazant and Xiang 1997).

Από τους μακροσκοπικούς μηχανισμούς θλιπτικής αστοχίας είναι σημαντικό να ξεχωρίσουμε τους μηχανισμούς που προκαλούν καθολική απελευθέρωση ενέργειας και αυτούς που δεν την προκαλούν. Από το σχήμα 3.31 ο μηχανισμός (c) δεν προκαλεί καθολική απελευθέρωση ενέργειας. Η επέκταση μιας συνεχώς μακροσκοπικής διαχωριστικής ρωγμής δεν προκαλεί διαφοροποίηση στο μακροσκοπικό τασικό πεδίο. Η αστοχία αυτή συνήθως εμφανίζεται εργαστηριακά για μικρά δοκίμια που τα άκρα τους ολισθαίνουν εξαιτίας μικρής τριβής. Το μακροσκοπικό τασικό πεδίο επηρεάζεται κυρίως από εγκάρσιες ρωγμές. Η ενέργεια που

επεκτείνει μια ρωγμή πρέπει να προέρχεται από τοπικό μηχανισμό, όπως είναι η απελευθέρωση αποθηκευμένης ενέργειας από τη ζώνη θραύσης (fracture process zone). Εξαιτίας της μη απελευθέρωσης καθολικής ενέργειας η επέκταση μακροσκοπικής διαχωριστικής ρωγμής σε δοκίμιο δεν προκαλεί φαινόμενα κλίμακας. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από αριθμητικά αποτελέσματα των Bazant and Ozbolt (1992) και των Droz and Bazant (1989).

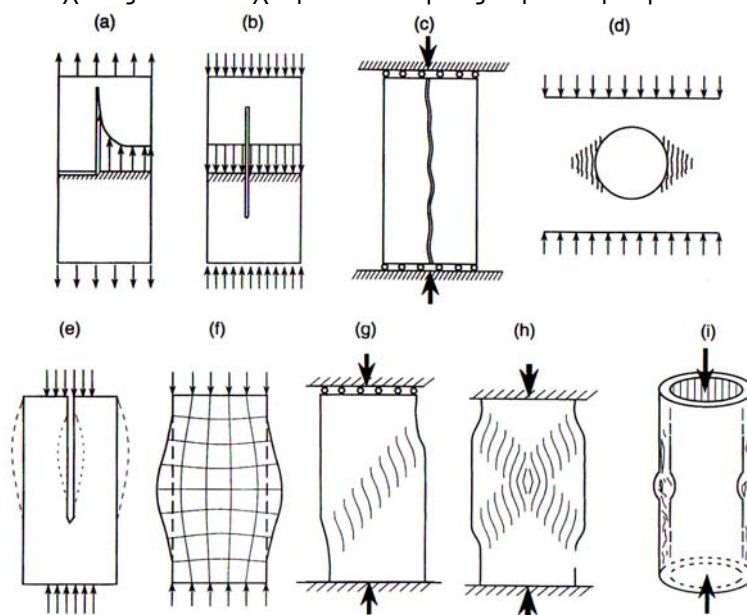
Αν το φορτίο που απαιτείται για την προώθηση του τοπικού μηχανισμού ρηγμάτωσης αξονικού διαχωρισμού (Σχ. 3.31(c)) είναι μεγαλύτερο από το φορτίο που χρειάζεται για τον καθολικό μηχανισμό απελευθέρωσης ενέργειας τότε ο καθολικός μηχανισμός θα προκαλέσει την αστοχία. Ο καθολικός μηχανισμός απελευθέρωσης ενέργειας ουσιαστικά πρέπει να προκαλέσει την εμφάνιση και επέκταση ζώνης ρωγμών εγκάρσια στο κύριο θλιπτικό τασικό πεδίο. Τέτοια ζώνη ρωγμών λογικά θα αποτελείται από πυκνή κατανομή αξονικών διαχωριστικών μικρορωγμών. Το γεγονός ότι η διάταξη μη συνεχών αξονικών μικρορωγμών μπορεί να επεκταθεί εγκάρσια στο κύριο τασικό πεδίο έχει παρατηρηθεί μικροσκοπικά από τον Davies (1992, 1995). Η μείωση της αντοχής του υλικού εξαιτίας μικρορωγμών αναμένεται να προκαλέσει εσωτερικό λυγισμό (internal buckling).

Παρόλο που υπήρξαν σημαντικές πρόσφορες στην ανάλυση και μαθηματική προσομοίωση των μηχανισμών ρηγμάτωσης μικροσκοπικά, το πρόβλημα παραμένει ότι οι μηχανισμοί αυτοί εξηγούν μόνο την μικροσκοπική έναρξη της θλιπτικής θραύσης. Δεν εξηγούν τη μακροσκοπική καθολική αστοχία. Οι μικρορωγμές μπορούν να επεκταθούν προς τη διεύθυνση της θλίψης για πεπερασμένο μήκος κάτω από αυξανόμενο φορτίο, το μέγιστο φορτίο όμως δεν καθορίζεται από τους μηχανισμούς αυτούς.

Κανείς δεν μπορεί να αρνηθεί ότι η καθολική αστοχία ξεκινάει από μηχανισμούς μικροσκοπικής ρηγμάτωσης. Το πώς όμως οι μικρορωγμές αυτές ενώνονται και επεκτείνονται μακροσκοπικά δεν εξηγείται από τους προαναφερόμενους μηχανισμούς μικροσκοπικής ρηγμάτωσης. Πρέπει να εξηγηθεί από έναν καθολικό μηχανισμό αστοχίας. Ένας απλός τέτοιος μηχανισμός προτάθηκε από τον Bazant (1994a) και αργότερα βελτιώθηκε από τους Bazant and Chang (1997). Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι οι απλές ή με άκρα σχήματος πτερυγίων μικρορωγμές, σχηματίζονται ή μία δίπλα στην άλλη κατά εγκάρσια ή κεκλιμένη διεύθυνση. Έτσι σχηματίζεται ζώνη ρηγμάτωσης κάθετα ή με κλίση προς το θλιπτικό τασικό πεδίο. Στην βραχομηχανική οι ρωγμές αυτές ονομάζονται 'en-echelon cracks'.

Σχετικά περιορισμένη είναι η έρευνα που πραγματοποιήθηκε πάνω σε καθολικά μοντέλα θλιπτικής αστοχίας. Ο Biot (1965), σε σχέση με ένα προηγούμενο μοντέλο του για εσωτερικές αστάθειες στη γεωλογία, πρότεινε ότι η θλιπτική αστοχία αποτελεί αστοχία εσωτερικού λυγισμού ενός τρισδιάστατου ημιχώρου (internal buckling of a three-dimensional continuum), πρωτοστατώντας παράλληλα στις ελαστικές λύσεις για τις αστάθειες αυτές. Οι μελέτες του Biot, όμως, περιορίστηκαν σε ελαστικά

υλικά χωρίς την εμφάνιση βλάβης, και συνεπώς οι κρίσιμες τάσεις για τις αστάθειες αυτές ήταν υπερβολικά υψηλές. Ο Bazant (1967) εφάρμοσε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για τη διόγκωση και άλλες αστάθειες των συμπιεζόμενων στερεών που αποκτούσαν ορθοτροπική συμπεριφορά εξαιτίας ομοιόμορφης κατανομής μικρορωγματώσεων. Έδειξε ότι οι αστάθειες αυτές μπορούσαν να εξηγήσουν την αστοχία αξονικά συμπιεζόμενων ινοπλισμένων συνθετικών σωλήνων. Περιέγραψε με ρεαλιστικό τρόπο την εξάρτηση της τάσης αστοχίας από το λόγο του πάχους των τοιχωμάτων προς την διάμετρο.



Σχ.3.31 Καθολικοί μηχανισμοί αστοχίας και υποθέσεις για την θλιπτική αστοχία (Bazant and Xiang 1997)

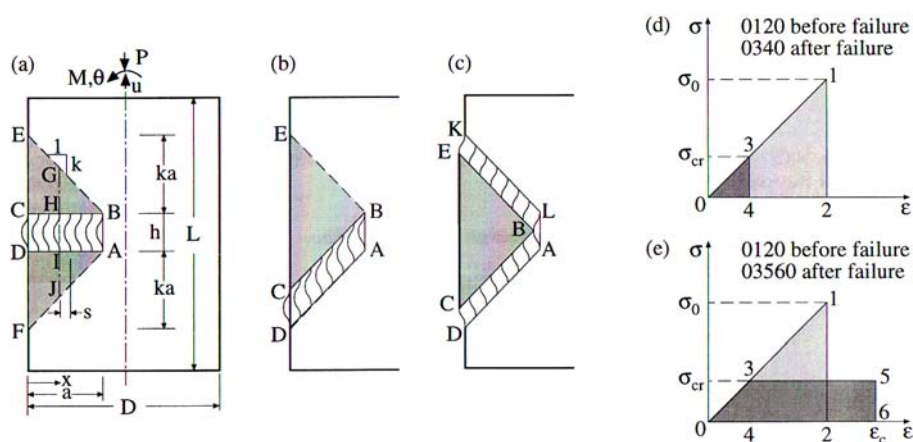
Ο ρόλος του λυγισμού αποσαφηνίστηκε από τη σημαντική προσφορά του Kendall (1978). Ο Kendall μελέτησε τον αξονικό διαχωρισμό πρίσματος συμπιεσμένο μόνο σε τμήμα των επιφανειών των άκρων του. Κατάφερε να καταλήξει σε απλές εξισώσεις. Στο μοντέλο του, ο λυγισμός των τμημάτων του δοκιμίου προκαλείται από την εκκεντρότητα του φορτίου. Η προσομοίωση του δεν μπόρεσε να εξηγήσει την αστοχία αξονικά φορτισμένου δοκιμίου όπου οι θλιπτικές τάσεις εφαρμόζονται ομοιόμορφα στα άκρα του. Η κρίσιμη τάση λυγισμού που προέκυπτε από το μοντέλο του για την περίπτωση αυτή ήταν υπερβολικά υψηλή. Παρά την αποτυχία του αυτή, η άποψη ότι η αστάθεια ενός δοκιμίου εξασθενισμένο από αξονικές ρωγμές ήταν τμήμα ενός καθολικού μηχανισμού θλιπτικής αστοχίας είχε πια εδραιωθεί.

Ένας σημαντικός παράγοντας που ωθεί την θλιπτική αστοχία είναι η απελευθέρωση αποθηκευμένης ενέργειας, ακριβώς όπως συμβαίνει και στην εφελκυστική αστοχία. Η ιδέα αυτή προέκυψε από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για την αστάθεια σε βαθιά ορυχεία στην περιοχή του Transwaal τη δεκαετία του 1960 (Hoek and Bieniawski (1965) και Bieniawski (1974)).

Η έννοια της καθολικής απελευθέρωσης ενέργειας εισήχθηκε στη μοντελοποίηση της θλιπτικής αστοχίας από τους Bazant, Lin and Lirmann (1993). Η μελέτη διαπραγματεύτηκε τη θλιπτική αστοχία σε διατρήσεις πετρωμάτων. Μια ζώνη ρηγματώσεων θεωρήθηκε ότι προέκυπτε στα τοιχώματα της διάτρησης προκαλούμενη από την απελευθέρωση ενέργειας από την περιβάλλουσα βραχομάζα. Αποδείχθηκε ότι η αστοχία αυτή παρουσίαζε φαινόμενα κλίμακας, συμφωνώντας παράλληλα με τα πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα των Haimson and Herrick (1989), Carter (1992) και Carter, Lajtai and Yuan (1992). Αυτή η λύση παρουσίαζε αντίθεση με προηγούμενες πλαστικές λύσεις του προβλήματος οι οποίες δεν προέβλεπαν φαινόμενα κλίμακας. Η απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας κατά την ανάπτυξη ζώνης ρωγμών σε συνδυασμό με το λυγισμό των λεπτών τμημάτων του υλικού ανάμεσα στις ρωγμές αποτέλεσε την βάση του μοντέλου της θλιπτικής αστοχίας που ανέπτυξαν οι Bazant, Linn and Lirmann (1993). Αυτό αποτέλεσε επίσης την βάση της ανάλυσης του Bazant (1994a) και Bazant and Xiang (1997).

3.16.2 Ενεργειακή προσέγγιση θλιπτικής αστοχίας υποστυλώματος

Για ψαθυρά ή ημιψαθυρά υλικά, η θλιπτική αστοχία προκύπτει από το σχηματισμό αξονικών διαχωριστικών ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές όμως δεν επηρεάζουν το μακροσκοπικό θλιπτικό τασικό πεδίο. Εξαιτίας αυτού δεν προκαλούν φαινόμενα κλίμακας. Επομένως δεν μπορούν να αποτελούν μηχανισμό θλιπτικής αστοχίας που δεν επηρεάζει το τελικό φορτίο αστοχίας. Μπορούν μόνο να είναι ο μηχανισμός που προκαλεί την μακροσκοπική αστοχία. Ο Bazant (1994a) πρότεινε ότι ο πρωτεύων μηχανισμός που προκαλεί την τελική αστοχία είναι η επέκταση, κατά φορά εγκάρσια κάθετη ή διαγώνια προς τη φορά της θλιπτικής φόρτισης, ζώνης πυκνών παράλληλων αξονικών μικρορωγμών. Το σχήμα 3.32 δείχνει διάφορες γεωμετρίες της ζώνης ρωγμών που προκαλούν ισοδύναμα αποτελέσματα. Το υλικό ανάμεσα στις �ωγμές υποβαλλόμενο σε θλίψη αστοχεί τελικά από λυγισμό.



Σχ.3.32 Ενεργειακή απελευθέρωση στη θλιπτική αστοχία. (a-c) Διάφορες μορφές επέκτασης ζώνης, διάταξη ρωγμών και λυγισμός υλικού. (d-e) Ενεργειακά εμβαδά με και χωρίς λυγισμό (Bazant and Xiang, 1997).

Βασική ιδέα είναι ο υπολογισμός της διαφοράς της αποθηκευμένης ενέργειας που προκαλείται από το λυγισμό. Τα γραμμοσκιασμένα τμήματα (Σχ. 3.32 α-γ) πάνω στα δοκίμια αποτελούν ζώνες όπου η τάση μειώθηκε από σ_0 σε σ_{cr} . Η ενεργειακή διαφορά στις περιοχές αυτές υπολογίζεται από τη διαφορά των εμβαδών των τριγώνων 0120 και 0340 (Σχ. 3.32δ). Μέσα στη ζώνη ρωγμών όμως τα πράγματα είναι λίγο πιο περίπλοκα γιατί πρέπει να λάβουμε υπόψη και την ενέργεια του λυγισμού. Έχει βρεθεί, (Bazant and Cedolin, 1991), ότι η τάση στον άξονα των τμημάτων του υλικού ανάμεσα στις ρωγμές (microslabs) κατόπιν λυγισμού για τη κρίσιμη τάση ανταποκρίνεται στην ευθεία 35 του διαγράμματος του σχήματος 3.32ε. Επειδή το υλικό παραμένει ελαστικό κατά το λυγισμό, η διαφορά των εμβαδών 0120 και 03560 αποτελεί την ενέργεια που απελευθερώθηκε.

Ομοίως και εδώ, όπως και στον εφελκυσμό, όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο περισσότερη θα είναι και η ενέργεια που θα απελευθερωθεί. Επομένως θα έχουμε φαινόμενα κλίμακας και στην θλιπτική αστοχία.

Η ενέργεια από τις γραμμοσκιασμένες περιοχές εκφράζεται από τη σχέση 3.20.

$$\Delta \bar{U}_r = \frac{\sigma_0^2(x)}{2E} - \frac{\sigma_{cr}^2}{2E} \quad (3.20)$$

Η ενέργεια από τη ζώνη ρωγμών περιγράφεται από τη σχέση 3.21.

$$\Delta \bar{U}_c = \frac{\sigma_0^2(x)}{2E} - \left[\sigma_{cr} \varepsilon_c(x) - \frac{\sigma_{cr}^2}{2E} \right] \quad (3.21)$$

Επομένως η συνολική απώλεια ενέργειας είναι:

$$\Delta U = - \int_0^a \left(\frac{\sigma_0^2(x)}{2E} - \frac{\sigma_{cr}^2}{2E} \right) 2k(a-x) dx - \int_0^a \left\{ \frac{\sigma_0^2(x)}{2E} - \left[\sigma_{cr} \varepsilon_c(x) - \frac{\sigma_{cr}^2}{2E} \right] \right\} h dx \quad (3.22)$$

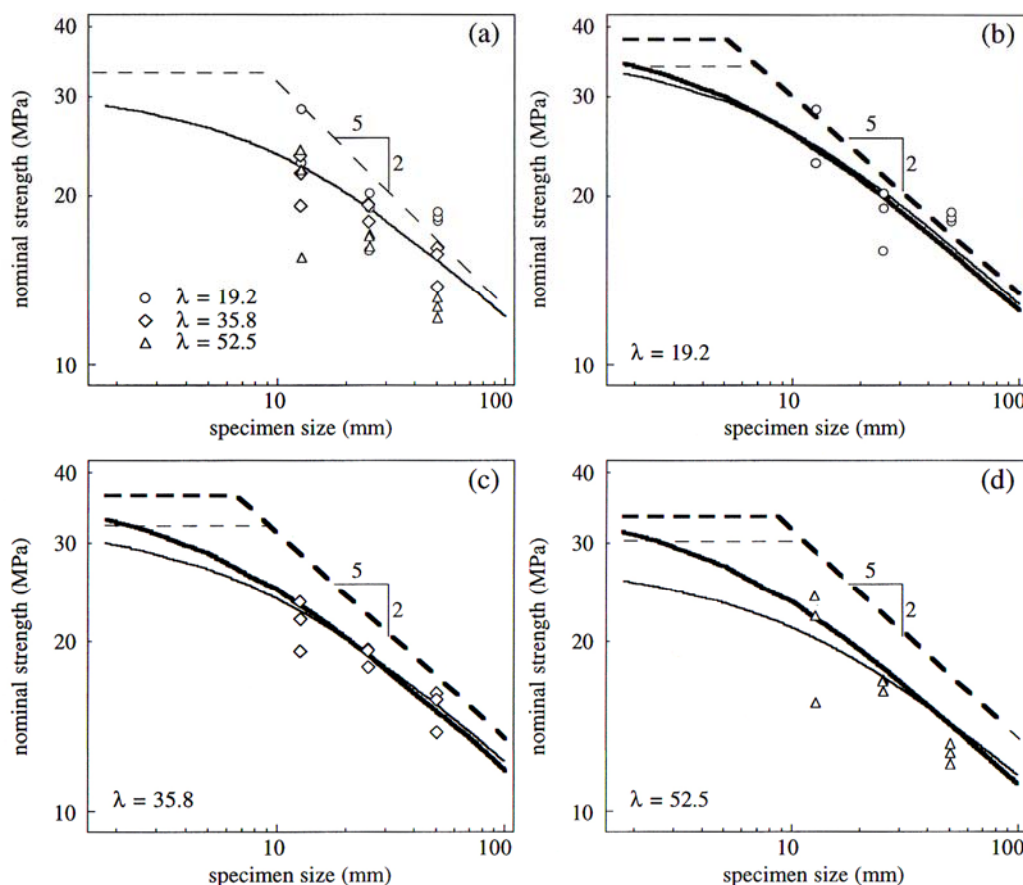
Ο ρυθμός της ενεργειακής απώλειας ισούται με το ρυθμό της ενεργειακής κατανάλωσης για το σχηματισμό των ρωγμών. Επομένως με την βοήθεια του κριτηρίου της ενεργειακής ισορροπίας της θραυστομηχανικής προκύπτει η εξίσωση 3.23.

$$- \left[\frac{\partial \Delta U}{\partial a} \right]_{\theta, u} = \frac{\partial}{\partial a} \left(G_f h \frac{a}{s} \right) = G_f \frac{h}{s}, \quad (3.23)$$

όπου G_f είναι η ενέργεια θραύσης των αξονικών μικρορωγμών και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού. Από την παραπάνω εξίσωση και μέσω απλοποιήσεων προκύπτει το συμπέρασμα ότι προβλέπονται φαινόμενα κλίμακας. Κατά Bazant, στα μικρά δοκίμια δεν αναμένονται φαινόμενα κλίμακας κυρίως λόγω του διαφορετικού μηχανισμού καθολικής αστοχίας (Σχ. 3.31c). Πιο αναλυτική μαθηματική περιγραφή μπορεί κανείς να βρει στη δημοσίευση Bazant και Xiang (1997).

3.16.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Bazant and Kwon (1994) επιβεβαιώνουν την ύπαρξη φαινομένων κλίμακας στη μονοαξονική θλίψη οπλισμένων υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής διαφορετικών διαστάσεων.



Σχ.3.33 Τα αποτελέσματα των πειραμάτων Bazant and Kwon (1994)

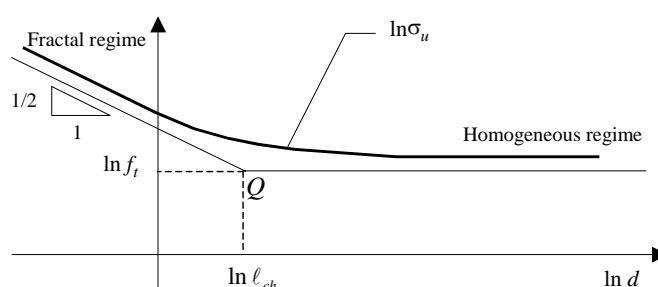
Τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών προσέγγισαν αρκετά καλά μια μαθηματική έκφραση για τα φαινόμενα κλίμακας που αναπτύχθηκε ειδικά για την περίπτωση. Επίσης πλήθος ερευνητών έχουν επιβεβαιώσει την καλή προσαρμογή του νόμου των φαινομένων κλίμακας του Bazant με πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης.

3.17 Η άποψη του Carpinteri

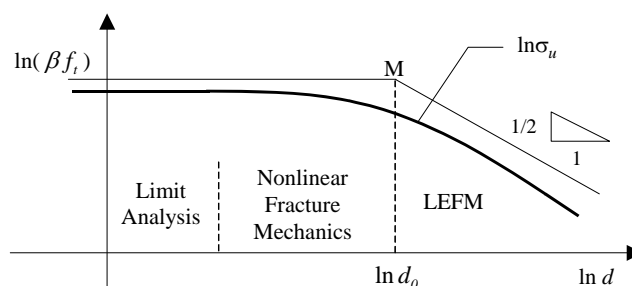
Οι απόψεις του Bazant για τα φαινόμενα κλίμακας δεν είναι αποδεκτές από όλους. Μάλιστα μερικοί έχουν προτείνει διαφοροποιήσεις προκειμένου να εξηγηθούν καλύτερα τα παρατηρούμενα πειραματικά αποτελέσματα. Ένα από αυτά τα προσομοιώματα περιγράφεται με τον πολυφρακταλικό νόμο κλίμακας του Carpinteri (Multifractal scaling law, MFSL).

Για πολύ μεγάλα μεγέθη δοκιμίων, η ονομαστική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται να σταθεροποιεί γύρω από μια σταθερή τιμή, ενώ στα μικρότερα μεγέθη η αντοχή αυξάνεται με την μείωση της κλίμακας. Αυτό είναι γενικά αποδεκτό και εξηγείται μερικά από τις προσεγγίσεις των Weibull και Griffith. Από την άλλη μεριά μόνο με την εξέταση δοκιμίων που καλύπτουν μεγάλο εύρος κλίμακας μπορεί να παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο. Οι πειραματικές έρευνες συνήθως καλύπτουν μόνο μία τάξη μεγέθους δοκιμίων. Στις περιπτώσεις αυτές στο διλογαριθμικό διάγραμμα παρατηρείται συνήθως εφαπτομενική κλίση $-1/2$. Εάν επιλέγονταν το εύρος κλίμακας των δοκιμίων ώστε να κάλυπτε παραπάνω από μία τάξη μεγέθους θα προέκυπτε ότι η εφαπτομενική κλίση στο διλογαριθμικό διάγραμμα θα μεταβαλλόταν σταδιακά από $-1/2$ (για μικρά δοκίμια) σε 0 (για μεγάλα δοκίμια).

Στην πραγματικότητα, οι σύνδεσμοι της ύλης στο μέγιστο φορτίο μπορούν να θεωρηθούν ως πολυφρακταλικά στοιχεία, με διαστάσεις < 2 σε μικρές κλίμακες και 2 σε μεγάλες κλίμακες. Αυτό σημαίνει ότι για τις μικρές κλίμακες η κατανομή των ρωγμών τύπου Griffith είναι γενική (έντονη αταξία ρωγμής) ενώ για μεγαλύτερα μεγέθη η αταξία αυτή δεν είναι φανερή αφού οι ετερογενείς ανωμαλίες είναι περιορισμένες. Η μεταβολή από την αταξία στην τάξη είναι φανερή στη διλογαριθμική κλίμακα από την μεταβολή της κλίσης του διαγράμματος από $-1/2$ σε μηδέν.



Σχ.3.34 Το διάγραμμα στην διλογαριθμική κλίμακα κατά Carpinteri (MFSL).

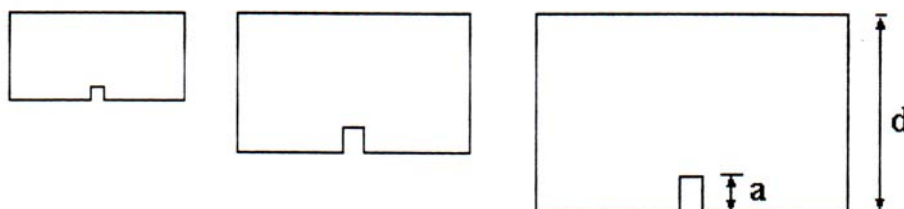


Σχ.3.35 Το διάγραμμα στην διλογαριθμική κλίμακα κατά Bazant (SEL).

Η κλίση ίση με $-1/2$ επομένως, μπορεί να μη θεωρηθεί ως γενική συμπεριφορά για το υπόλοιπο εύρος μεγεθών δοκιμών χωρίς εγκοπή. Εξάλλου ο νόμος των φαινομένων κλίμακας (SEL) του Bazant αναπτύχθηκε από αποτελέσματα δοκιμών με εγκοπές όπου οι εγκοπές ήσαν συγκρίσιμες με το μέγεθος του δοκιμίου. Γενικότερα για ορισμένες κατηγορίες δοκιμών, όπως είναι η Βραζιλιάνικη ήδη έχει φανεί η ανεπάρκεια του νόμου SEL του Bazant. Η υπόθεση της πολυφρακταλικότητας της θραυσμένης μικροδομής της ύλης αποτελεί τη βάση για το νόμο MFSL του Carpinteri. Ο νόμος προτείνει τη στροφή των κοίλων της εξίσωσης προς τα άνω στο διάγραμμα της διλογαριθμικής κλίμακας σε αντίθεση με το νόμο SEL του Bazant. Ο νόμος αυτός περιγράφει καλύτερα πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με το νόμο MFSL, η ονομαστική αντοχή τείνει στο άπειρο για μεγέθη που τείνουν στο μηδέν (π.χ. οι ίνες γυαλιού του Griffith), ενώ τείνει σε χαμηλή σταθερή τιμή για μεγέθη που τείνουν στο άπειρο (π.χ. τα πλοία τύπου Liberty).

3.18 Διορθώσεις στον νόμο SEL του Bazant

Πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων δείχνουν ότι ακόμα και τα μεγαλύτερα στοιχεία χωρίς αρχική ρωγμή αντιστέκονται σε ορισμένο ύψος τάσης, σε αντίθεση με τις προβλέψεις του νόμου των φαινομένων κλίμακας του Bazant (SEL). Στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν υπάρξει θεωρητικές ερμηνείες για την ανεπάρκεια του νόμου SEL βασισμένες σε πειραματικά δεδομένα. Οι Bruhwiler et al. (1991) υποστήριξαν ότι η επίδραση του d_{max} στη συμπεριφορά του σκυροδέματος δεν συμφωνεί με τα προβλεπόμενα του SEL. Οι Tang et al. (1992) έδειξαν επίσης τις αδυναμίες του νόμου SEL. Ο νόμος του Bazant προέκυψε από τη τασική κατανομή σε δοκίμια με αρχική εγκοπή. Η εγκοπή αυτή μάλιστα είχε διαστάσεις συγκρίσιμες με τις διαστάσεις των δοκιμών. Όταν ο νόμος εφαρμόζονταν σε δοκίμια χωρίς εγκοπή ή αρχική ρωγμή, η αρχική υπόθεση πάνω στην οποία στηρίζονταν δεν ίσχυε πια. Το δοκίμιο χωρίς εγκοπή παρουσίαζε αταξία επειδή το χαρακτηριστικό μέγεθος a της ανωμαλίας που προκαλούσε την έναρξη της ρηγμάτωσης ήταν ανεξάρτητο της κλίμακας του δοκιμίου.



Σχ.3.36 a/d =σταθερό, η υπόθεση του Bazant.

Σύμφωνα με τον Bazant ο νόμος SEL:

$$\sigma_N = \frac{\beta f_t}{\left(1 + \frac{d}{\lambda_0 d_{\max}}\right)^{1/2}} \quad (3.24)$$

όπου:

σ_N = ονομαστική εφελκυστική αντοχή

d = χαρακτηριστικό μέγεθος δοκιμίου

f_t = παράμετρος αντοχής (μπορεί να είναι η άμεση εφελκυστική αντοχή)

β, λ_0 = δύο εμπειρικές σταθερές που προκύπτουν από την προσαρμογή του νόμου στα πειραματικά αποτελέσματα.

d_{\max} = μέγιστο μέγεθος αδρανών

Οι Kim et al. πρότειναν τη διόρθωση του παραπάνω νόμου ώστε να λαμβάνεται υπόψη το χαρακτηριστικό μέγεθος a της ανωμαλίας που προκαλεί τη ρηγμάτωση. Προτάθηκε η σύνδεση της παραμέτρου λ_0 με μια μονοτονικά μειούμενη συνάρτηση του a/d .

$$\sigma_N = \frac{\beta f_t}{\left(1 + \frac{d}{f(a/d)d_{\max}}\right)^{1/2}} \quad (3.25)$$

Είναι πολύ δύσκολο όμως να βρεθεί ακριβώς η συνάρτηση $f(a/d)$. Επομένως, ένας εμπειρικός νόμος φαινομένων κλίμακας προτάθηκε από τους Kim and Eo (1990) και τους Bazant et al. (1991) προκειμένου να ανταποκριθεί ο νόμος στα πειραματικά δεδομένα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη.

$$\sigma_N = \frac{\beta f_t}{\left(1 + \frac{d}{\lambda_0 d_{\max}}\right)^{1/2}} + \sigma_0 \quad (3.26)$$

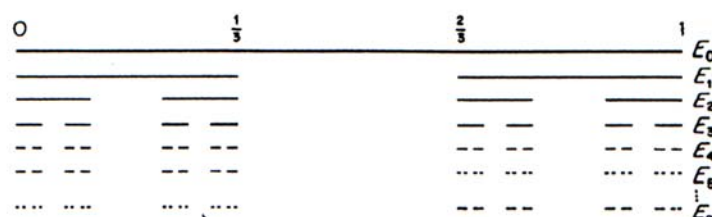
Από την εξίσωση 3.26 προκύπτει μία πιο ρεαλιστική μη μηδενική ασυμπτωτική που αντιστοιχεί στα μεγέθη που τείνουν στο άπειρο.

3.19 Ο πολυφρακταλικός νόμος κλίμακας (MFSL) του Carpinteri

Η φρακταλική θεωρία (fractal theory) δέχεται ότι η ύλη δεν χαρακτηρίζεται από μία ομοιόμορφη συνέχεια. Αντίθετα μάλιστα, χαρακτηρίζεται από πλήθος μικροσκοπικών δεσμών που εξασφαλίζουν τη μακροσκοπικά παρατηρούμενη συνέχεια. Μεταξύ των δύο πλευρών μιας νοητής επιφάνειας μέσα στην μάζα ενός στερεού στοιχείου, η ύλη συνδέεται μέσω σημειακών δεσμών και όχι ομοιόμορφα σε όλη την

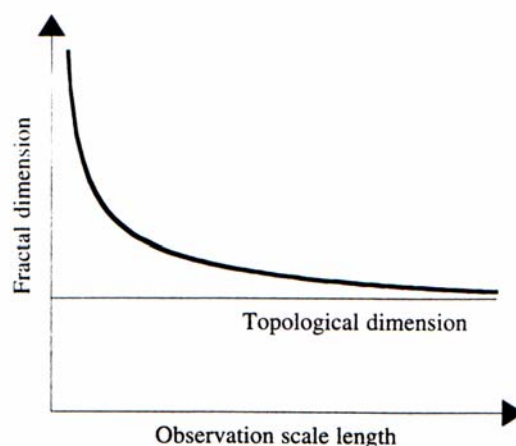
επιφάνεια. Επομένως κατά την επέκταση ρωγμής στην επιφάνεια αυτή μόνο οι σύνδεσμοι μεταξύ των δύο πλευρών της επιφάνειας αντιστέκονται. Από ασυνέχεια όμως χαρακτηρίζονται και οι σύνδεσμοι.

Έστω ότι ο μικροσκοπικός σύνδεσμος ενός υλικού σε αταξία που βρίσκεται υπό την μέγιστη τάση μπορεί να αντιπροσωπευθεί από φρακταλικό χώρο διάστασης $a = 2-d_\sigma$, όπου $1 < a < 2$ και επομένως $0 < d_\sigma < 1$. Η διαστασιακή μείωση d_σ οφείλεται στην ύπαρξη ρωγμών και κενών της διατομής. Ένα τυπικό φρακταλικό σετ (the middle-third Cantor set) φαίνεται στο σχήμα 3.37. Η φρακταλική διάσταση του σετ είναι 0.631.



Σχ.3.37 Το φρακταλικό σετ του Cantor (The middle third Cantor set)

Στις φυσικές φρακταλικές καταστάσεις είναι καλύτερα να ασχολούμαστε με τη συνεχή διαφοροποίηση της φρακταλικής διάστασης σε σχέση με το παρατηρούμενο μέγεθος (γεωμετρική πολυφρακταλικότητα) παρά με τις δύο ακραίες τιμές της φρακταλικής διάστασης. Η επίδραση της ύπαρξης αταξίας στην μικρο-δομή στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών γίνεται σταδιακά λιγότερο σημαντική σε μεγαλύτερες κλίμακες, ενώ αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα σε μικρές κλίμακες.



Σχ.3.38 Γεωμετρική πολυφρακταλικότητα

Η αναλυτική έκφραση του πολυφρακταλικού νόμου κλίμακας MFSL του Carpinteri είναι:

$$\sigma_N = \left(A + \frac{B}{d} \right)^{1/2}, \quad (3.27)$$

όπου:

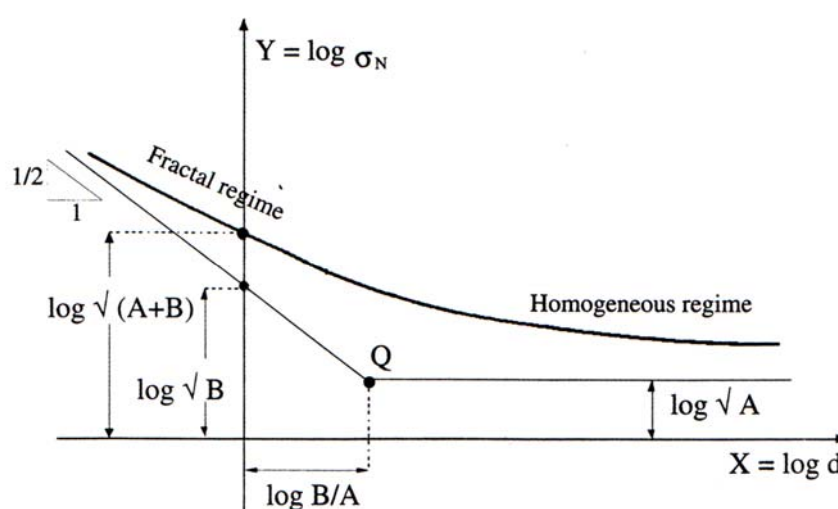
σ_N = ονομαστική εφελκυστική αντοχή

d = χαρακτηριστικό μέγεθος δοκιμίου

$A = [[F][L]^{-2}]^2$, αντιστοιχεί στις φυσικές διαστάσεις του τετραγώνου της τάσης

$B = [[F][L]^{-3/2}]^2$, αντιστοιχεί στις φυσικές διαστάσεις του τετραγώνου του συντελεστή της τασικής έντασης (stress intensity factor).

Οι δύο σταθερές υπολογίζονται με τη μη γραμμική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, όπως η μέθοδος Levenberg – Marquardt, προκειμένου να προσεγγιστούν τα δεδομένα από τον νόμο όσο καλύτερα γίνεται.



Σχ.3.39 Γραφική παράσταση του νόμου MFSL σε διλογαριθμική κλίμακα.

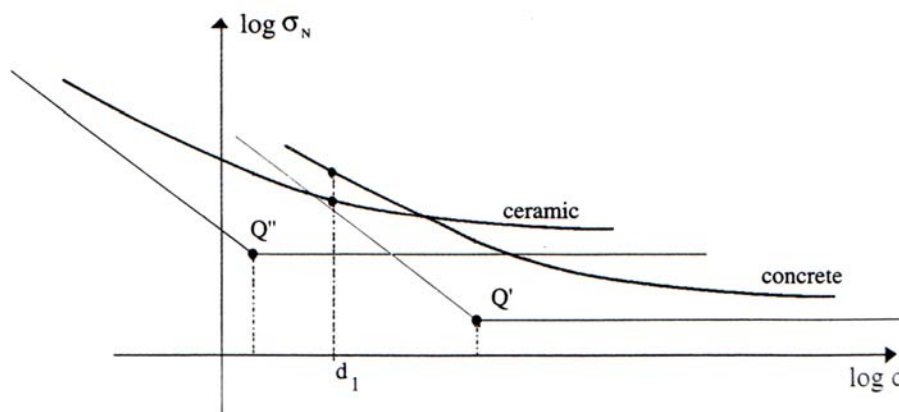
Το σημείο τομής Q των δύο ασυμπτωτών έχει οριζόντια συντεταγμένη:

$$X_Q = \log \frac{B}{A}, \quad (3.28)$$

όπου ποσότητα B/A έχει διαστάσεις μήκους. Το σημείο Q χωρίζει τη φρακταλική περιοχή από την ομογενή περιοχή. Είναι δυνατό να συνδεθεί η ποσότητα αυτή με το χαρακτηριστικό μήκος της μικροκατασκευής, l_{ch} , που στην περίπτωση του σκυροδέματος συνδέεται με το μέγεθος του μέγιστου κόκκου των αδρανών d_{max} .

$$l_{ch} = \frac{B}{A} = ad_{max} \quad (3.29)$$

Σημειώνεται ότι, για κεραμικά, πετρώματα και άλλα υλικά που αποτελούνται από πιο λεπτά βασικά στοιχεία το σημείο τομής θα βρίσκεται πιο αριστερά από ότι στο σκυροδέμα (Σχ. 3.40).

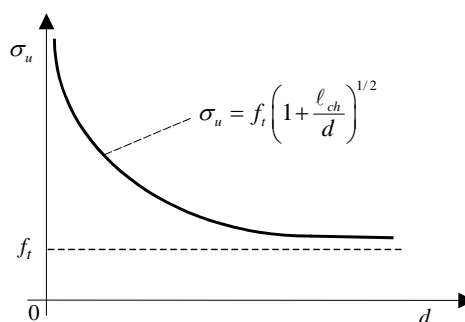


Σχ.3.40 Γραφικές παραστάσεις του νόμου MFSL για διάφορα υλικά σε διλογαριθμική κλίμακα.

Ο πολυφρακταλικός νόμος κλίμακας του Carpinteri (MFSL) μπορεί να γραφεί:

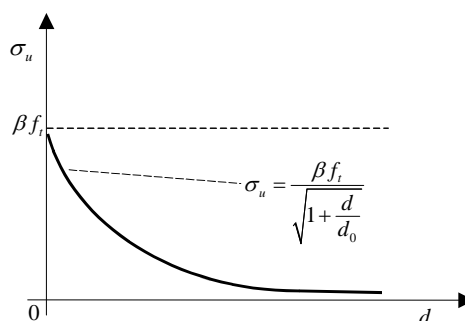
$$\sigma_u = f_t \left(1 + \frac{\ell_{ch}}{d} \right)^{1/2} \quad (3.30)$$

και η γραφική παράσταση του νόμου σε γραμμική κλίμακα παρουσιάζεται στο Σχ. 3.41.



Σχ.3.41 Γραφική παράσταση του νόμου MFSL

Η ανάλογη γραφική παράσταση του νόμου των φαινομένων κλίμακας του Bazant (SEL, σχέση 3.24) φαίνεται στο Σχ. 3.42.



Σχ.3.42 Γραφική παράσταση του νόμου SEL

Η γραμμική μορφή του νόμου MFSL έχει νόημα μόνο σε σύστημα συντεταγμένων X^* και Y^* .

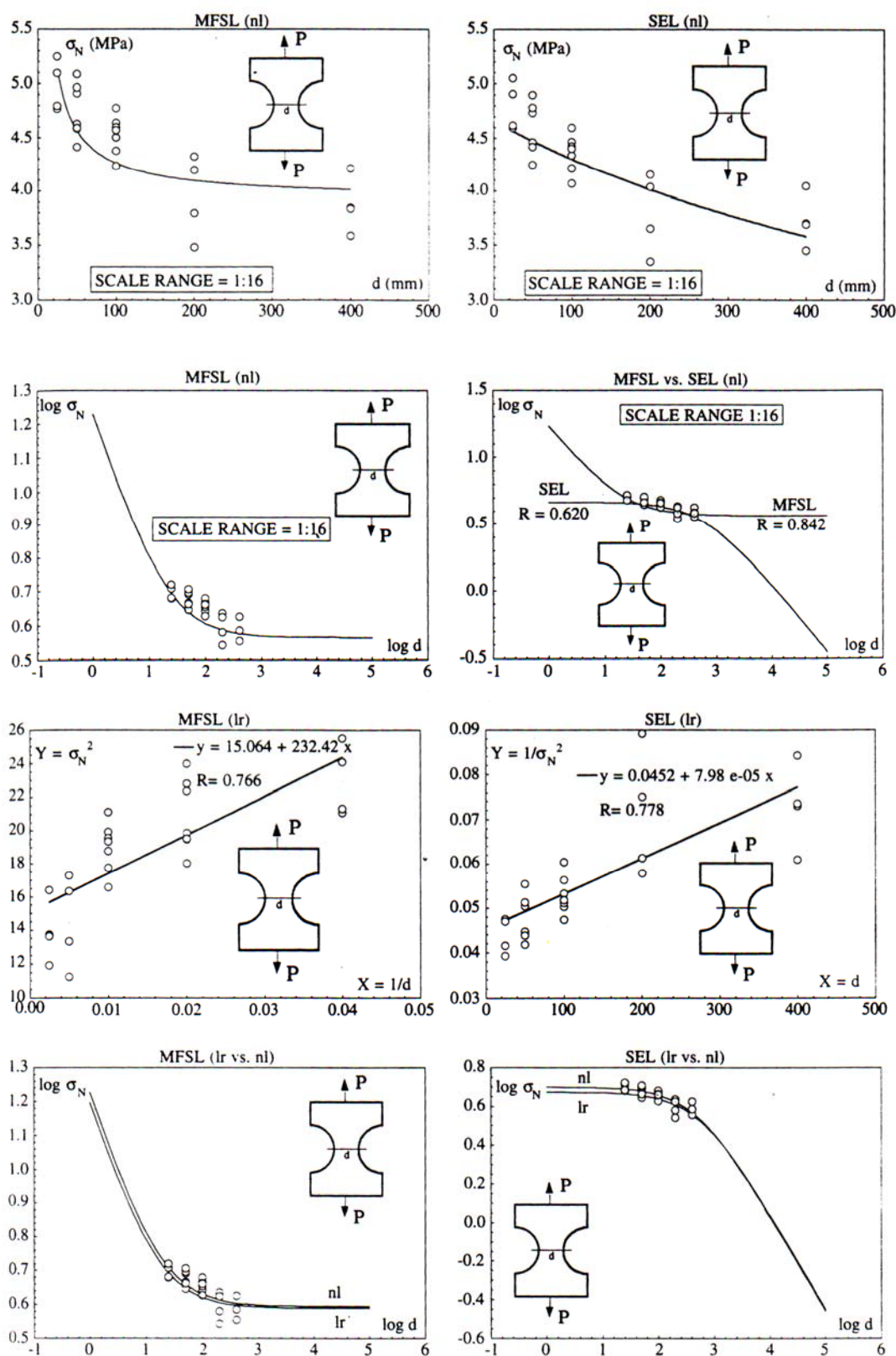
Από την μη γραμμική μορφή $\sigma_N = \left(A + \frac{B}{d} \right)^{1/2}$ μπορεί να γραφεί

$Y^* = A + BX^*$, όπου A και B αντιπροσωπεύουν τους ίδιους συντελεστές με την μη-γραμμική μορφή. Ο νόμος του Bazant έχει γραμμική μορφή πάνω σε σύστημα αξόνων \bar{X} και \bar{Y} . Προκειμένου ο νόμος MFSL του Carpinteri να εκφραστεί με βάση τους ίδιους άξονες γράφεται: $\bar{Y} = C + D\bar{X}$. Όπου $C = B/A^2$ και $D = 1/A^2$. Η προσαρμογή του νόμου γίνεται ως προς τις πειραματικές μετρήσεις που εδώ εκφράζονται με βάση το σύστημα συντεταγμένων \bar{X} και \bar{Y} .

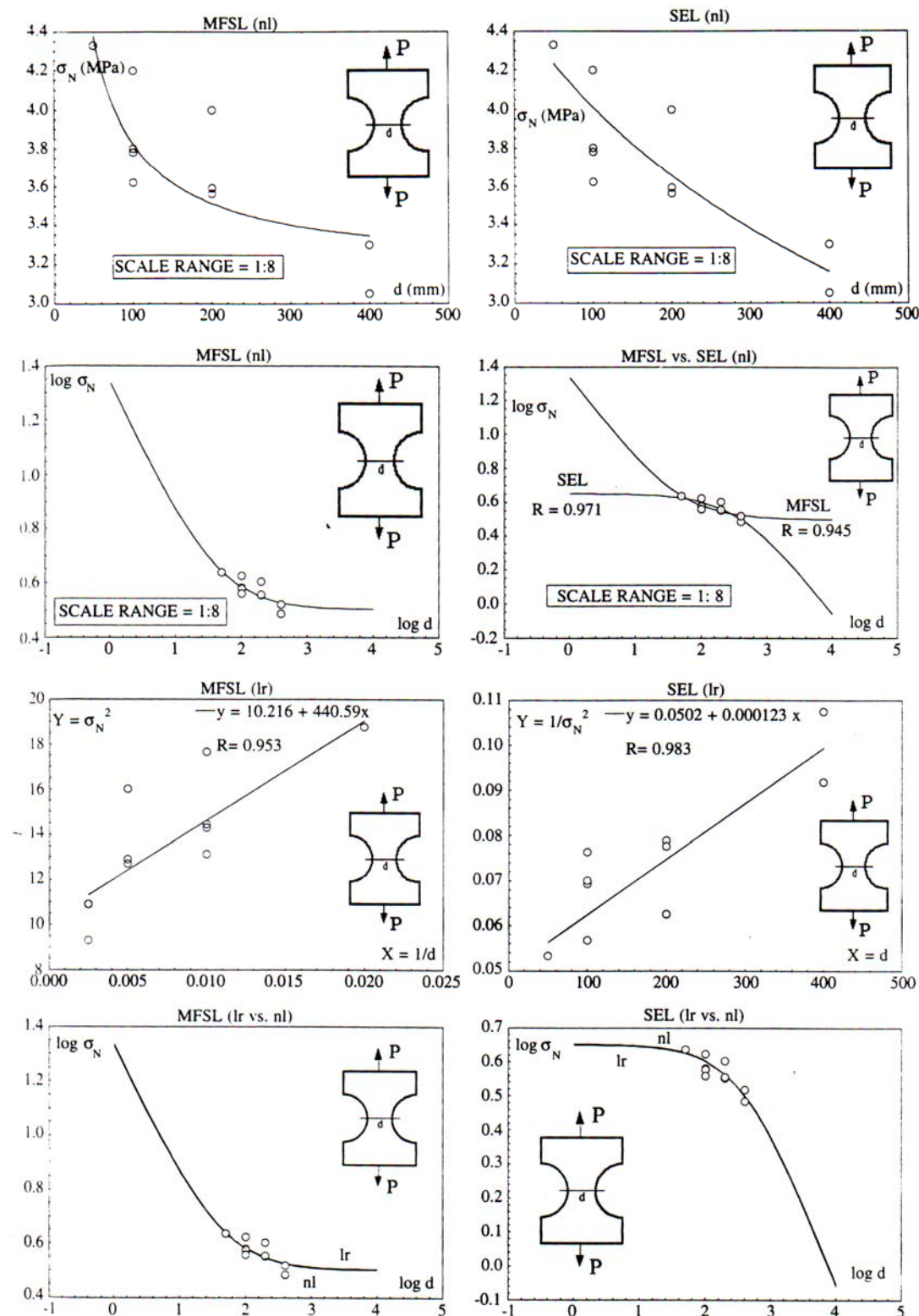
Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο 3.20 παρουσιάζεται η προσαρμογή των δύο νόμων SEL και MFSL στα πειραματικά δεδομένα ορισμένων μελετών. Οι συγκρίσεις γίνονται μεταξύ της γραμμικής μορφής (lr - linear) και της μη-γραμμικής μορφής (nl - Nonlinear) των δύο νόμων (SEL και MFSL).

3.20 Πειραματικά αποτελέσματα και σύγκριση των δύο νόμων.

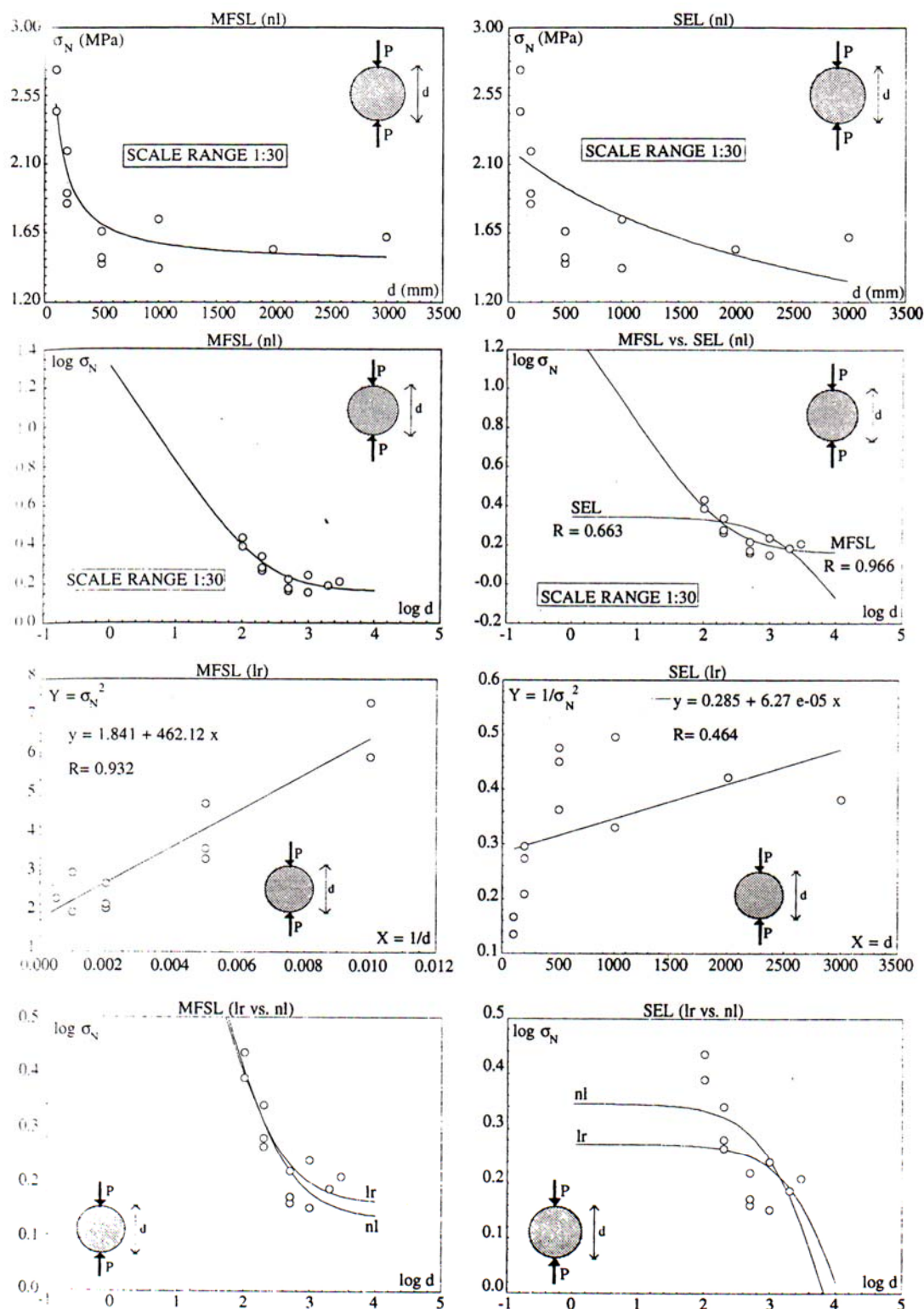
Carpinteri and Ferro (εύρος κλίμακας = 1:16)



Σχ.3.43 Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των νόμων SEL και MFSL σε γραμμική (lr) και μη γραμμική (nl) μορφή

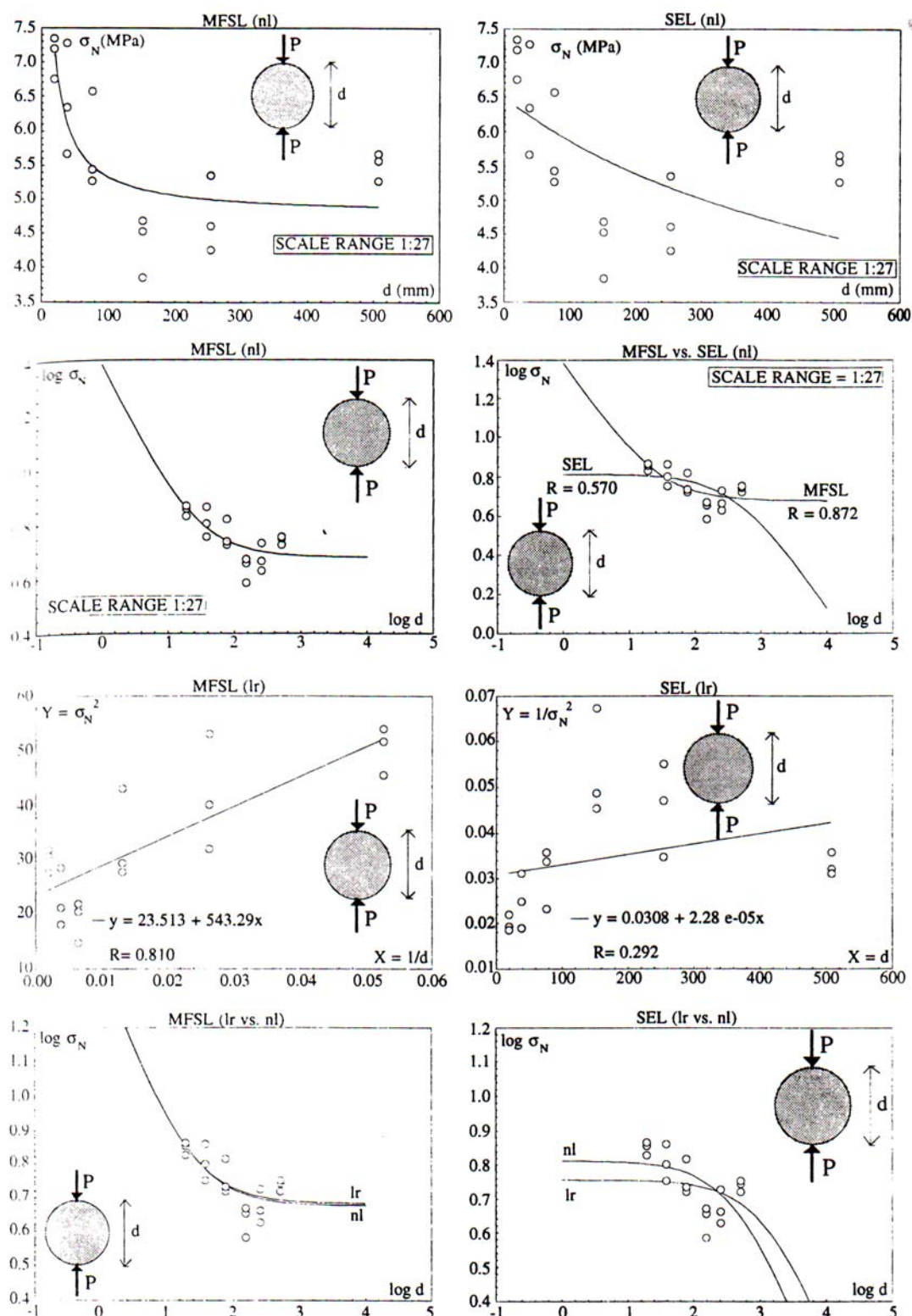
Carpinteri and Ferro (εύρος κλίμακας = 1:8)**Σχ.3.44** Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των νόμων SEL και MFSL σε γραμμική (lr) και μη γραμμική (nl) μορφή

Hasegawa, Shioya and Okada (1985) – Έμμεσος εφελκυσμός από διάρρηξη (εύρος κλίμακας 1:30)



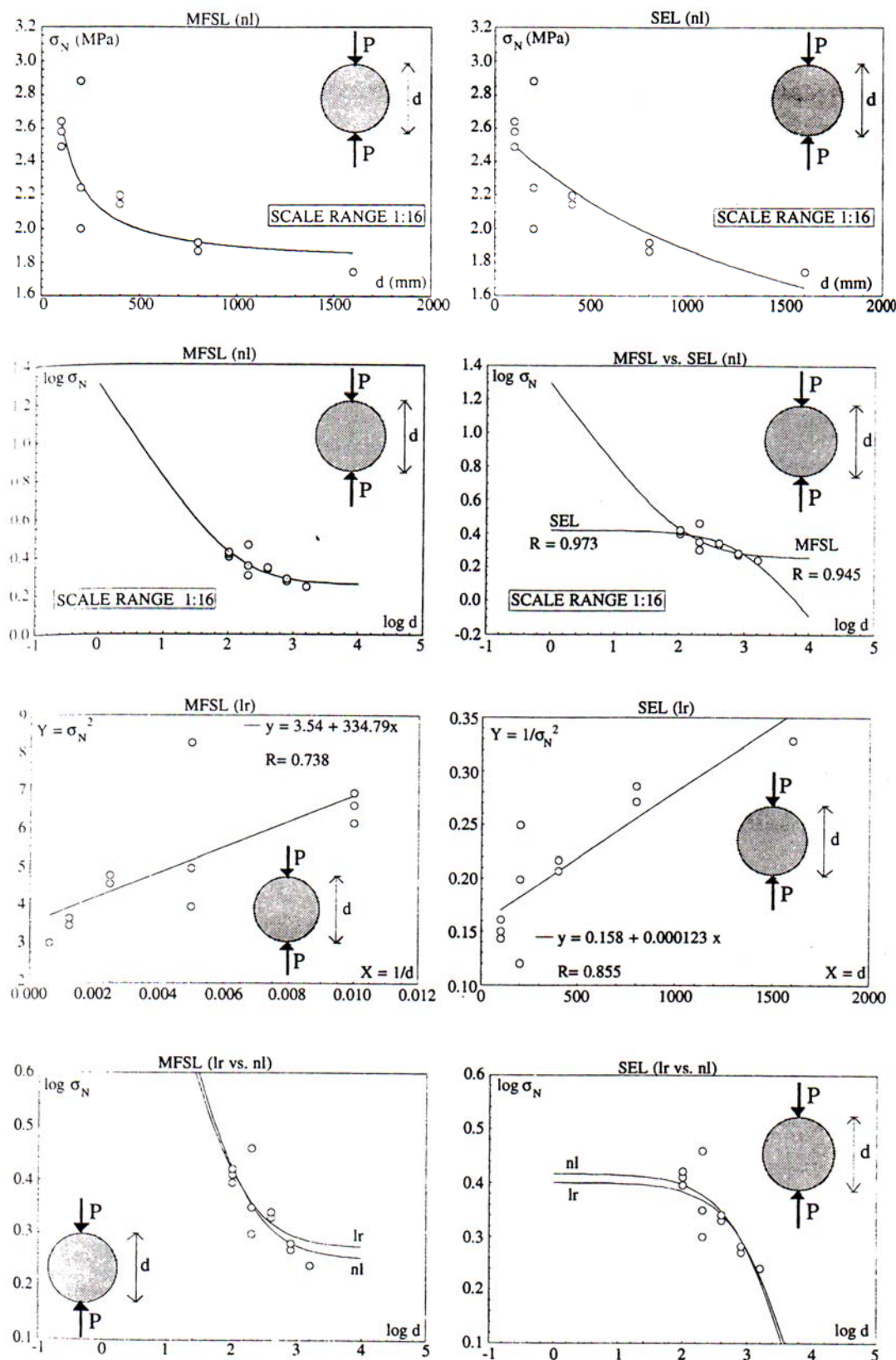
Σχ.3.45 Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των νόμων SEL και MFSL σε γραμμική (lr) και μη γραμμική (nl) μορφή

Bazant, Kazemi, Hasegawa and Mazars (1991) – Έμμεσος εφελκυσμός από διάρρηξη (εύρος κλίμακας 1:27)



Σχ.3.46 Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των νόμων SEL και MFSL σε γραμμική (lr) και μη γραμμική (nl) μορφή

Kim and Eo (1990) – Έμμεσος εφελκυσμός από διάρρηξη (εύρος κλίμακας 1:16)



Σχ.3.47 Συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των νόμων SEL και MFSL σε γραμμική (lr) και μη γραμμική (nl) μορφή

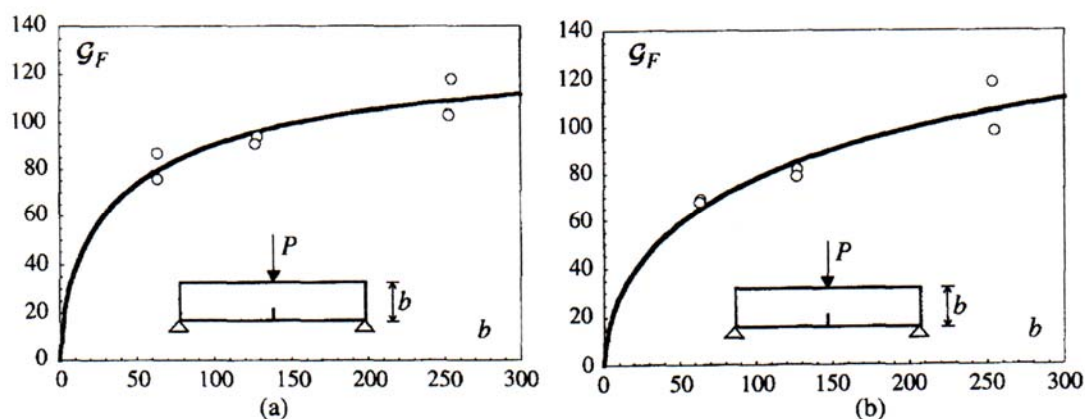
Perdikaris and Romeo (1995).

Κάμψη τριών σημείων (εύρος κλίμακας 1:4)
Δοκοί με εγκοπή στο μέσον του ανοίγματος

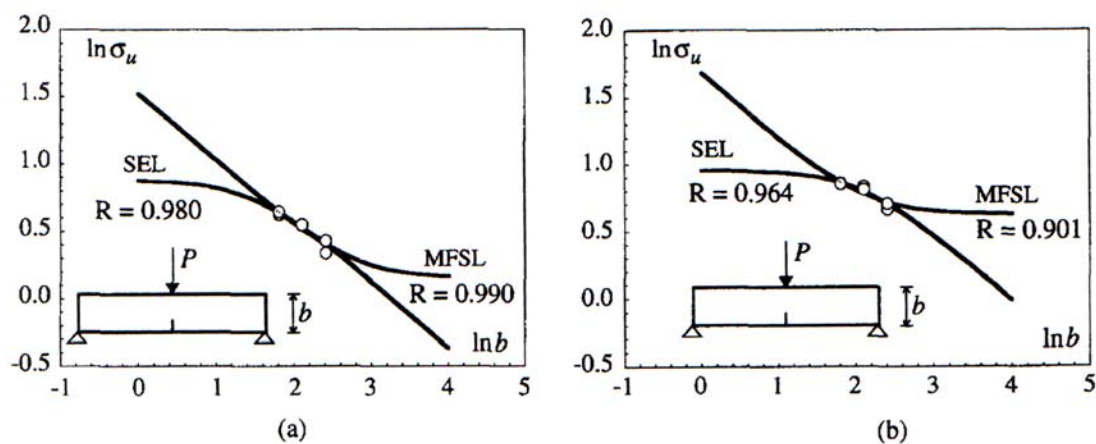
(a) Χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα

(b) Υψηλής αντοχής σκυρόδεμα

G_F : Ονομαστική ενέργεια θραύσης



Σχ.3.48 Εφαρμογή του νόμου MFSL στα αποτελέσματα της ενέργειας θραύσης Perdikaris and Romeo



Σχ.3.49 Συγκριτικά διαγράμματα SEL και MFSL Perdikaris and Romeo (1995)

Κεφάλαιο 4

Η πειραματική διαδικασία



Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε.

4.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στο εργαστήριο σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η πειραματική διαδικασία είχε ως σκοπό τη μελέτη των φαινομένων κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η βασική επιδίωξη της πειραματικής διαδικασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε τέσσερα διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων από σκυρόδεμα δύο διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων. Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατή η μελέτη της επίδρασης των φαινομένων κλίμακας στην αντοχή του σκυροδέματος όχι μόνο καθόσον αφορά τις διαστάσεις των δοκιμίων αλλά και ως προς το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανών του υλικού.

4.2 Εργαστήριο και εξοπλισμός

Το εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας περιλαμβάνει εξοπλισμό που καλύπτει τη τεχνολογία και συμπεριφορά του άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος. Το εργαστήριο βοηθάει αφενός στη διδασκαλία των σχετικών μαθημάτων, αφετέρου στο ερευνητικό έργο για την πειραματική μελέτη της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ), το σχεδιασμό κατασκευών Ο/Σ και τον έλεγχο επάρκειας και αποτίμησης της αντοχής υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ.

Το Εργαστήριο αποτελείται βασικά από τρεις εργαστηριακούς χώρους:

- (α) Τεχνολογίας Άοπλου Σκυροδέματος
- (β) Πειραματικών Μεθόδων και Δοκιμών Κατασκευών Ο/Σ
- (γ) Σταθμού Αυτόματων Συστημάτων Καταγραφής Μετρήσεων με Η/Υ.

Ο σταθμός των Η/Υ καλύπτει υπολογιστικές ανάγκες για την προσομοίωση και μελέτη της συμπεριφοράς κατασκευών Ο/Σ, αλλά και ανάγκες αυτόματου ελέγχου του ψηφιακού σερβοϋδραυλικού συστήματος δοκιμών.

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός για την Τεχνολογία Σκυροδέματος περιλαμβάνει «πρέσα» μονοαξονικής θλίψης 3000 kN, αναδευτήρα σκυροδέματος, κόσκινα αδρανών, χώρο ελεγχόμενης συντήρησης δοκιμίων σκυροδέματος, καθώς και διάφορα όργανα απαραίτητα για τον προσδιορισμό της ποιότητας και αντοχής του σκυροδέματος. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός για τις δοκιμές κατασκευών Ο/Σ περιλαμβάνει μεταλλικό πλαίσιο 3(πλ.) x 3(μκ.) x 4(ύψ.) m, ενεργοποιητή φορτίου MTS ± 250 kN ελεγχόμενο από ψηφιακό σερβοϋδραυλικό σύστημα λειτουργίας MTS 407, σύστημα υδραυλικής αντλίας ισχύος 40l

ρη και αυτόματο σύστημα καταγραφής μετρήσεων National Instruments.



Σχ.4.1 Η πρέσα θραύσεως μονοαξονικής θλίψεως 3000KN



Σχ.4.2 Αυτόματο σύστημα καταγραφής μετρήσεων

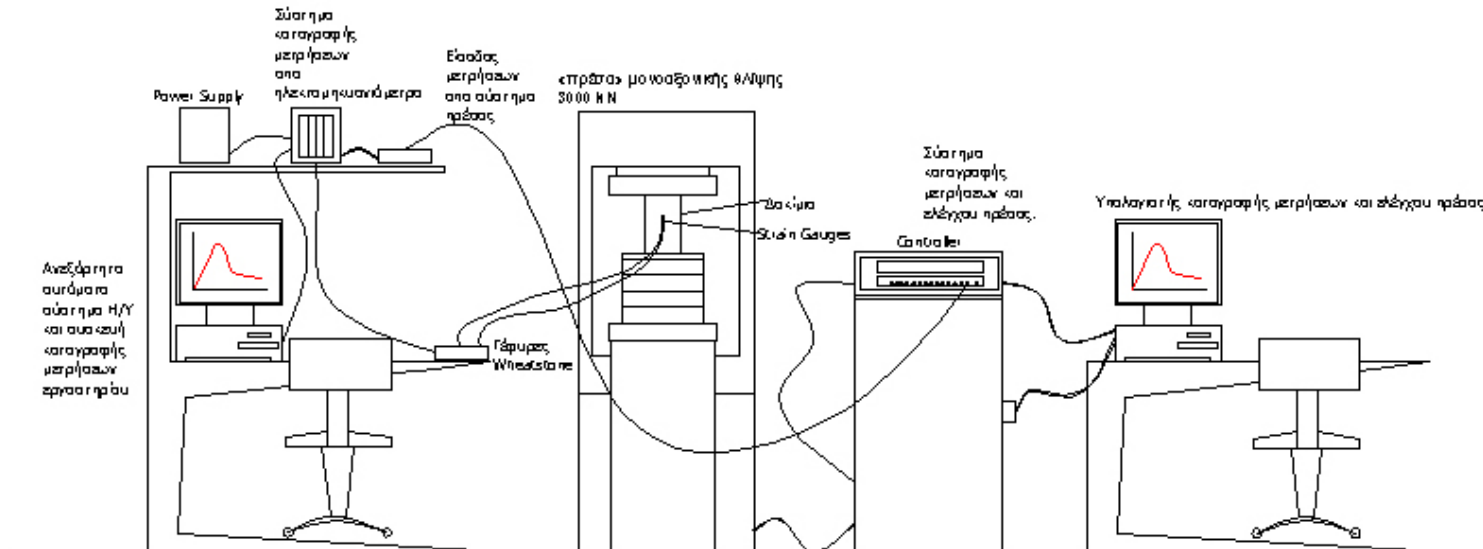


Σχ.4.3 Τα έμβολα της πρέσας DMG

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η πρέσα DMG μονοαξονικής θλίψεως 3000 kN. Τα συγκεκριμένο μηχάνημα συνοδεύεται από υπολογιστή και αυτόματο σύστημα ελέγχου και καταγραφής μετρήσεων. Για την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ζεύξη αυτού του συστήματος της πρέσας με τον ανεξάρτητο σταθμό

συστήματος καταγραφής μετρήσεων του εργαστηρίου για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά τη φόρτισή τους. Έτσι, για κάθε πείραμα προέκυψε λεπτομερής καταγραφή μετρήσεων για τη συνολική παραμόρφωση, την ανηγμένη παραμόρφωση και το φορτίο σε κάθε χρονική στιγμή.

Το αναλυτικό σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου παρουσιάζεται στο Σχ.4.4.



Σχ.4.4 Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου

Για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δυο υπολογιστές. Ο μηχανικός έλεγχος της πρέσας επιτυγχάνονταν μέσω ενός ειδικού προγράμματος ελέγχου στον έναν υπολογιστή. Αυτός ο υπολογιστής κατέγραφε και τις ενδείξεις φορτίου (Load) και μετακίνησης εμβόλου (Stroke) όπως προέκυπταν από ειδικούς αισθητήρες που διέθετε η πρέσα. Ο άλλος υπολογιστής κατέγραφε τις ανηγμένες παραμορφώσεις των δοκιμίων που μετέδιδαν τα ηλεκτομηχανισιόμετρα. Παράλληλα με τις ανηγμένες παραμορφώσεις καταγράφονταν επίσης οι μετρήσεις του επιβαλλόμενου φορτίου και της αντίστοιχης μετακίνησης του εμβόλου της μηχανής.

4.3 Πειραματικές μέθοδοι

Ο σκοπός των πειραμάτων αυτών ήταν η διερεύνηση των φαινομένων κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος που επιλέχθηκαν για να μελετηθούν και να εξακριβωθεί η σχέση τους με τα φαινόμενα κλίμακας είναι η εφελκυστική και η θλιπτική αντοχή. Για την πειραματική διερεύνηση των αντοχών αυτών χρησιμοποιήθηκαν δυο μέθοδοι γνωστοί για την απλότητα τους. Οι μέθοδοι αυτοί είναι:

- Θλιπτικός έλεγχος κυλινδρικών δοκιμίων με επιβολή μονοαξονικού θλιπτικού φορτίου
- Έμμεσος εφελκυστικός έλεγχος από διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων.

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι εξαιρετικά απλοί στην πράξη. Πραγματοποιούνται μέσω της χρήσης του ίδιου μηχανήματος που στην περίπτωση αυτή είναι μια «πρέσα» θραύση μονοαξονικής θλίψης 3000 kN. Αναλυτική περιγραφή των παραπάνω μεθόδων πειραματικής διερεύνησης της αντοχής σκυροδέματος αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.3.

4.4 Τα δοκίμια

Τα δοκίμια ορίστηκαν από την αρχή να είναι κυλινδρικής διατομής. Ο μεγάλος αριθμός κυλινδρικών πλαστικών καλούπιας διαφορετικών μεγεθών που διαθέτει το εργαστήριο του τμήματος βοήθησε στην κατεύθυνση αυτή. Τα κυλινδρικά δοκίμια ανεξάρτητα από τις διαστάσεις τους, διατηρούν σταθερό τον λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2, όπως διεθνώς έχει γίνει αποδεκτό για πειράματα τέτοιου είδους.



Σχ.4.5 Τα πλαστικά κυλινδρικά καλούπια

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων. Τα μεγέθη των δοκιμίων ήταν τα εξής:

- Κύλινδρος $H=12$ in. (30.48 cm) , $D=6$ in. (15.24 cm)
- Κύλινδρος $H=8$ in. (20.32 cm), $D=4$ in.(10.16 cm)
- Κύλινδρος $H=6$ in. (15.24 cm), $D=3$ in. (7.62 cm)
- Κύλινδρος $H=4$ in. (10.16 cm), $D=2$ in. (5.08 cm)

όπου H είναι το ύψος και D η διάμετρος της διατομής των δοκιμίων.



Σχ.4.6 Τα τέσσερα μεγέθη κυλινδρικών καλουπιών

Για στατιστικούς λόγους ο αριθμός των δοκιμίων ανά κοκκομετρική διαβάθμιση και μέγεθος καθορίστηκε να είναι έντεκα (11). Από τα έντεκα αυτά δοκίμια τα επτά (7) χρησιμοποιήθηκαν για τη θλιπτική διερεύνηση και τα τέσσερα (4) για την εφελκυστική αντοχή. Για λόγους ασφαλείας κατασκευάστηκαν δεκατρία (13) δοκίμια ανά κοκκομετρική διαβάθμιση και μέγεθος. Τα πρόσθετα δοκίμια θα χρησιμοποιούνταν στην περίπτωση που κάποιο από τα άλλα προέκυπτε προβληματικό.

4.5 Αναλογία συστατικών σκυροδέματος.

Από την αρχή του πειραματικού σχεδιασμού καθορίστηκε ότι το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι σχετικά υψηλής αντοχής. Έτσι ορίστηκε ένας στόχος ονομαστικής θλιπτικής αντοχής 40 MPa. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η αντοχή επιλέχτηκε η αναλογία των 450 Kg τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος με χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο. Η τελική αναλογία των συστατικών του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν (Τσιμέντο : αδρανή : άμμο : νερό) 1:2:1:0.4.

Η επιβεβαίωση των παραπάνω προβλέψεων πριν από την σκυροδέτηση των τελικών δοκιμίων κρίθηκε επιτακτική. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η παρασκευή δοκιμαστικών δοκιμίων προς επιβεβαίωση των αναμενόμενων αντοχών. Στις 17 Νοεμβρίου 2003 σκυροδετήθηκαν έξι κυβικά δοκίμια 15cm x 15cm x 15cm χρησιμοποιώντας τις παραπάνω αναλογίες μίγματος. Λόγω του χαμηλού λόγου νερού προς τσιμέντο, η εργασιμότητα του μίγματος κρίθηκε μη ικανοποιητική. Αυτό

αντιμετωπίστηκε με την προσθήκη ειδικού χημικού ρευστοποιητικού (Super-plasticizer). Έτσι αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της εργασιμότητας χωρίς αλλαγή του κρίσιμου λόγου νερού προς τσιμέντο $=0.4$. Η συντήρηση των δοκιμών έγινε σε δεξαμενή νερού εξασφαλίζοντας έτσι εκατό τοις εκατό (100%) σχετική υγρασία.



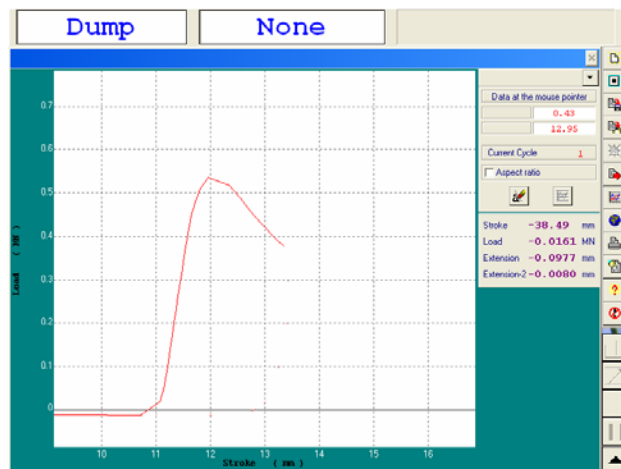
Σχ.4.7 Τα έξι κυβικά δοκίμια 15 x 15 x 15 cm

Ο πειραματικός έλεγχος της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε μετά από εύλογο χρονικό διάστημα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν όντως ενθαρρυντικά. Μόνο τρία από τα έξι δοκίμια ελέγχθηκαν τελικά. Τα δύο από αυτά μετά από 8 ημέρες και το τρίτο μετά από 23 . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κρίθηκαν ικανοποιητικά. Για τα δύο πρώτα προέκυψε θλιπτική αντοχή της τάξης των 25 MPa ενώ για το τρίτο δοκίμιο προέκυψε θλιπτική αντοχή 34 MPa. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε έχοντας υπόψη ότι το ρευστοποιητικό που προστέθηκε στο μίγμα ενεργούσε και ως επιβραδυντικό της πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Δοκιμή σε τέταρτο δοκίμιο μετά από τρεις μήνες επιβεβαίωσε θλιπτική αντοχή της τάξης των 50 MPa.



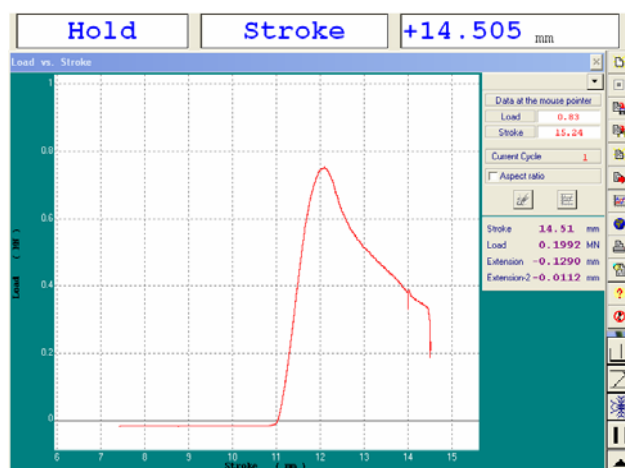
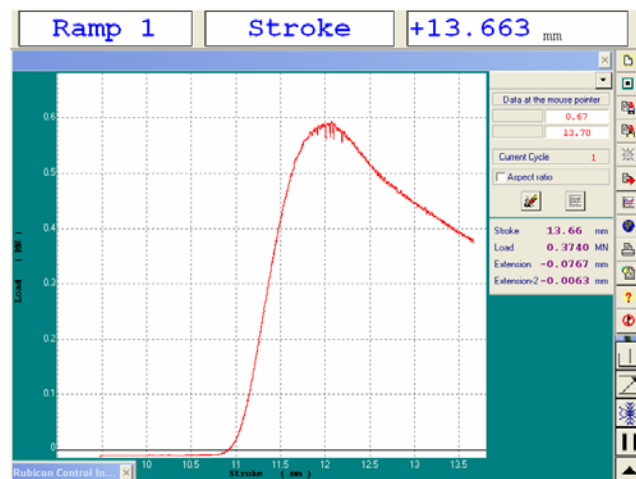
Σχ. 4.8 Κυβικό δοκίμιο μετά τη θραύση στην πρέσα.

Τα γραφικά αποτελέσματα των τριών αυτών δοκιμών παρουσιάζονται στα σχήματα 4.9, 4.10, 4.11.



Σχ.4.9 Γραφική απεικόνιση της καμπύλης φορτίου-μετακίνησης εμβόλου μηχανής στο πρώτο κυβικό δοκίμιο.

Σχ.4.10 Γραφική απεικόνιση της καμπύλης φορτίου μετακίνησης-εμβόλου μηχανής στο δεύτερο κυβικό δοκίμιο.



Σχ.4.11 Γραφική απεικόνιση της καμπύλης φορτίου-μετακίνησης εμβόλου μηχανής στο τρίτο κυβικό δοκίμιο.

4.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση

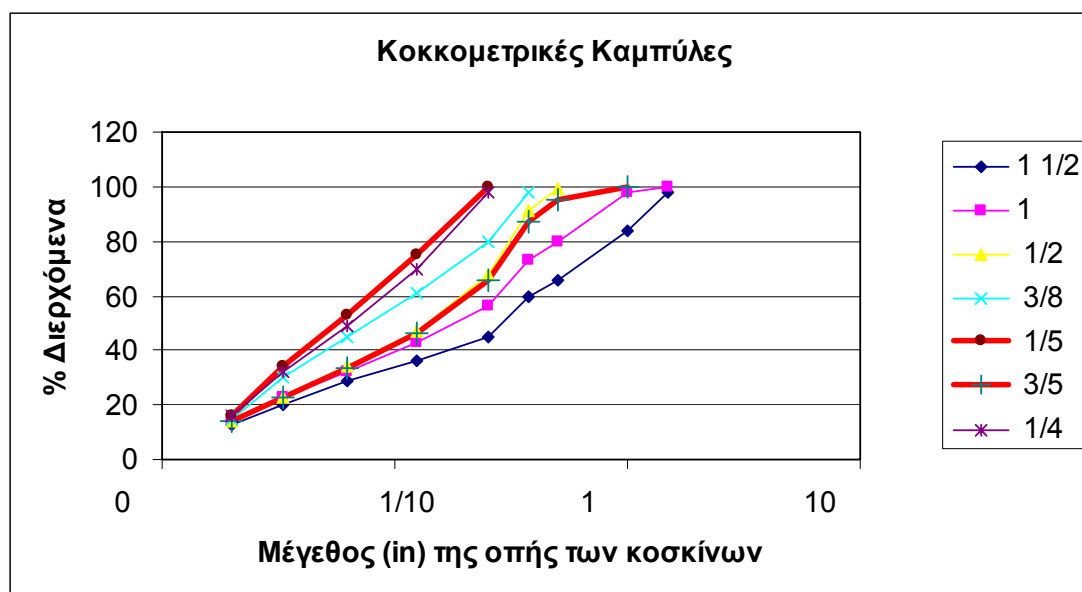
Από την αρχή η βασική επιδίωξη της πειραματικής διαδικασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος σε τέσσερα διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων από σκυρόδεμα δύο διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που θα εξασφάλιζαν σαφή διαφορά μεγέθους μεταξύ τους. Με άλλα λόγια ο μέγιστος κόκκος της πρώτης κοκκομετρικής διαβάθμισης θα ήταν τρεις φορές μεγαλύτερος από το μέγιστο κόκκο της δεύτερης. Ως σημαντικά μεγέθη μέγιστων κόκκων επιλέχθηκαν τα πέντε (5) και τα δεκαπέντε (15) χιλιοστά.

Οι διαδικασία του λεπτομερούς καθορισμού των κοκκομετρικών καμπυλών στηρίχτηκε στον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Στον κανονισμό γίνεται λεπτομερής καθορισμός τεσσάρων κοκκομετρικών καμπυλών με βάση το Αμερικάνικο σύστημα κοσκίνων. Οι καμπύλες που αναφέρονται στον κανονισμό είναι αυτές με μέγιστο κόκκο το 1.5, 1, 1/2, και 3/8 της ίντσας. Η σύνθεση των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων για τις ανάγκες των πειραμάτων έγινε με βάση τις τέσσερις αυτές κοκκομετρικές καμπύλες. Χρησιμοποιήθηκε και εδώ το Αμερικανικό σύστημα κοσκίνων για τον καθορισμό των επιμέρους κοκκομετρικών μεγεθών.

Ειδικότερα, οι νέες κοκκομετρικές καμπύλες ορίστηκαν με βάση τον μέγιστο κόκκο τους σε καμπύλη του 1/5 της ίντσας και καμπύλη των 3/5 της ίντσας. Στην συνέχεια σε διάγραμμα με λογαριθμική κλίμακα σχεδιάστηκαν οι τέσσερις διαβαθμίσεις που αναφέρονται στον Ελληνικό Κανονισμό. Οι νέες διαβαθμίσεις προέκυψαν ώστε να ακολουθούν την φιλοσοφία των τεσσάρων γνωστών. Δηλαδή μορφοποιήθηκαν ώστε να ταιριάζουν ομαλά μέσα στο διάγραμμα μέσω μιας μικτής διαδικασίας γραμμικής παρεμβολής και εξομάλυνσης τους. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής αναφέρονται στον πίνακα 4.1 και σχήμα 4.12.

	Διάσταση οπής κοσκίνου (in.)						
Καμπύλες	1 1/2	1	1/2	3/8	1/4	1/5	3/5
Αρ. Κοσκίνου	%Διερχ.	%Διερχ.	%Διερχ.	%Διερχ.	%Διερχ.	%Διερχ.	%Διερχ.
1/50	13	14	14	15	16	16	14
1/30	20	23	23	30	32	34	23
1/16	29	32	34	45	49	53	33.6
1/8	36	43	47	61	70	75	46.2
1/4	45	56	68	80	98	100	65.6
3/8	60	73	91	98			87.4
1/2	66	80	99				95.2
1	84	98					100
1 1/2	98	100					

Πιν. 4.1 Κοκκομετρικές Καμπύλες για τα μίγματα της παρούσας εργασίας



Σχ. 4.12 Γραφικό αποτέλεσμα των κοκκομετρικών καμπυλών

4.7 Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος

Προκειμένου να κατασκευαστούν τα δοκίμια υπήρχε η ανάγκη καθορισμού των ποσοτήτων των συστατικών του σκυροδέματος. Η απαίτηση για αντοχές άνω των 40 MPa οδήγησε στη χρήση 450 kg. τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Σύμφωνα με την αναλογία συστατικών σκυροδέματος 1/2/1/0.4 (Τσιμέντο /αδρανή /άμμο/ νερό) και την παραπάνω απαίτηση, συντάχθηκε η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος και για τις δύο κοκκομετρικές διαβαθμίσεις.

Στους πίνακες 4.2 – 4.6 παρουσιάζεται η μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος:

- Με τέσσερα μεγέθη δοκιμίων:

Δοκίμια	D(in)	L(in)	D(cm)	L(cm)
Δ_1	2	4	5.08	10.16
Δ_2	3	6	7.62	15.24
Δ_3	4	8	10.16	20.32
Δ_4	6	12	15.24	30.48

Πιν. 4.2 Διαστάσεις δοκιμίων

- Με δύο κοκκομετρικές διαβαθμίσεις:

	Μίγμα	
Διαβαθμίσεις	A ₁	A ₂
Μέγιστος Κόκκος	5mm, 1/5 in.	15mm, 3/5 in.

Πιν.4.3 Διαστάσεις μεγίστου κόκκου αδρανών

- Με αριθμό δοκιμών:

	Μίγμα	
Δοκίμια	A ₁	A ₂
Δ ₁	13	0
Δ ₂	13	13
Δ ₃	13	13
Δ ₄	13	13

Πιν. 4.4 Αριθμός δοκιμών ανά μίγμα

Άρα ο συνολικός όγκος για κάθε ένα από τα δύο μίγματα με 35% επαύξηση προέκυψε **0.1313 m³**.

Άρα $\rightarrow 0,1313\text{m}^3 \rightarrow 59.085\text{kg}$ Τσιμέντο $\rightarrow 118.17\text{kg}$ Αδρανή = 119kg Αδρανή

Τελικές ποσότητες συστατικών:

	Μίγμα	
Κοκκομετρική διαβάθμιση	A ₁	A ₂
Αδρανή	119 Kg	119Kg
Τσιμέντο	59.5 Kg	59.5Kg
Άμμο	59.5 Kg	59.5Kg
Νερό	23.8 Kg	23.8Kg

Πιν. 4.5 Ποσότητα συστατικών ανά μίγμα

Με ανάλυση των βαρών στα επί μέρους μεγέθη κόκκων των διαβαθμίσεων προκύπτει ο πίνακας του Σχ. 4.18.

Ανάλυση 1				Ανάλυση 2			
Κοκκομετρική Καμπύλη A1 (1/5")				Κοκκομετρική Καμπύλη A2 (3/5")			
Κόσκινα	%Διερχ.	%Συγκρ.	Βάρος Kg	Κόσκινα	%Διερχ.	%Συγκρ.	Βάρος
1/2	100	0	0	1/2	95.2	4.8	5.616
3/8	100	0	0	3/8	87.4	7.8	9.126
4	100	0	0	4	65.6	21.8	25.506
8	75	25	29.25	8	46.2	19.4	22.698
16	53	22	25.74	16	33.6	12.6	14.742
30	34	19	22.23	30	23	10.6	12.402
50	16	18	21.06	50	14	9	10.53
80	8	8	9.36	80	7	7	8.19
100	4	4	4.68	100	3	4	4.68
200	1	3	3.51	200	1	2	2.34
Παιπάλη		1	1.17	Παιπάλη		1	1.17
Συνολικό Βάρος		100	117	Συνολικό Βάρος		100	117

Πιν.4.6 Ανάλυση ποσότητας αδρανών ανά μίγμα.

4.8 Επίτευξη κοκκομετρικής διαβάθμισης

Με βάση τον παραπάνω πειραματικό σχεδιασμό η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, που θα χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή των προβλεπόμενων δοκιμίων, έπρεπε να πληρεί αυστηρές απαιτήσεις και προδιαγραφές. Η απόλυτη ακρίβεια των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων ήταν αναγκαία λόγω της ευαισθησίας του υπό μελέτη φαινομένου. Για το λόγο αυτό αποφασίσθηκε η όσο το δυνατόν ακριβής σύνθεση των πειραματικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων όπως προέκυψαν από τη μεθοδολογία που αναφέρεται παραπάνω. Οι συγκεκριμένες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που χρειαζόνταν για την σύνθεση των δύο μιγμάτων σκυροδέματος προέκυψαν μετά από σύνθεση μιγμάτων αδρανών συγκεκριμένης διαβάθμισης. Οι απαιτήσεις των πειραματικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων οδήγησαν στο συστηματικό διαχωρισμό των αδρανών στα θεμελιώδη μεγέθη κόκκων τους. Τα θεμελιώδη αυτά μεγέθη επιλέχτηκαν με βάση το Αμερικάνικο σύστημα πρότυπων μεγεθών κοσκίνων. Τα μεγέθη αυτά ήταν: 1/2", 3/8", 1/4", No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.80, No.100 και No.200. (No.x όπου x = βρόγχοι ανά ίντσα)



Σχ.4.13 Κόσκινα με διαχωρισμένα αδρανή



Σχ.4.14 Διαχωρισμένα αδρανή

Χρησιμοποιώντας ειδική μηχανή ανατάραξης των κοσκίων και τα ανάλογα κόσκινα πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός τριών εμπορικών μιγμάτων στα ανάλογα μεγέθη των αδρανών και ανασύνθεση τους στις πρότυπες πειραματικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Με τον τρόπο αυτόν καθορίστηκε και η ακριβής κοκκομετρική διαβάθμιση των τριών μιγμάτων. Χρησιμοποιήθηκε, γαρμπίλι, θραυστή άμμος (ίδιου πετρώματος με το “γαρμπίλι” και “ρυζάκι”). Η ανάμιξη συγκεκριμένων ποσοτήτων των διαβαθμίσεων αυτών μαζί με μεμονωμένα ήδη διαχωρισμένα μεγέθη κόκκων έδωσαν τις ζητούμενες πρότυπες πειραματικές διαβαθμίσεις. Οι διαβαθμίσεις των τριών μιγμάτων καθώς και οι αναλογίες με τις οποίες αναμίχθηκαν τελικά αναφέρονται αναλυτικά στους πίνακες 4.7 – 4.10.

Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις

Αδρανές 1 (Γαρμπίλι)

<i>Χρόσκινο</i>	<i>Ποσοστό συκρατούμενα</i>
1/2"	0.244%
3/8"	36.142%
1/4"	57.204%
No.4	3.480%
No.8	1.282%
No.16	0.611%
<No.16	1.038%

Πιν.4.7 Ανάλυση κοκκομετρίας 1

Αδρανές 2 (Θραυστή Άμμος)

<i>Χρόσκινο</i>	<i>Ποσοστό συκρατούμενα</i>
No.8	24.30%
No.10	8.68%
No.16	18.32%
No.20	4.20%
No.30	12.18%
No.50	9.50%
No.<50	22.82%

Πιν.4.8 Ανάλυση κοκκομετρίας 2

Αδρανές 3 ("Ρυζάκι")

<i>Χρόσκινο</i>	<i>Ποσοστό συκρατούμενα</i>
No.4	0%
No.8	38.14%
No.10	21.93%
No.16	38.48%
No.20	0.87%
No.30	0.44%
No.50	0.12%
No.<50	0.02%

Πιν.4.9 Ανάλυση κοκκομετρίας 3

Σύνθεση προτύπων πειραματικών διαβαθμίσεων.

Κόσκινα	50 kg θραυστή άμμος με την αρχική διαβάθμιση (Kg)		Γαρμπίλι (kg)		θραυστή άμμος (kg)		Ρυζάκι (kg)		Πειραματική Διαβάθμιση 3/5" (kg)
1/2"	0	+	5.616	+	---	+	---	→	5.616
3/8"	0	+	9.126	+	---	+	---	→	9.126
4	0	+	25.506	+	---	+	---	→	25.506
8	12.150	+	---	+	---	+	10.548	→	22.698
16	13.500	+	---	+	---	+	1.242	→	14.742
30	8.190	+	---	+	4.212	+	---	→	12.402
50	4.750	+	---	+	5.780	+	---	→	10.53
<50	11.410	+	---	+	4.970	+	---	→	16.38
Σύνολο	50	+	40.248	+	14.962	+	11.790	→	117

Κόσκινα	82 kg θραυστή άμμο με την αρχική διαβάθμιση (Kg)		Γαρμπίλι (kg)		θραυστή άμμος (kg)		Ρυζάκι (kg)		Πειραματική Διαβάθμιση 1/5" (kg)
1/2"	0	+	---	+	---	+	---	→	0
3/8"	0	+	---	+	---	+	---	→	0
4	0	+	---	+	---	+	---	→	0
8	19.926	+	1.134	+	---	+	8.190	→	29.25
16	22.140	+	---	+	---	+	3.600	→	25.74
30	13.432	+	---	+	8.798	+	---	→	22.23
50	7.790	+	---	+	13.270	+	---	→	21.06
<50	18.712	+	---	+	0.008	+	---	→	18.72
Σύνολο	82	+	1.134	+	22.076	+	11.790	→	117

Πιν.4.10 Πίνακες σύνθεσης προτύπων πειραματικών διαβαθμίσεων

Και στα δύο μίγματα υπάρχει 11.790Kg ρυζάκι και 105.21 Kg Γαρμπίλι και Άμμο

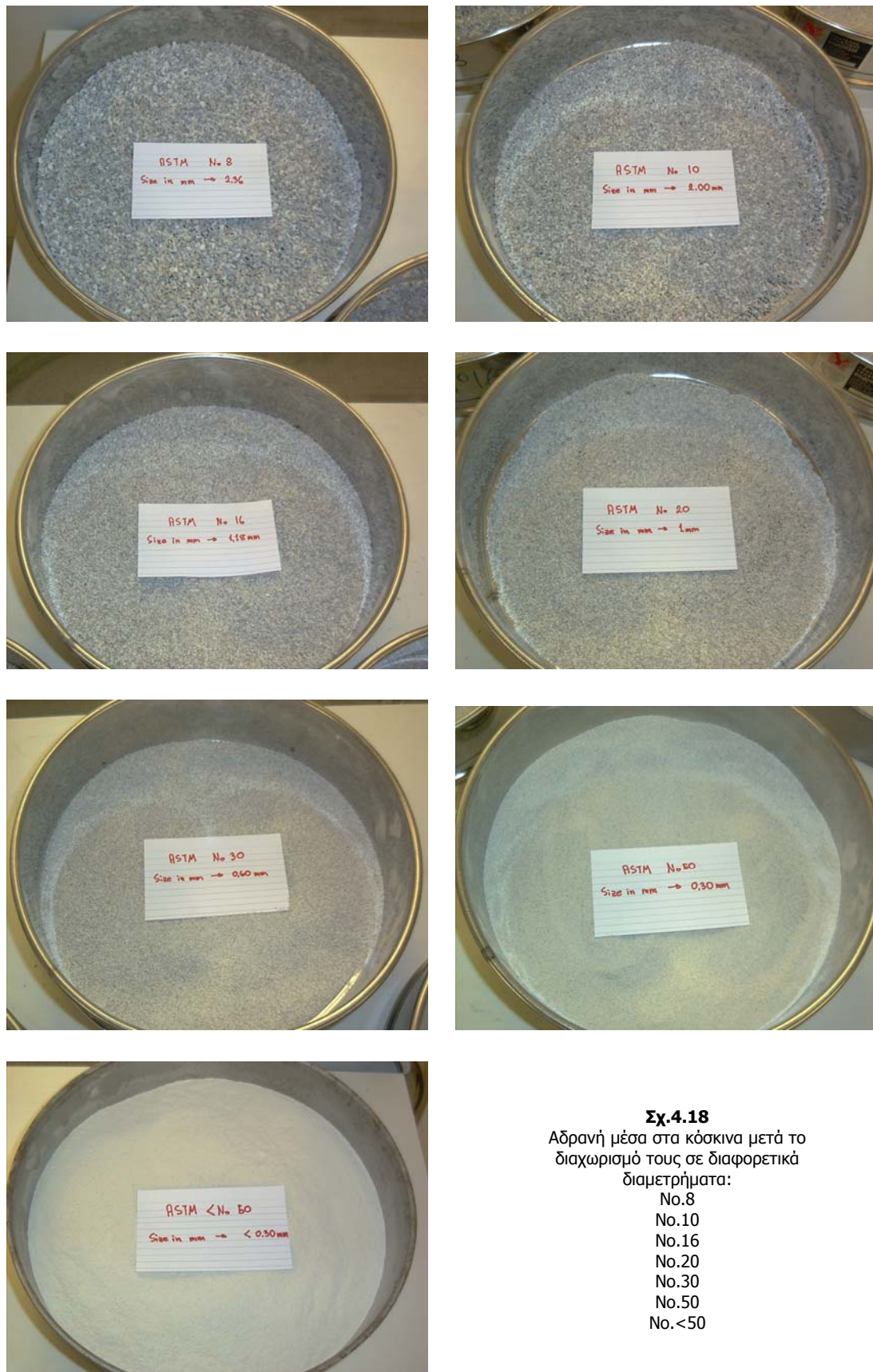


Σχ.4.15
Μηχανή
Ανατάραξης
κοσκίνων

Σχ.4.16 Μηχανή
ανατάραξης κοσκίνων
με το αρχικό υλικό των
αδρανών



Σχ.4.17
Διαχωρισμένα
αδρανή σε
διάφορες
διαβαθμίσεις



Σχ.4.18

Αδρανή μέσα στα κόσκινα μετά το διαχωρισμό τους σε διαφορετικά διαμετρήματα:

- No.8
- No.10
- No.16
- No.20
- No.30
- No.50
- No.<50



Σχ.4.19
ASTM 1/2"



Σχ.4.20
ASTM 3/8"



Σχ.4.21
ASTM 1/4"
και
ASTM No.4

Σχ.4.22
ASTM No.8
και
ASTM No.10



Σχ.4.23
ASTM No.16
και
ASTM No.20

Σχ.4.24
ASTM No.30
και
ASTM No.50



4.9 Παρασκευή σκυροδέματος

Η παρασκευή του σκυροδέματος για την κατασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών. Τα εργαστήρια περιλαμβάνει ανάμεσα στον εξοπλισμό του αναδευτήρα σκυροδέματος χωρητικότητας 200 lt ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δύο πειραματικών μιγμάτων σκυροδέματος. Το κάθε μίγμα περιείχε διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση. Έτσι προέκυψαν δύο σειρές κυλινδρικών δοκιμίων διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και διαφορετικών μεγεθών.

Η ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος βασίστηκε στην αναλογία 1/2/1/0.4 (τσιμέντο /αδρανή /άμμο /νερό) όπως αυτή είχε ήδη καθοριστεί. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Ι και ποταμίσις άμμος Τυρνάβου. Τα αδρανή αναμίχθηκαν με βάση τις πειραματικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις όπως αυτές περιγράφονται στους πίνακες των σχημάτων 4.21 -4.24. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο διατηρήθηκε στο 0.4 προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές αντοχές. Στο μίγμα προστέθηκε χημικό ρευστοποιητικό για την βελτίωση της εργασιμότητας εξαιτίας του χαμηλού λόγου νερού προς τσιμέντο.



Σχ.4.25 Μπετονιέρα χωρητικότητας 200 lt.



Σχ.4.26 Ανάμιξη συστατικών σκυροδέματος



Σχ.4.27 Ανάμιξη και οπτικός έλεγχος εργασιμότητας



Σχ.4.28 Έξοδος μίγματος σκυροδέματος από τον αναδευτήρα

4.10 Κατασκευή δοκιμών

Η σκυροδέτηση των δοκιμών έγινε με βάση τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Η έγχυση του σκυροδέματος μέσα στα πλαστικά καλούπια έγινε σε τρεις στρώσεις με συμπύκνωση της κάθε μίας στρώσης με επαναλαμβανόμενη έμπυξη σε αυτήν ράβδου 25 φορές. Η διάμετρος της ράβδου που χρησιμοποιήθηκε ήταν ανάλογη της διαμέτρου του δοκιμίου. Με την πλήρωση των καλουπιών η άνω επιφάνεια επιπεδωνόταν με προσοχή και το δοκίμιο τοποθετούνταν σε ασφαλές μέρος μέχρι την εισαγωγή του στη δεξαμενή συντήρησης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τέσσερις διαφορετικές διαστάσεις. Ο λόγος ύψος προς διάμετρο, h/d , ήταν σταθερός ίσο με 2. Τα καλούπια ήταν από πλαστικό με διαμέτρους των 2, 3, 4 και 6 ιντσών. Συνολικά κατασκευάστηκαν ενενήντα ένα (91) δοκίμια. Τριάντα εννιά (39) δοκίμια κατασκευάστηκαν με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση A_2 (μέγιστος κόκκος αδρανών 15 mm) και πενήντα δύο (52) δοκίμια με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση A_1 (μέγιστος κόκκος αδρανών 5 mm).



Σχ.4.29 Σκυροδέτηση δοκιμών



Σχ.4.30 Συμπύκνωση Στρώσεων



Σχ.4.31 Ολοκλήρωση διαδικασίας



Σχ.4.32 Έτοιμα δοκίμια

4.11 Συντήρηση δοκιμών

Η συντήρηση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε μέσα σε ειδική δεξαμενή νερού. Με αυτόν τον τρόπο τα δοκίμια συντηρούνταν ομοιόμορφα κάτω από συνθήκες 100% σχετικής υγρασίας. Μια ειδική διάταξη εξασφάλιζε θερμοκρασία νερού 20 - 30° C. Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας εξασφαλιζονταν με θερμόμετρο του οποίου το άκρο ήταν βυθισμένο στο νερό.

Η διάρκεια της συντήρησης ήταν περίπου τρεις (3) μήνες. Οι δύο σειρές δοκιμών δεν σκυροδετήθηκαν την ίδια μέρα αλλά με διαφορά περίπου 40 ημερών. Η παραμονή τους στο νερό επομένως δεν συνέπεσε ακριβώς. Στον πίνακα 4.11 αναφέρονται οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και εξαγωγής των δοκιμών από την δεξαμενή.

Σειρά Δοκιμών	Κοκκομετρική Διαβάθμιση Μίγμα	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή	Ημέρες
Σειρά 1η	A2 (μέγιστος κόκκος 15mm)	17 Δεκεμβρίου 2003	15 Μαρτίου 2004	89
Σειρά 2η	A1 (Μέγιστος κόκκος 5mm)	2 Φεβρουαρίου 2004	21 Απριλίου 2004	79

Πιν. 4.11 Ημερομηνίες σκυροδέτησης και εξαγωγής από δεξαμενή της εκάστοτε σειράς



Σχ.4.33 2^η σειρά δοκιμών



Σχ.4.34 1^η σειρά δοκιμών



Σχ.4.35 Συσκευή θέρμανσης νερού



Σχ.4.36 Συνολική εικόνα δεξαμενής συντήρησης με δοκίμια

4.12 Οι δυο σειρές δοκιμών

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση της εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος σε τέσσερα διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμών αποτελούμενα από σκυρόδεμα δύο διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων. Επομένως για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σκυροδετήθηκαν δύο σειρές δοκιμών. Μία σειρά για κάθε κοκκομετρική διαβάθμιση.

Η κάθε σειρά μετά την παραμονή της στη δεξαμενή συντήρησης για διάστημα που προσέγγιζε τους τρεις μήνες εξάγονταν από αυτήν για την έναρξη των πειραμάτων θλίψης και εφελκυσμού. Πριν από τα πειράματα αυτά όλα τα δοκίμια της εκάστοτε σειράς καθαρίζονταν, αριθμούνταν, ζυγίζονταν, μετρούνταν οι διαστάσεις, και φωτογραφίζονταν. Στον πίνακα 4.12 παρουσιάζονται η ονομασία των δοκιμών, οι διαστάσεις τους και το βάρος τους.

Πιν. 4.12 Τα χαρακτηριστικά του κάθε δοκιμίου

Δοκίμιο	Σειρά	Τυπικές Διαστάσεις		Πραγματικές Διαστάσεις		Βάρος (kg)
		H(cm)	D(cm)	H(cm)	D(cm)	
001	1 ^η 15mm	6	3	15.1	7.6	1.615
002				15.2	7.6	1.610
003				15.1	7.6	1.600
004				15.2	7.6	1.605
005				15.2	7.6	1.615
006				15.2	7.6	1.605
007				15.2	7.6	1.605
008				15.1	7.6	1.610
009				15.2	7.6	1.605
010				15.3	7.55	1.605
011				15.2	7.6	1.600
012				15.3	7.55	1.620
013				15.3	7.55	1.615
014		8	4	20.3	10.1	3.820
015				20.3	10.1	3.840
016				20.3	10.1	3.840
017				20.3	10.1	3.835
018				20.3	10.1	3.865
019				20.3	10.1	3.850
020				20.3	10.1	3.835
021				20.3	10.1	3.845
022				20.4	10.1	3.840
023				20.4	10.1	3.825
024				20.5	10.1	3.865
025				20.35	10.1	3.820
026				20.5	10.1	3.855
027		12	6	30.5	15.2	12.765
028				30.5	15.2	12.745
029				30.5	15.1	12.820
030				30.5	15.15	12.760
031				30.4	15.2	12.740
032				30.5	15.2	12.780
033				30.5	15.1	12.750

Δοκίμιο	Σειρά	Τυπικές Διαστάσεις		Πραγματικές Διαστάσεις		Βάρος (kg)
		H(in.)	D(in.)	H(cm)	D(cm)	
034	1 ^η 15mm	12	6	30.6	15.1	12.815
035				30.5	15.2	12.760
036				30.5	15.2	12.830
037				30.5	15.2	12.790
038				30.5	15.2	12.715
039				30.5	15.2	12.835
040	2 ^η 5mm	4	2	10.20	5.05	0.480
041				10.15	5.05	0.480
042				10.20	5.05	0.475
043				10.10	5.05	0.485
044				10.10	5.05	0.470
045				10.10	5.05	0.470
046				10.15	5.05	0.475
047				10.10	5.05	0.475
048				10.20	5.05	0.485
049				10.10	5.05	0.475
050				10.10	5.05	0.480
051				10.15	5.05	0.480
052				10.20	5.05	0.475
053		6	3	15.30	7.55	1.610
054				15.25	7.55	1.600
055				15.40	7.55	1.615
056				15.225	7.55	1.595
057				15.30	7.55	1.605
058				15.325	7.55	1.600
059				15.25	7.55	1.595
060				15.35	7.55	1.600
061				15.275	7.55	1.600
062				15.40	7.55	1.610
063		8	4	15.40	7.55	1.605
064				15.30	7.55	1.600
065				15.35	7.55	1.610
066				20.40	10.10	3.785
067				20.375	10.10	3.790
068				20.45	10.10	3.800
069				20.50	10.10	3.815
070				20.35	10.10	3.795
071				20.35	10.10	3.780
072				20.475	10.10	3.800
073				20.35	10.10	3.765
074				20.50	10.10	3.800
075				20.45	10.10	3.810
076				20.375	10.10	3.790
077				20.40	10.10	3.780
078				20.450	10.10	3.800
079		12	6	30.625	15.15	12.650
080				30.55	15.10	12.690
081				30.45	15.15	12.570
082				30.50	15.15	12.590
083				30.55	15.15	12.745
084				30.40	15.10	12.555
085				30.40	15.15	12.595

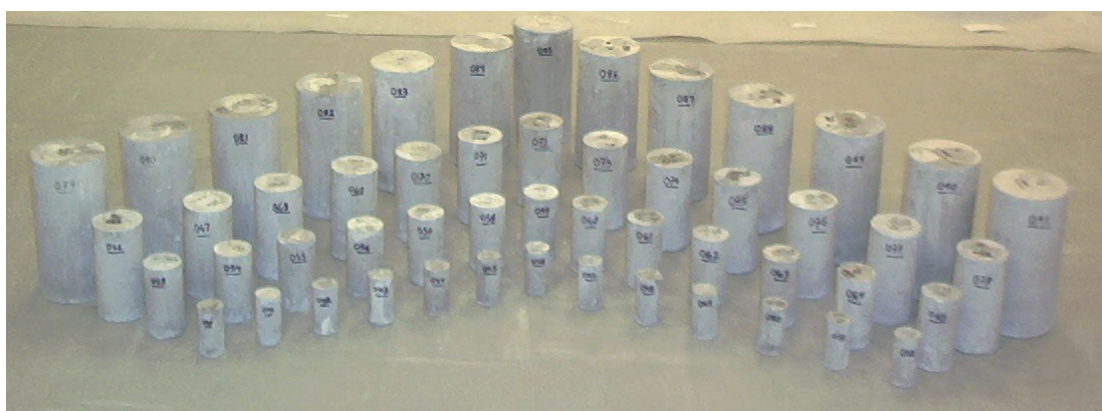
Δοκίμιο	Σειράς	Τυπικές Διαστάσεις		Πραγματικές Διαστάσεις		Βάρος kg
		H(in.)	D(in.)	H(cm)	D(cm)	
086	2 ^η 5mm	12	6	30.80	15.10	12.685
087				30.50	15.15	12.575
088				30.80	15.10	12.720
089				30.75	15.15	12.645
090				30.65	15.10	12.630
091				30.75	15.10	12.675

Οι διαστάσεις των δοκιμίων διέφεραν λίγο εξαιτίας των διαφορών μεταξύ των πλαστικών καλουπιών. Παρόλο που υπήρχε διαφορά δεν κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν στο μήκος των δοκιμίων παρά στην διάμετρο. Ο λόγος που συνέβη αυτό οφείλεται στον τρόπο κατασκευής των δοκιμίων. Η στάθμη της πάνω επιφάνειας του νωπού σκυροδέματος μέσα στο καλούπι δεν ήταν δυνατό να ευρίσκεται πάντα στο ίδιο ύψος. Οι διαφορές όμως ποτέ δεν ξεπερνούν το 1% και επομένως κρίθηκαν αμελητέες. Στα πειράματα εφελκυσμού όμως χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές διαστάσεις για τον υπολογισμό των αντοχών.

Μετά την καταγραφή των δοκιμίων οι 2 σειρές φωτογραφήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω στα σχήματα 4.37 και 4.48.



Σχ.4.37 Οικογενειακή φωτογραφία Δοκιμίων 001-039 (Σειρά 1)



Σχ.4.38 Οικογενειακή φωτογραφία Δοκιμίων 039-091 (Σειρά 2)

4.13 Προετοιμασία δοκιμίων

Πριν από την έναρξη των πειραμάτων τα δοκίμια έπρεπε να προετοιμαστούν κατάλληλα. Η προετοιμασία τους περιλάμβανε:

- Το “καπέλωμα” (capping) με ειδική τσιμεντοκονία των δοκιμίων που θα υποβάλλονταν σε θλιπτικό φορτίο.
- Την τοποθέτηση σε ορισμένο αριθμό δοκιμίων ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges).

Το “καπέλωμα” των άκρων των κυλινδρικών δοκιμίων με ειδική τσιμεντοκονία για τα πειράματα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής επιβάλλεται λόγω της μη επιπεδότητας των άκρων τους ώστε να εξασφαλιστεί η καλή και ομοιόμορφη επαφή των εμβόλων της μηχανής με τα άκρα των κυλίνδρων.

Λόγω της μεθόδου κατασκευής των κυλίνδρων τα δύο άκρα εμφάνιζαν σχετικά ανώμαλη επιφάνεια. Για τη διαμόρφωση λείας και επίπεδης επιφάνειας τοποθετείτο στα δύο άκρα τσιμεντοκονίαμα το οποίο επιπεδώνονταν με την χρήση στάθμης και πλακών γυαλιού. Αυτό αφήνονταν για ορισμένες μέρες να σκληρυνθεί και στην συνέχεια αφαιρούνταν τα τμήματα του γυαλιού.



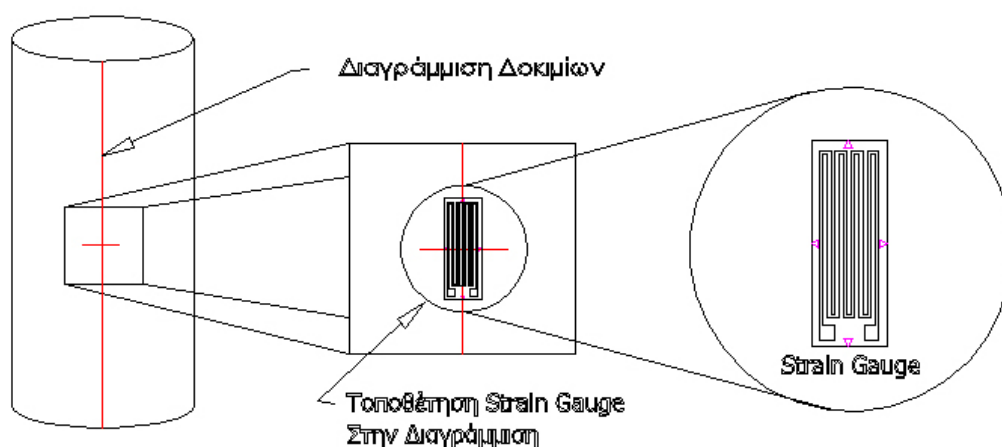
Σχ.4.39 “Καπέλωμα” των δοκιμίων



Σχ.4.40 “Καπέλωμα” των δοκιμίων

Κατά τη διάρκεια των θλιπτικών πειραμάτων ήταν επιθυμητή η καταγραφή των ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων. Για να επιτευχθεί αυτό τοποθετήθηκε στα δοκίμια ορισμένος αριθμός ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges). Η τοποθέτηση αυτή έπρεπε να γίνει με προσοχή και με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τον λόγο αυτό πριν το “καπέλωμα” τα δοκίμια στα οποία θα τοποθετούνταν οι αισθητήρες αυτοί, διαγραμμίζονταν με προσοχή. Αποφασίστηκε να τοποθετηθούν δυο με τρία strain gauges ανά δοκίμιο. Η τοποθέτηση των strain gauges δεν έγινε σε όλα τα δοκίμια λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού τους. Η διαγράμμιση βοηθούσε στον προσδιορισμό των μεσημβρινών και των μέσων των δοκιμίων ώστε τα strain gauges να τοποθετηθούν στις επιλεγμένες θέσεις. Όταν τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα

ήταν τρία τοποθετούνταν σε διάταξη 120° το ένα από το άλλο. Όταν τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα ήταν δύο τοποθετούνταν αντιδιαμετρικά σε διάταξη 180° .



Σχ.4.41 Τοποθέτηση strain gauges στο δοκίμιο

Τα strain gauges τοποθετήθηκαν πάνω στα δοκίμια με τη χρήση ειδικής εποξειδικής ρητίνης. Μετά την τοποθέτησή τους αφήνονταν να στεγνώσουν για μία μέρα τουλάχιστον. Στην συνέχεια ολοκληρωνόταν η ένωσή τους μέσω καλωδίου με το αυτόματο καταγραφικό σύστημα Η/Υ (Data acquisition system) στην πειραματική διάταξη για να συντελεστεί το πείραμα θλίψης.

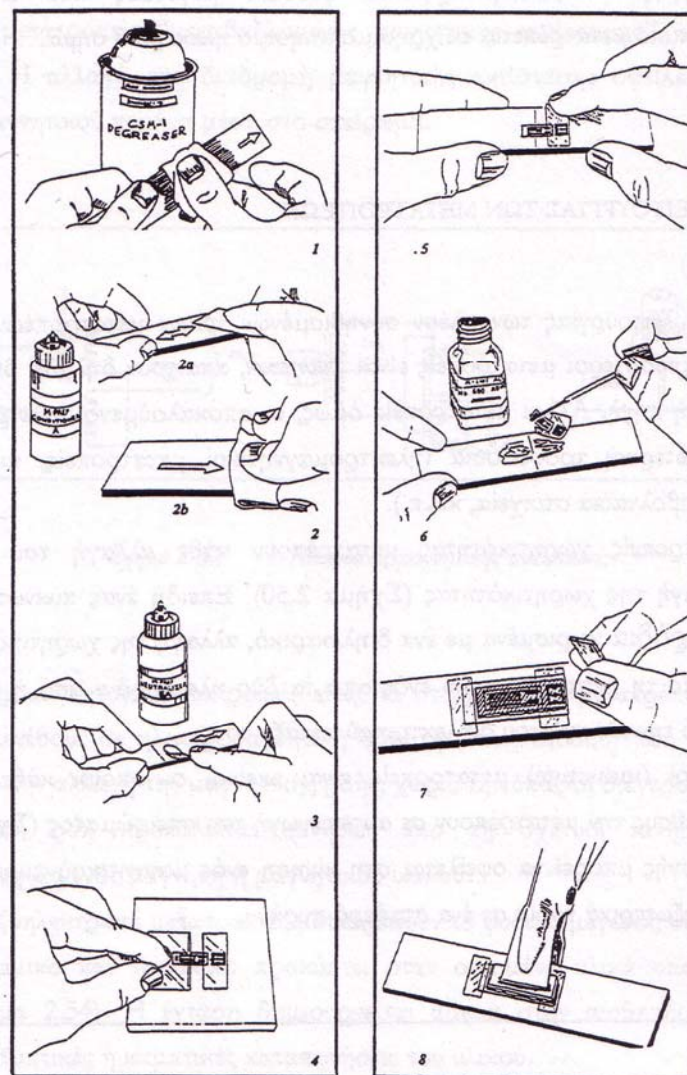
Το ηλεκτρομηκυνσιόμετρο είναι ένα λεπτό μεταλλικό κύκλωμα δεδομένης αντίστασης που επικολλάται στην υπό εξέταση επιφάνεια ή σώμα. Όταν το σώμα υποστεί μια καταπόνηση, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται μεταφέρονται στο μεταλλικό πλέγμα και προκαλούν αλλαγή στην αντίστασή του. Η αλλαγή της αντίστασης είναι ανάλογη των παραμορφώσεων που δημιουργεί η εξωτερική φόρτιση και ο συντελεστής αναλογίας είναι χαρακτηριστικός του υλικού που χρησιμοποιείται ως αγωγός του μηχανοσυστήματος.

Προκειμένου να ανιχνευτεί η αλλαγή της αντίστασης του μηχανοσυστήματος συνδέεται ως αντίσταση σε μία γέφυρα Wheatstone. Εάν θέλουμε την παραμόρφωση από ένα μόνο μηχανοσυστήμα τότε συνδέεται ως το ένα τέταρτο ($1/4$) της γέφυρας. Με τη βοήθεια της ισορροπίας της γέφυρας μπορούμε και ανιχνεύουμε μικρές αλλαγές αντίστασης και επομένως τις παραμορφώσεις του δοκιμίου. Η ευαισθησία των ηλεκτρομηκυνσιόμετρων φτάνει μέχρι και ένα εκατομμυριοστό m/m (ανηγμένη παραμόρφωση = $10^{-6}m/m$).

Ανιχνεύοντας με ακρίβεια την ανηγμένη παραμόρφωση των δοκιμίων μπορούμε να εξαγάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα για το υλικό. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού υπολογίζεται χωρίς την επιρροή της παραμορφωσιμότητας της ίδιας της μηχανής επιβολής φορτίου (πρέσας). Οι ενδείξεις που λαμβάνονται κατευθείαν από μια μηχανή αναφέρονται στη μετακίνηση των εμβόλων της και όχι στην

παραμόρφωση του δοκιμίου. Επομένως η μετακίνηση του εμβόλου της πρέσας (stroke) συμπεριλαμβάνει όχι μόνο την παραμόρφωση του δοκιμίου αλλά και της πρέσας. Η χρήση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων στα δοκίμια βοηθάει στο να καταγράφεται η παραμόρφωση του ίδιου του δοκιμίου. Από την παραμόρφωση αυτή εξάγεται και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Στο σχήμα 4.42 υπάρχει σχεδιάγραμμα για τις φάσεις τοποθέτησης των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων σε κάθε δοκίμιο.



Σχ.4.42 Φάσεις τοποθέτησης ηλεκτρομηκυνσιομέτρων

4.14 Τα πειράματα θλίψης

Τα πειράματα θλίψης πραγματοποιήθηκαν με βάση διεθνώς αποδεκτούς κανόνες πειραματικού ελέγχου. Τα κυλινδρικά δοκίμια αφού προετοιμάστηκαν κατάλληλα τοποθετήθηκαν στη θλιπτική πρέσα για τα πειράματα μονοαξονικής κεντρικής θλίψης. Όσα από τα δοκίμια είχαν

ηλεκτρομηκυνσιόμετρα συνδέθηκαν με την πειραματική διάταξη με τα ανάλογα καλώδια.



Σχ.4.43 Προετοιμασμένο δοκίμιο για θλίψη

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι ενδείξεις από την πρέσα και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα λαμβάνονταν με συχνότητα μίας μέτρησης ανά δευτερόλεπτο. Η καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων στον Η/Υ έγιναν με τη μορφή text. Η καταγραφή των μετρήσεων περιλαμβάνει τη μετακίνηση του εμβόλου (Stroke), το επιβαλλόμενο φορτίο (Load) και δύο ή τρεις μετρήσεις από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Μετά το πέρας των πειραμάτων τα δεδομένα αυτά των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων φορτίου μετακίνησης, φορτίου-παραμόρφωσης και τάσης-παραμόρφωσης καθώς και για την εξαγωγή άλλων πληροφοριών όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.



Σχ.4.44 Κατεστραμμένο δοκίμιο μετά το πείραμα

Ο έλεγχος της μηχανής θλίψης έγινε με βάση τη μετακίνηση του εμβόλου. Η παραμόρφωση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με ρυθμό του ενός εκατοστού του χιλιοστού το δευτερόλεπτο (0.01mm/sec). Επομένως η χρονική διάρκεια του κάθε πειράματος κεντρικής θλιπτικής φόρτισης ήταν της τάξης των τριών λεπτών (3min.). Η χρονική αυτή

διάρκεια συμπίπτει με τις απαιτήσεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος για πειράματα κεντρικής θλίψης.

Μετά το τέλος του εκάστοτε πειράματος το κατεστραμμένο πλέον δοκίμιο φωτογραφίζονταν και απομακρύνονταν από την πρέσα. Η φωτογράφιση των δοκιμίων γίνονταν και πριν από την δοκιμή στην φυσική τους κατάσταση. Μάλιστα για ορισμένο αριθμό πειραμάτων έγινε βιντεοσκόπηση του χρονικού της θραύσης των δοκιμίων.

Υπήρξαν τελικά πενήντα ένα (51) πειράματα θλίψης. Τα πειράματα έγιναν και για τις δύο σειρές δοκιμίων για όλα τα διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων. Έτσι προέκυψαν πληροφορίες για την επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του. Τα δεδομένα αυτά τελικά συγκεντρώθηκαν και συσχετίστηκαν μεταξύ τους.



Σχ.4.45 Κυλινδρικό δοκίμιο μετά και πριν από το πείραμα κεντρικής θλίψης

4.15 Πειράματα έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη

Η πειραματική διαδικασία που επιλέχτηκε ήταν του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη. Η μέθοδος αυτή είναι και γνωστή με το όνομα Brazilian Split test. Είναι η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή το κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανομημένη δύναμη P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειάς του.

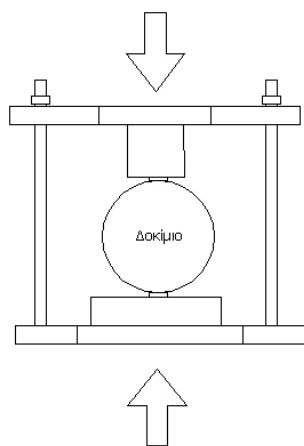
Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή της δύναμης κατά μήκος των δύο γενέτειρων, χρησιμοποιήθηκε ειδικό μεταλλικό εξάρτημα που κατασκευάστηκε ειδικά για αυτό το σκοπό. Το εξάρτημα αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικά για τα μεγαλύτερα δοκίμια των οποίων το μήκος ήταν μεγαλύτερο από το πλάτος του εμβόλου της πρέσας.

Στα σημεία επαφής του εξαρτήματος με το δοκίμιο τοποθετήθηκαν λεπτές λωρίδες πλάτους του ενός εκατοστού (1cm) από πεπιεσμένο ξύλο. Ο λόγος τοποθέτησης αυτών των λωρίδων είναι ότι η άμεση επαφή του δοκιμίου με τη μεταλλική πλάκα του εξαρτήματος θα προκαλούσε ισχυρές θλιπτικές δυνάμεις στα σημεία επαφής με πιθανό αποτέλεσμα την αστοχία σε θλίψη πριν από την αστοχία σε εφελκυσμό λόγω συγκεντρωμένων τάσεων. Η παρουσία της λωρίδας εξασφαλίζει

μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των θλιπτικών τάσεων στις περιοχές αυτές. Στη περίπτωση παρουσίας τυχόν ανωμαλίας κατά μήκος των δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων θα προκαλούνταν πρόωρη αστοχία του δοκιμίου από συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή. Η παρουσία όμως των δύο λωρίδων μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα πρόωρης αστοχίας.

Στα πειράματα έμμεσου εφελκυσμού καταγράφηκε η δύναμη P που επιβάλλονταν στο δοκίμιο καθώς και η μετακίνηση του εμβόλου (Stroke). Δεν τοποθετήθηκαν στα δοκίμια ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges). Με την εμφάνιση της ρωγμής η αστοχία ήταν άμεση και απόλυτη με την ακαριαία κοπή του δείγματος στη μέση. Η ύπαρξη ηλεκτρομηκυνσιομέτρου δεν θα ωφελούσε για την καταγραφή του φαινομένου.

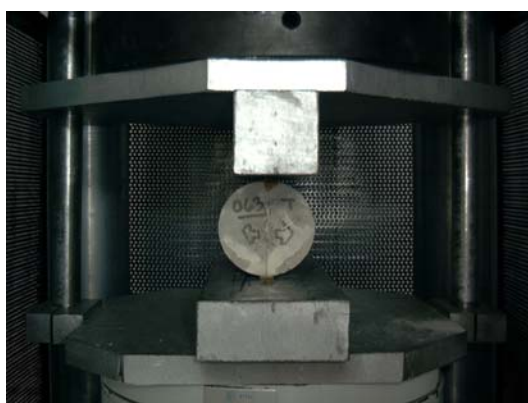
Στα σχήματα 4.46 και 4.47 φαίνεται το μεταλλικό εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων αυτών.



Σχ.4.46 Σχεδιάγραμμα του μεταλλικού εξαρτήματος για τη δοκιμή του έμμεσου εφελκυσμού



Σχ.4.47 Φωτογραφία του μεταλλικού εξαρτήματος με κυλινδρικό δοκίμιο (πείραμα έμμεσου εφελκυσμού)



Σχ.4.48 Κυλινδρικό δοκίμιο 063 πριν τη δοκιμή σε έμμεσο εφελκυσμό



Σχ.4.49 Κυλινδρικό δοκίμιο 063 μετά τη θραύση σε έμμεσο εφελκυσμό

Με την εμφάνιση της ρωγμής η αστοχία ήταν άμεση και απόλυτη με την ακαριαία κοπή του δείγματος στην μέση.

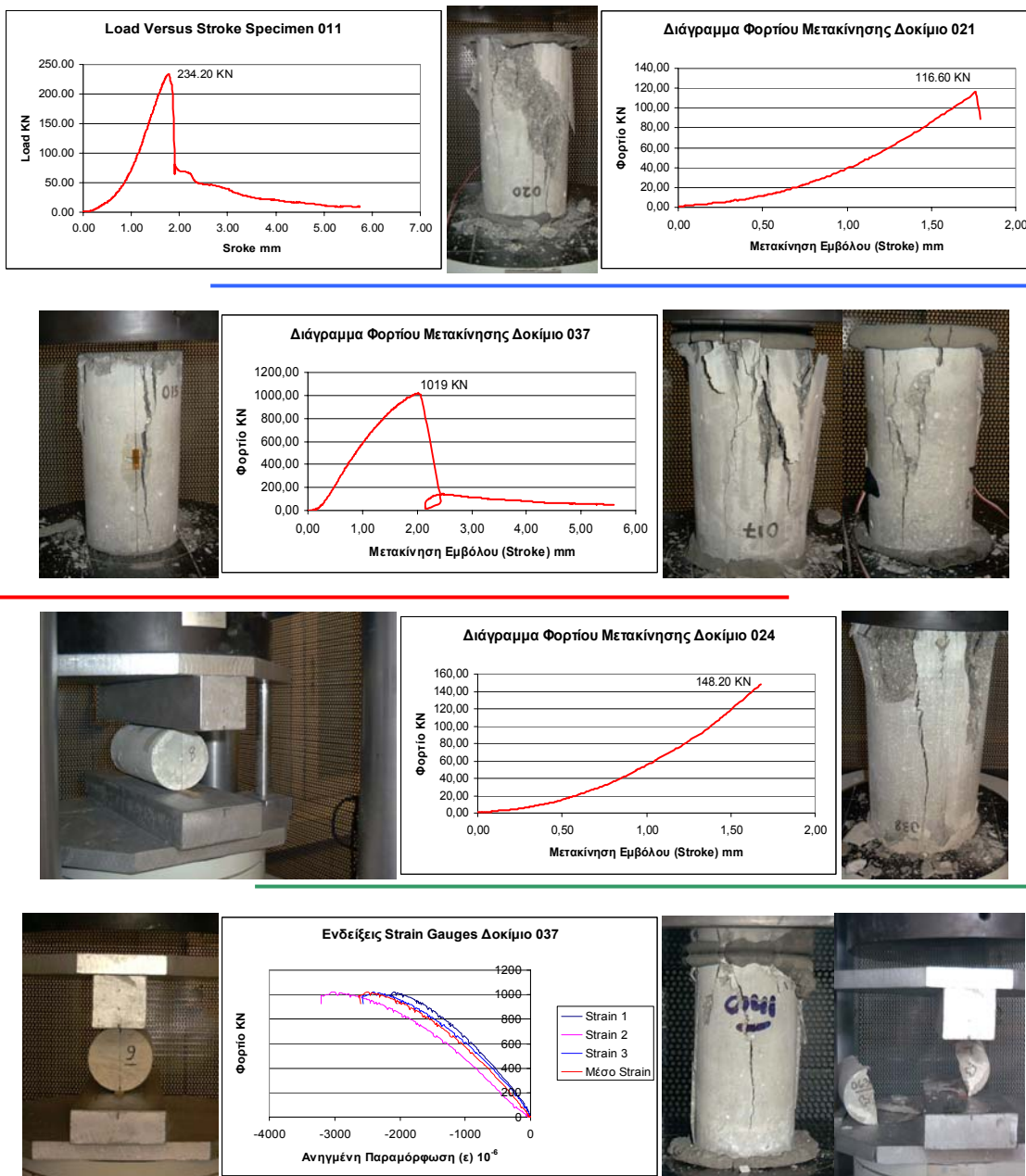
4.16 Το πέρας των πειραμάτων και ο απολογισμός

Μετά από πενήντα ένα (51) πειράματα θλίψης και τριάντα ένα (31) πειράματα έμμεσου εφελκυσμού ολοκληρώθηκε το πειραματικό σκέλος της εργασίας. Από τα ενενήντα ένα (91) δοκίμια που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν τα ογδόντα δύο (82). Καταγράφηκαν συνολικά μετρήσεις από εξήντα (60) δοκίμια χωρίς ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, από έξι (6) με τρία ηλεκτρομηκυνσιόμετρα και από δεκαέξι (16) δοκίμια με δύο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Βιντεοσκοπήθηκαν δέκα (10) πειράματα θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού. Τέλος φωτογραφήθηκαν τα περισσότερα από τα δοκίμια πριν και μετά τα πειράματα.

Η όλη πειραματική διαδικασία διήρκεσε δύο μήνες. Η 1^η σειρά δοκιμών υποβλήθηκε στην πειραματική διαδικασία σε δύο φάσεις εξαιτίας των διακοπών του Πάσχα που μεσολάβησαν. Επομένως τα αποτελέσματα των πειραμάτων διαχωρίστηκαν σε δύο υπό-σειρές ανάλογα με την εποχή που πραγματοποιήθηκαν. Η 2^η σειρά υποβλήθηκε στην πειραματική διαδικασία σε ένα διάστημα τριών εβδομάδων.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά Αποτελέσματα



Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας

5. Τα Πειραματικά Αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο περιέχει το σύνολο των δεδομένων που καταγράφηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα του συνόλου των 82 πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρατείνονται παρακάτω.

Στις επόμενες σελίδες παράλληλα με τα πειραματικά αποτελέσματα αναγράφονται και πληροφορίες για το εκάστοτε δοκίμιο. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν τον αριθμό του δοκιμίου, το βάρος του, τις διαστάσεις του, το ειδικό βάρος, ημερομηνίες σκυροδέτησης και θραύσης, αριθμός ηλεκτρομηκυνσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκε στην καταγραφή, ρυθμός φόρτισης, μέγιστο φορτίο, τελική αντοχή, ηλικία του δοκιμίου στη θραύση, καθώς και ο τύπος της τελικής αστοχίας. Οι πληροφορίες αυτές είναι πολύ σημαντικές για τον προσδιορισμό των ακριβών παραμέτρων του εκάστοτε πειράματος.

Τα αποτελέσματα που περιέχονται στις παρακάτω σελίδες βρίσκονται σε γραφική μορφή. Τα διαγράμματα αυτά έχουν εξαχθεί από τις καταγραφές των μετρήσεων. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι τα διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης και τάσης-μετακίνησης με βάση την καταγραφή των μετρήσεων από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ίδιας της πρέσας. Επίσης, στη συνέχεια υπάρχουν τα διαγράμματα φορτίου-ανηγμένης παραμόρφωσης που καταγράφηκαν με τη βοήθεια των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων που τοποθετήθηκαν σε ορισμένα δοκίμια. Σχετικά με αυτά υπάρχουν διαγράμματα με όλες τις μετρήσεις των strain gauges καθώς και μεμονωμένα. Τελικά υπάρχει και διάγραμμα φορτίο-μέσης ανηγμένης παραμόρφωσης.

Στις επόμενες σελίδες δεν υπάρχουν μόνο πληροφορίες και διαγράμματα αλλά και φωτογραφίες των δοκιμίων. Σε όσες περιπτώσεις ήταν δυνατόν υπάρχουν φωτογραφίες πριν και μετά την αστοχία. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να λείπει μία εκ των δύο καταστάσεων ή και οι δύο.

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των διαγραμμάτων αποτελεί αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου. Η μόνη ανάλυση που πραγματοποιείται είναι η εύρεση του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων όπου χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges). Η διόρθωση ορισμένων ανωμαλιών που παρατηρούνται στα διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης (stroke) πραγματοποιείται και αυτή στο επόμενο κεφάλαιο. Οι ανωμαλίες αυτές οφείλονται σε διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με την πειραματική διαδικασία. Λεπτομερής αναφορά στους παράγοντες αυτούς καθώς και στις προαναφερόμενες διορθώσεις θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο. Εδώ παρατίθενται τα διαγράμματα όπως προέκυψαν από τις καταγραφές των μετρήσεων από την πρέσα και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα.

Αριθμός Δοκιμίου: 001

Σειρά: 1η
15mm Max Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L = 15.24cm
D = 7.62cm

Βάρος: 1.615 kg

Ειδικό Βάρος: 2323.7 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 22 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 2

Ρυθμός μετακίνηση εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

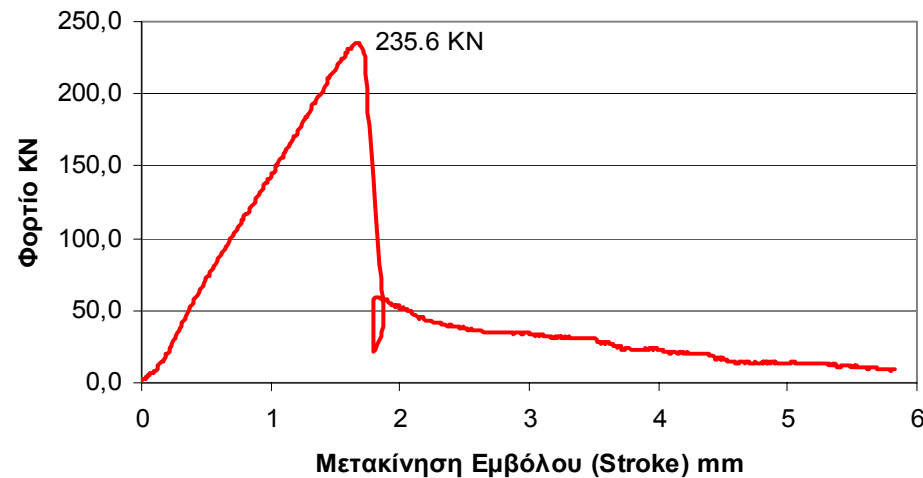
Φορτίο Αστοχίας: 235.6 KN

Αντοχή: 51.60 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 45 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 96

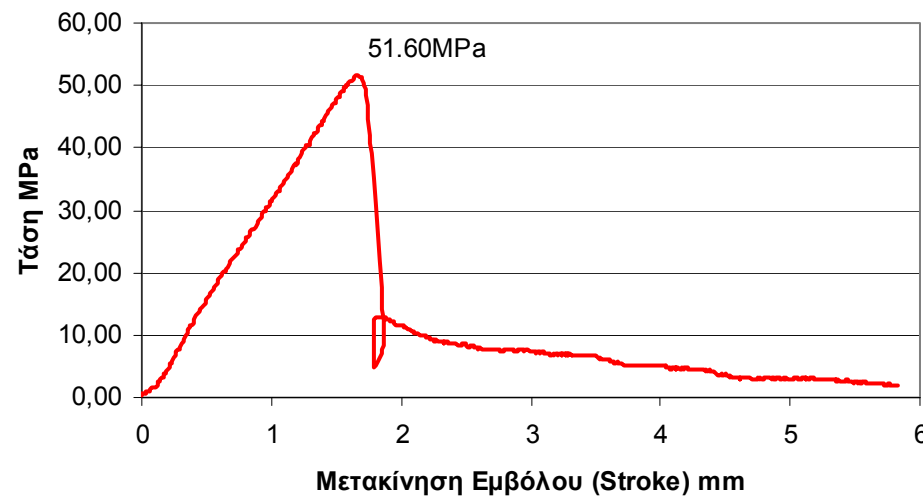
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 001



Δοκίμιο 001 Πριν

N/A

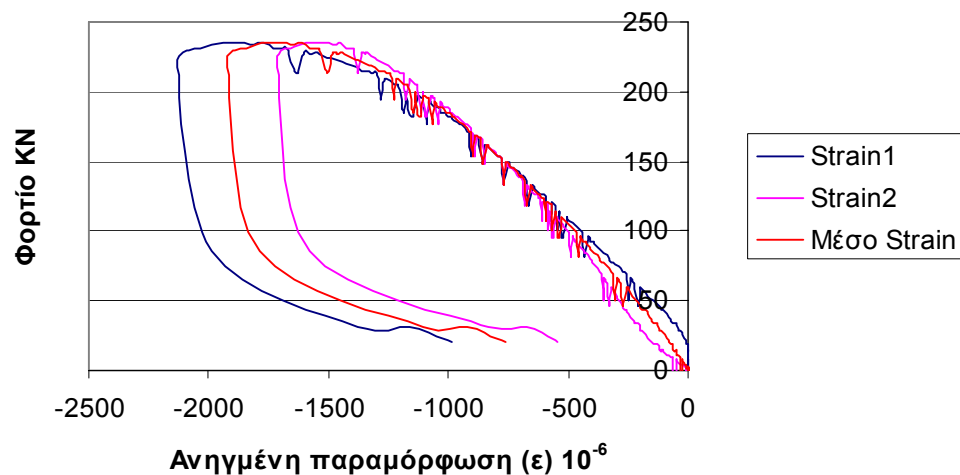
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 001



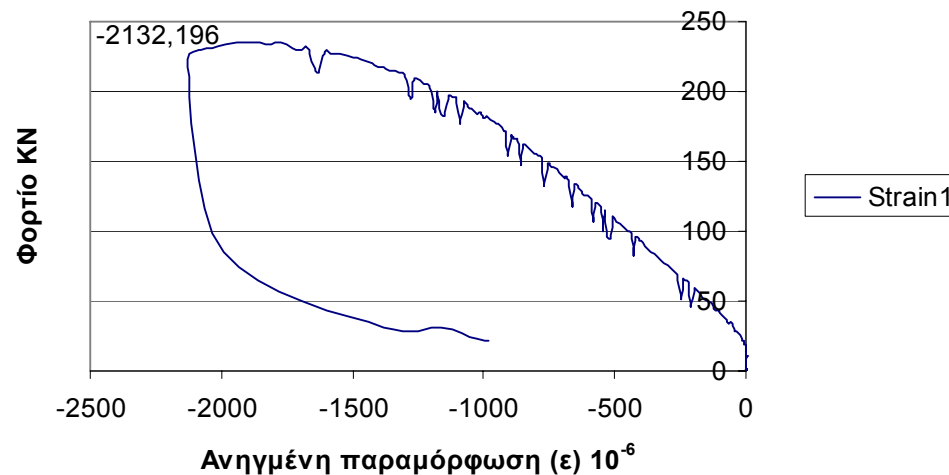
Δοκίμιο 001 Μετά



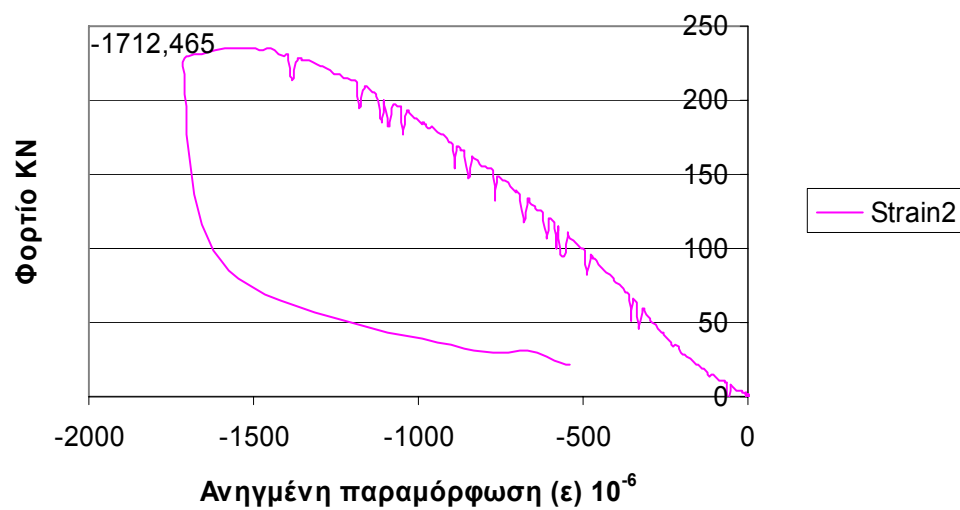
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 001



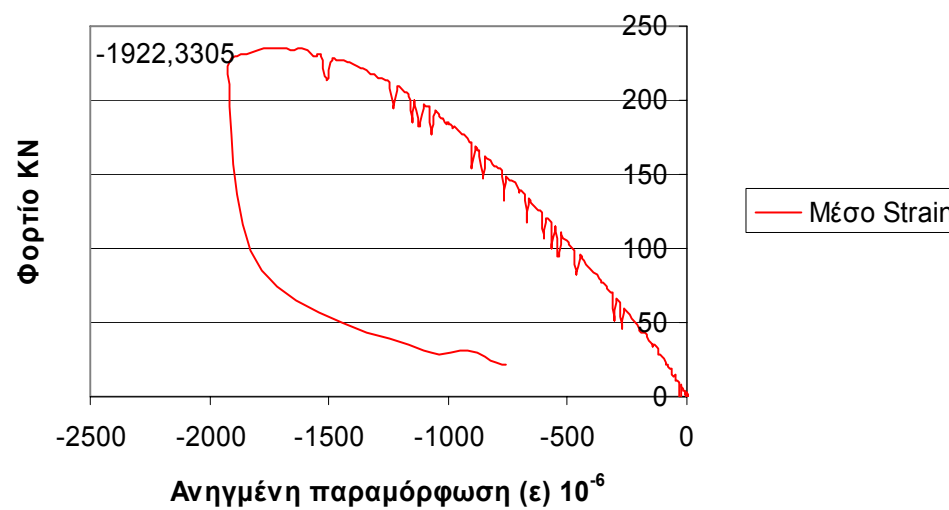
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 001

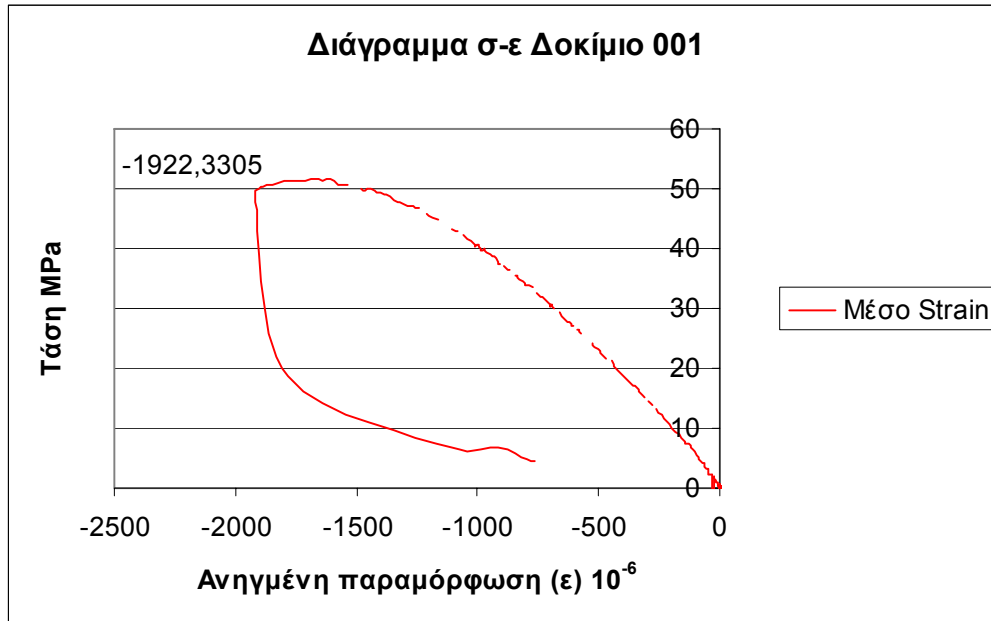


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 001



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 001





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.045 \text{ MPa}/\varepsilon 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9936$.

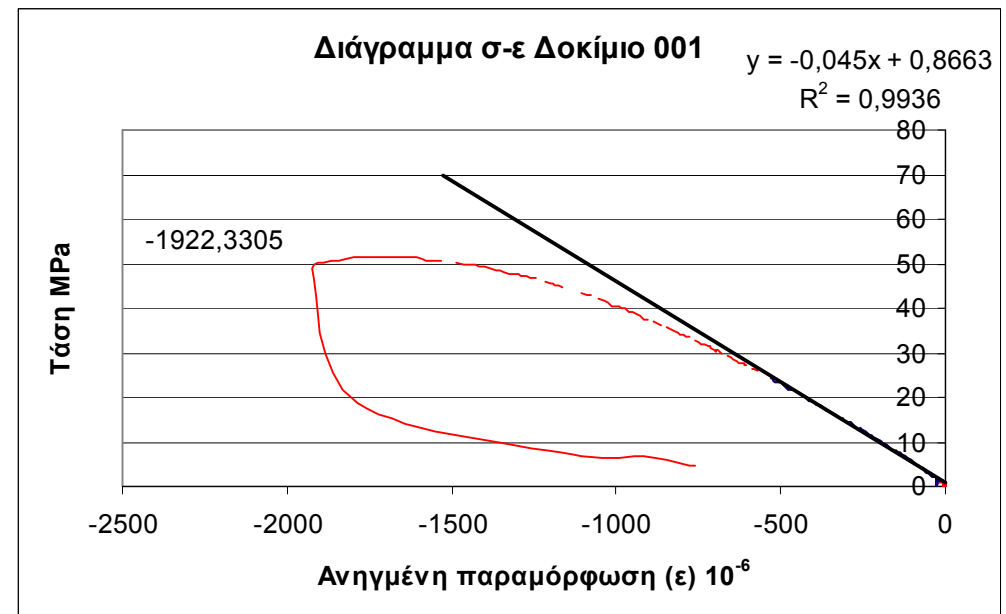
Επομένως:

$$E = 45 \text{ GPa}$$

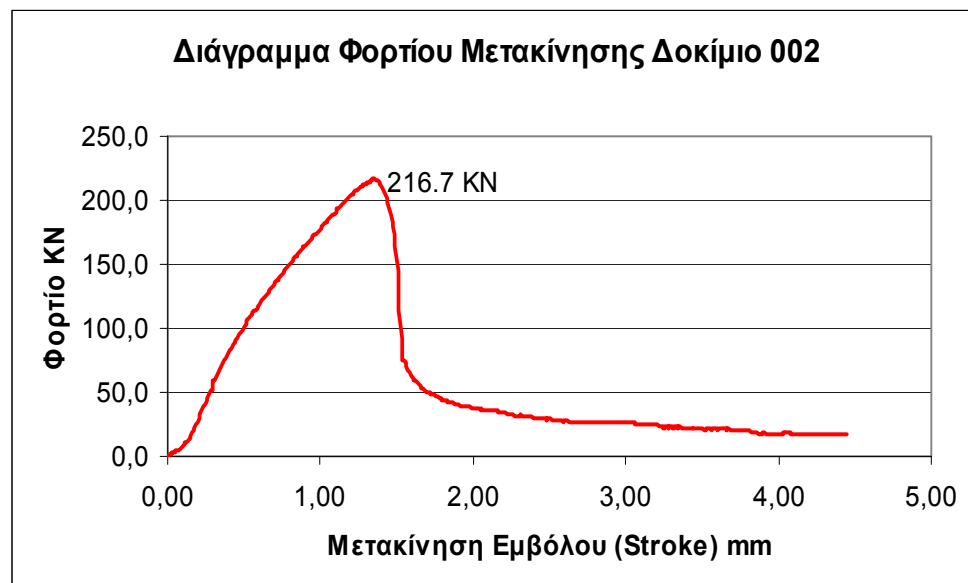
Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

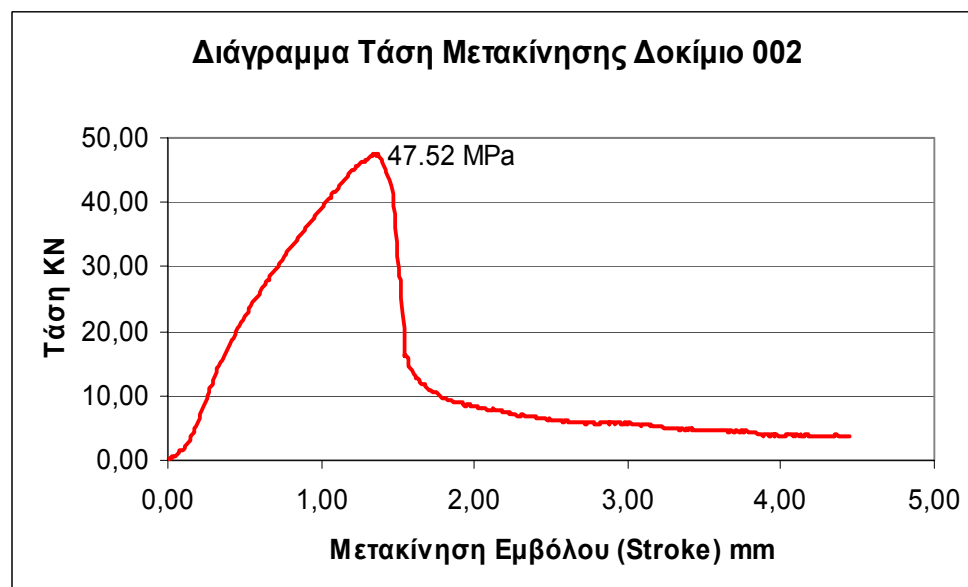
Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 001 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:	002
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.24cm D=7.62cm
Βάρος:	1.610 kg
Ειδικό Βάρος:	2316.15 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	22 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	2
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	216,7 KN
Αντοχή:	47,52 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	43.2 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	96



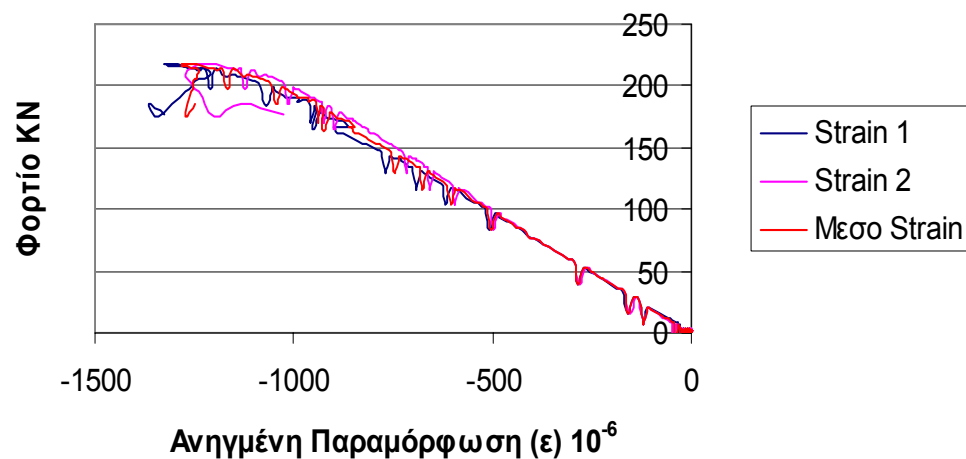
Δοκίμιο 002 Πριν



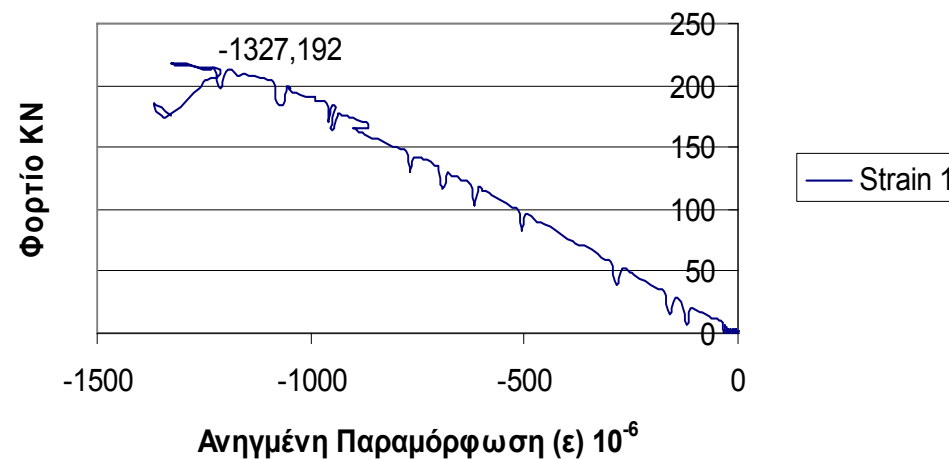
Δοκίμιο 002 Μετά

N/A

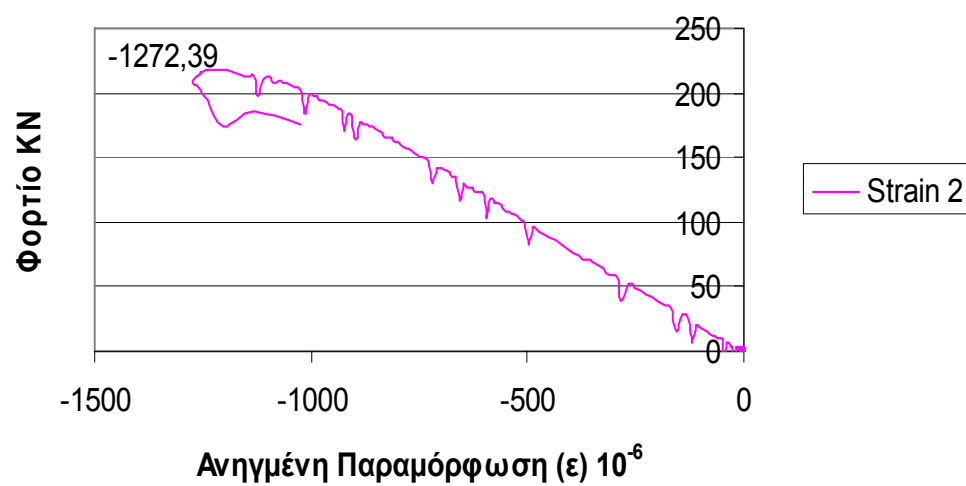
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 002



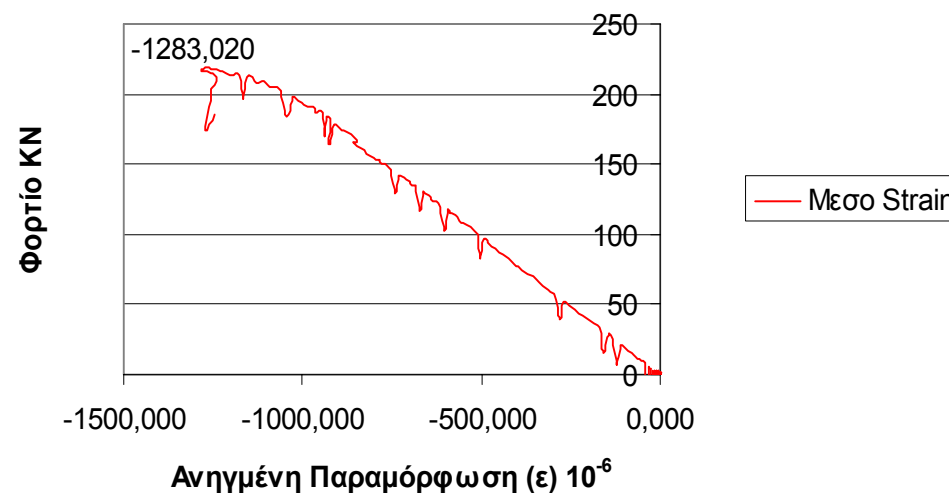
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 002

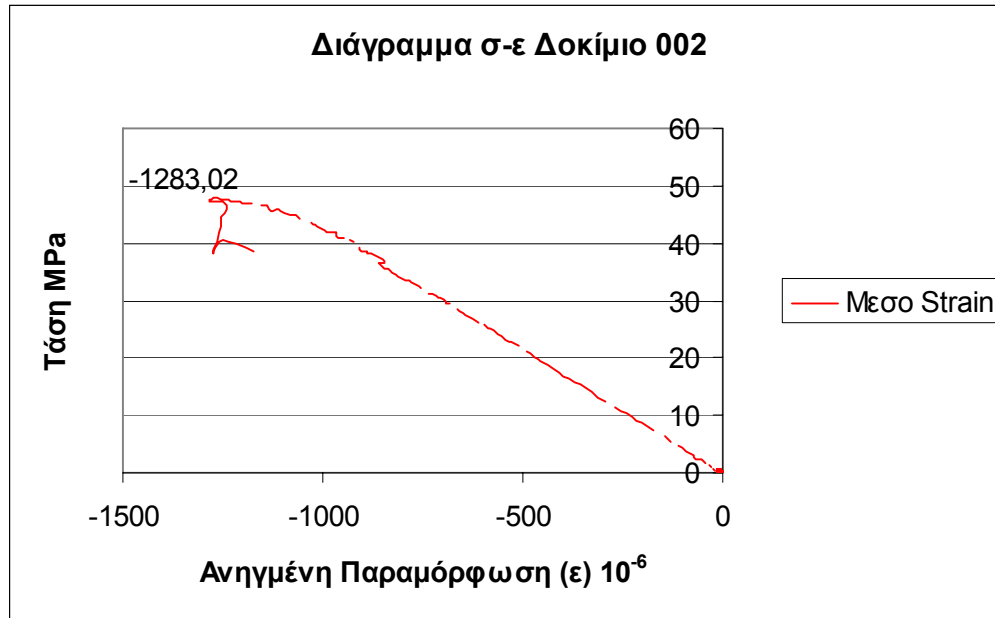


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 002



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 002





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.043 \text{ MPa}/\varepsilon 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9997$.

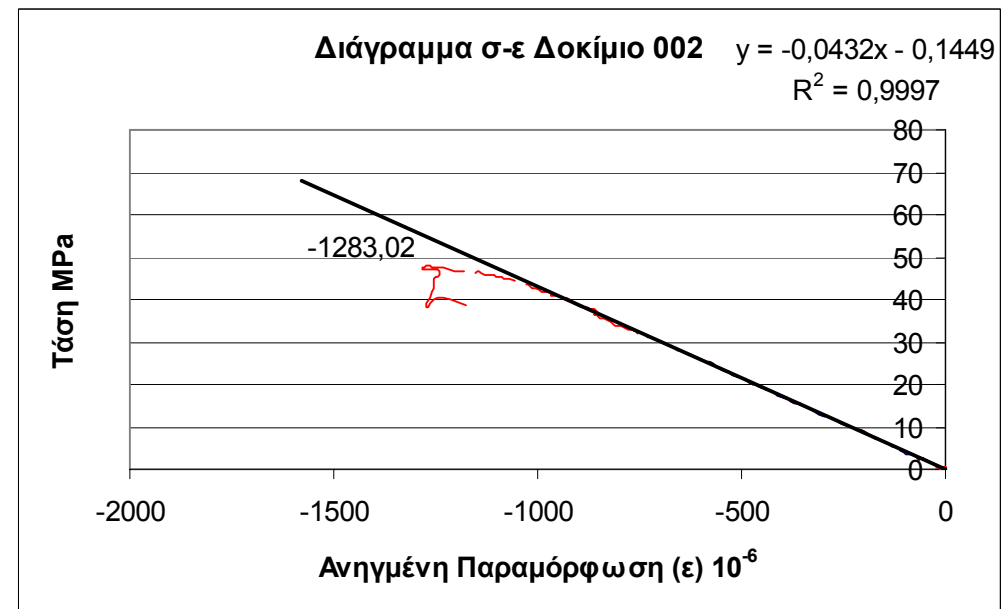
Επομένως:

$$E = 43.2 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

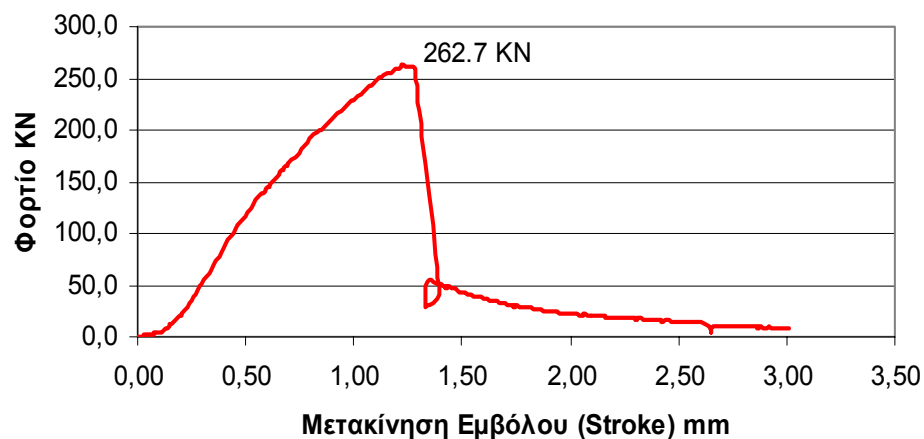
$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 002 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:	003
Σειρά:	1 ^η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.10cm D=7.62cm
Βάρος:	1.600 Kg
Ειδικό Βάρος:	2323,50 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	16 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	3
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	262.7 KN
Αντοχή:	57.61 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	29.2 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	121

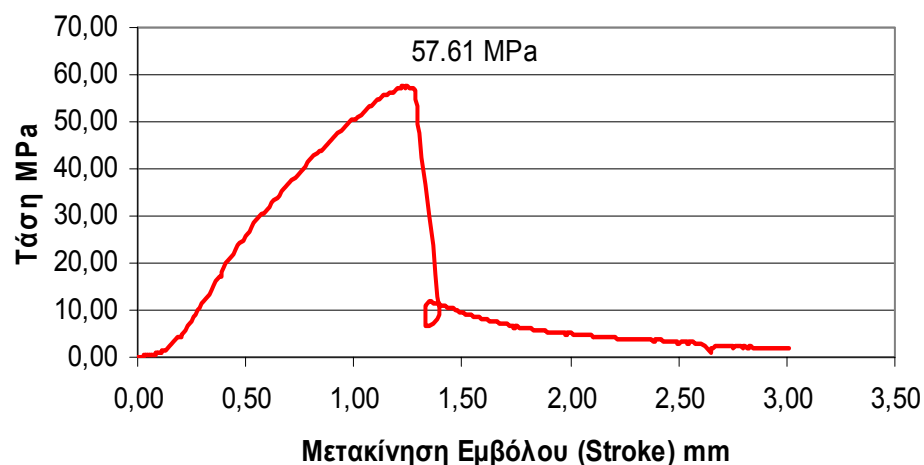
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 003



Δοκίμιο 003 Πριν



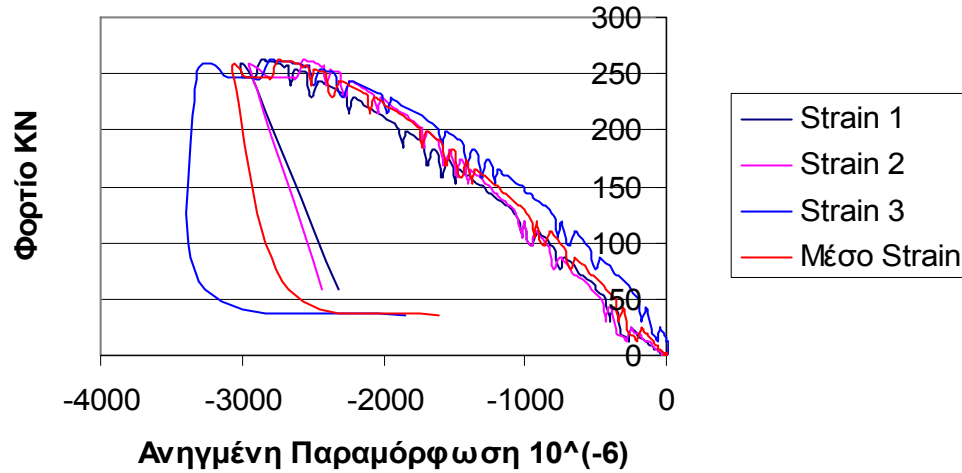
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 003



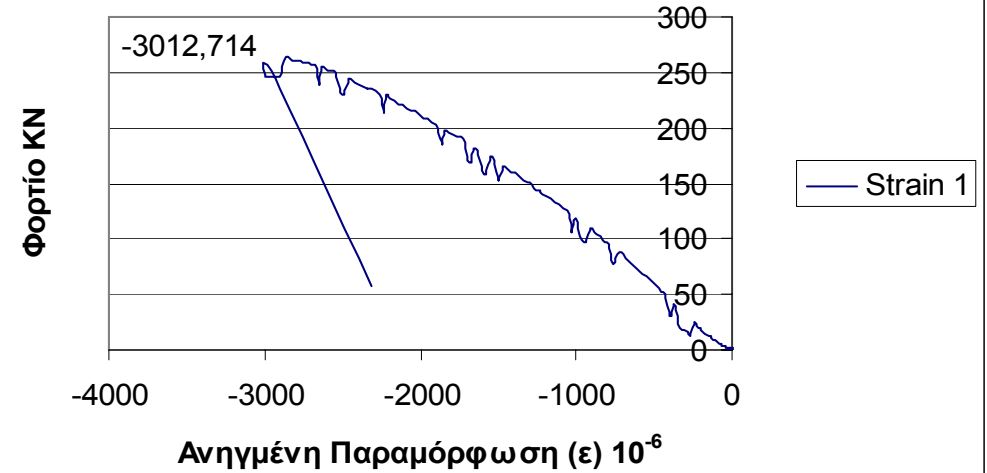
Δοκίμιο 003 Μετά



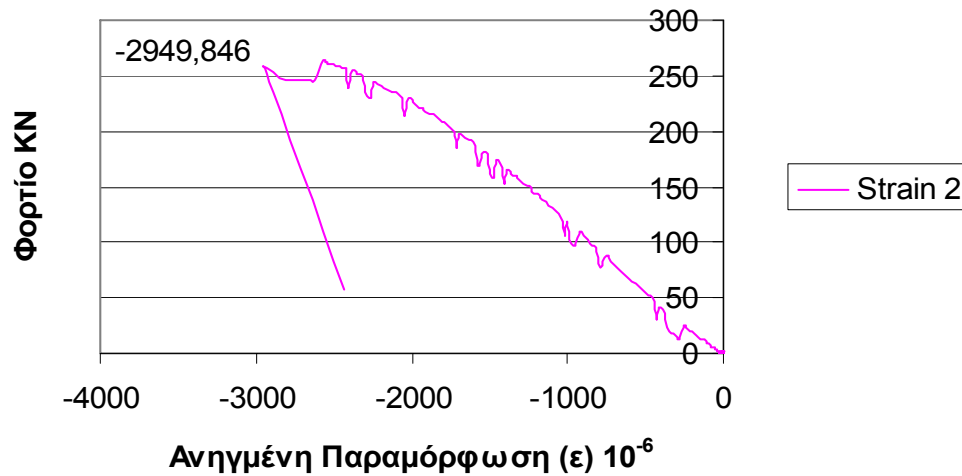
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 003



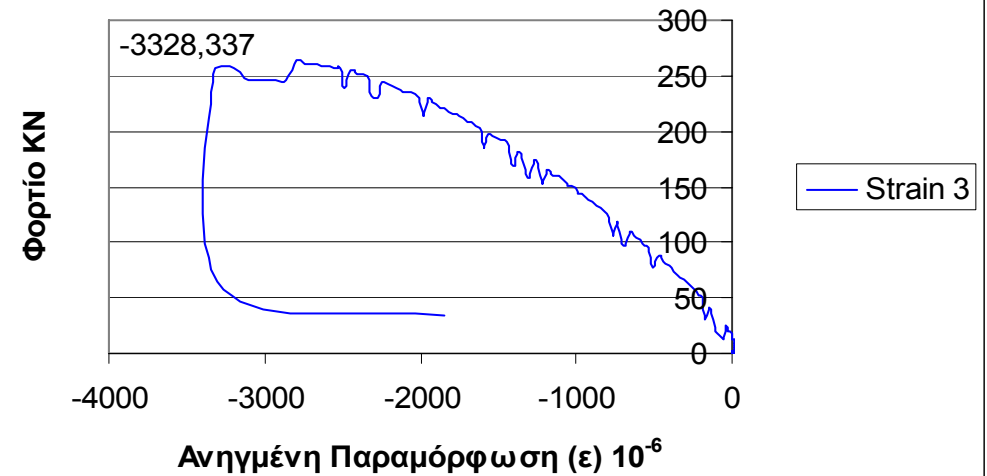
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 003

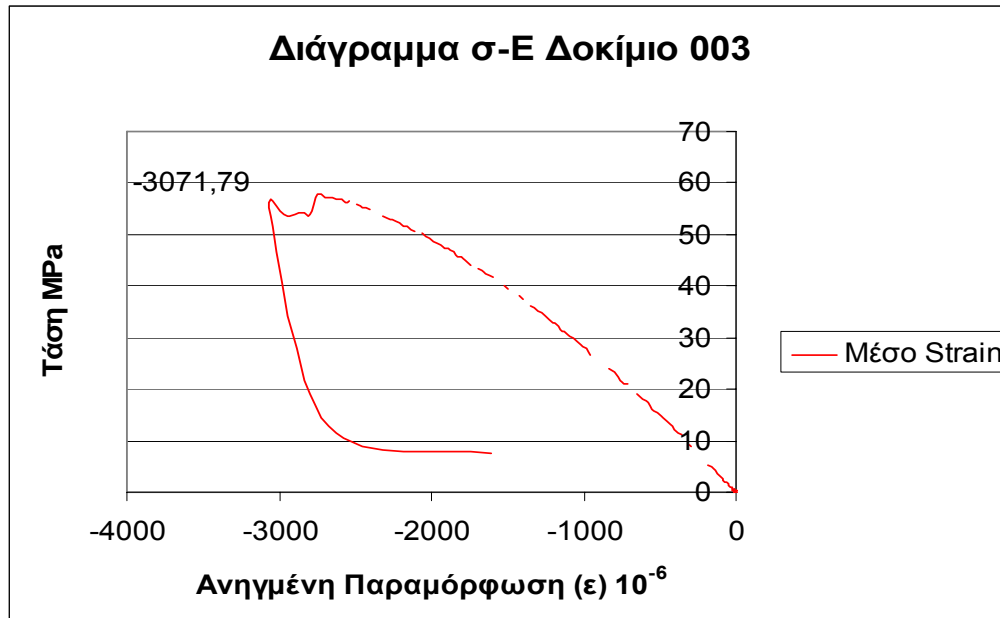


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 003



Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 003





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 003 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

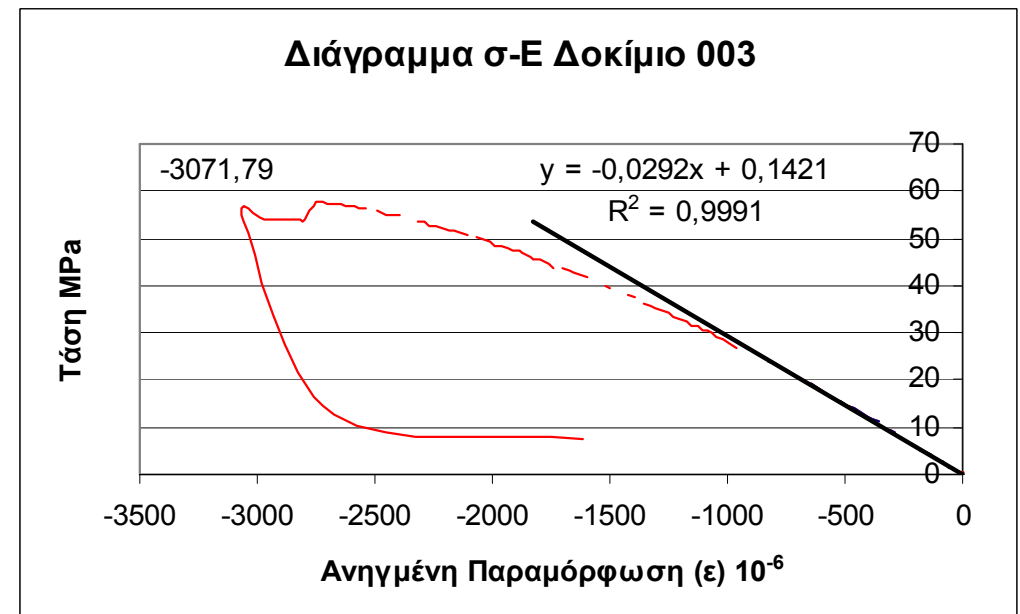
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R². Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.029 MPa/ε 10⁻⁶ και R² = 0.9991.

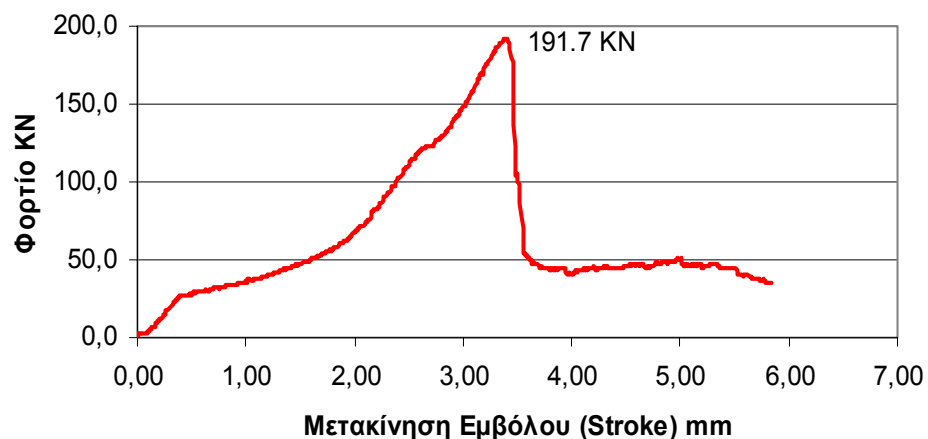
Επομένως:

$$E = 29.2 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:	004
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.24cm D=7.62cm
Βάρος:	1.605 Kg
Ειδικό Βάρος:	2309.35 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	19 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	191.7 KN
Αντοχή:	42.04 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	----
Ηλικία σε Ημέρες:	93

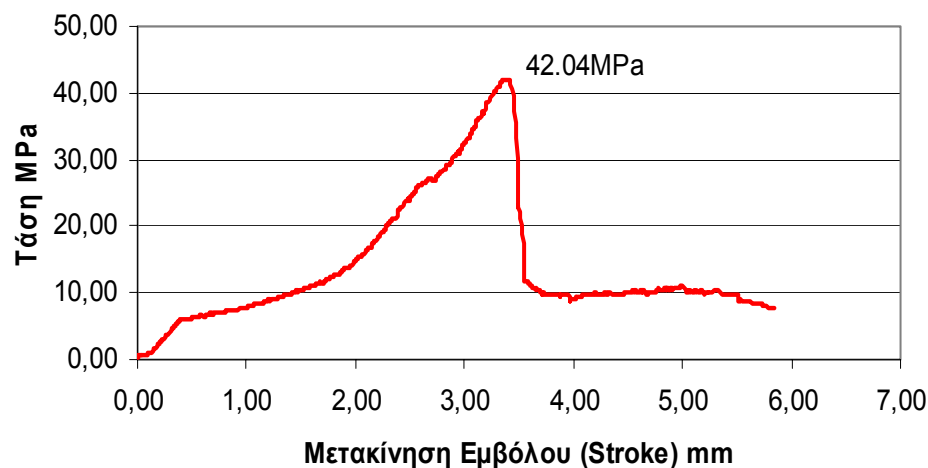
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 004



Δοκίμιο 004 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 004

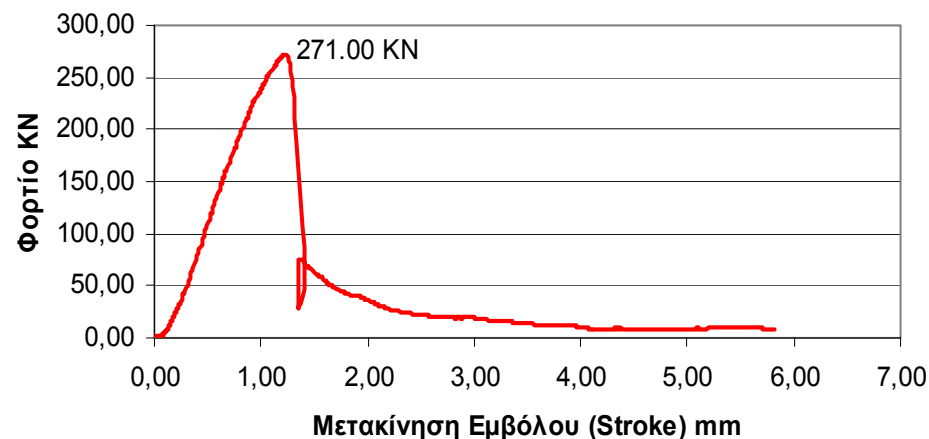


Δοκίμιο 004 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	005
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.24cm D=7.62cm
Βάρος:	1.615 Kg
Ειδικό Βάρος:	2323.74 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	15 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	271.00 KN
Αντοχή:	59.43 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	----
Ηλικία σε Ημέρες:	120

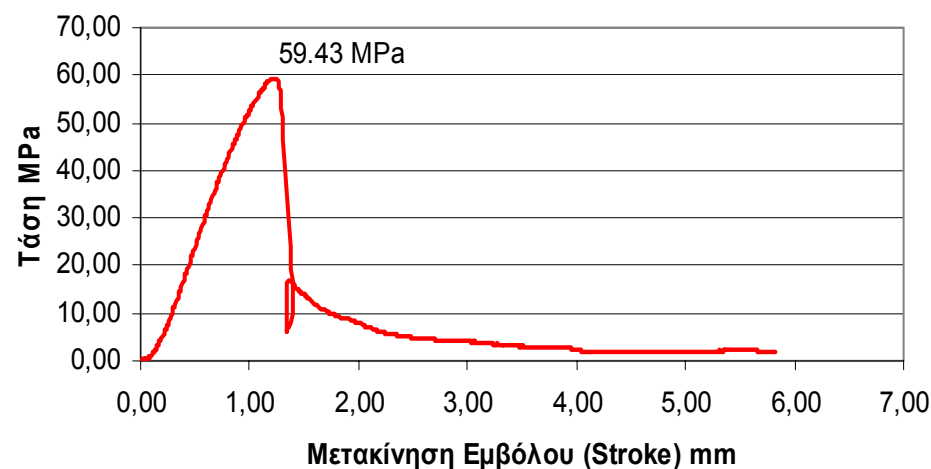
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 005



Δοκίμιο 005 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 005

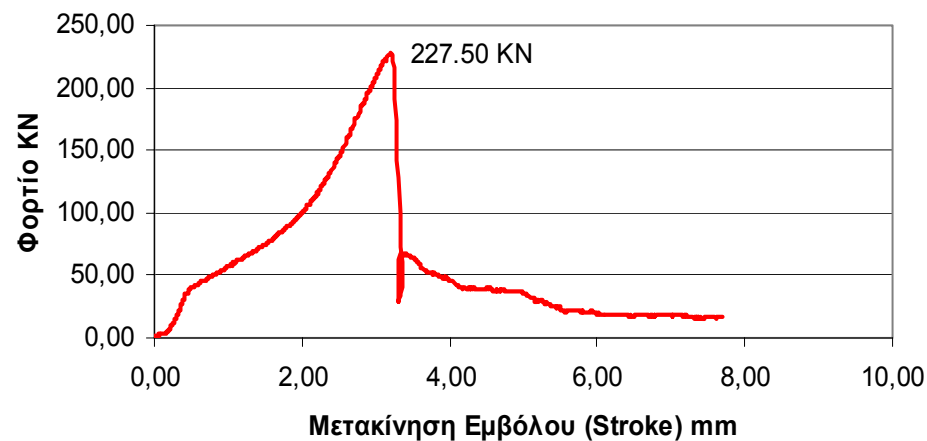


Δοκίμιο 005 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	006
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.24cm D=7.62cm
Βάρος:	1.605 Kg
Ειδικό Βάρος:	2309.35 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	22 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	227.50 KN
Αντοχή:	49.89 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	---
Ηλικία σε Ημέρες:	96

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 006



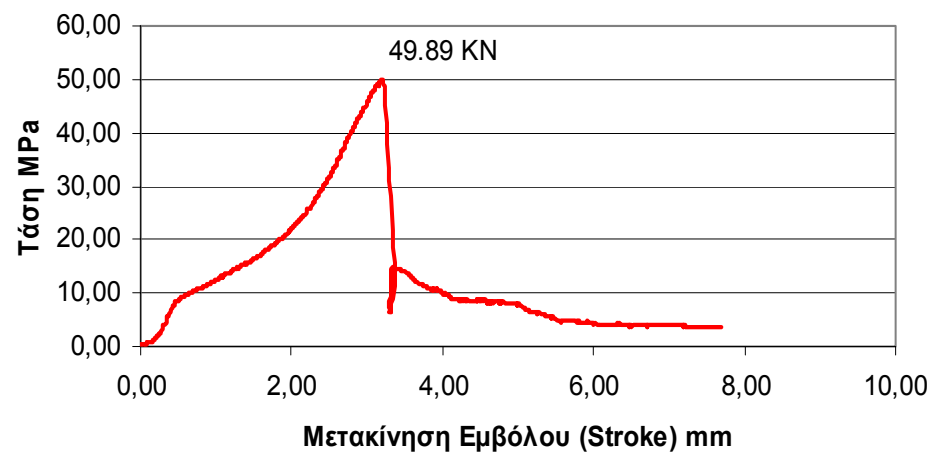
Δοκίμιο 006 Πριν



Δοκίμιο 006 Μετά

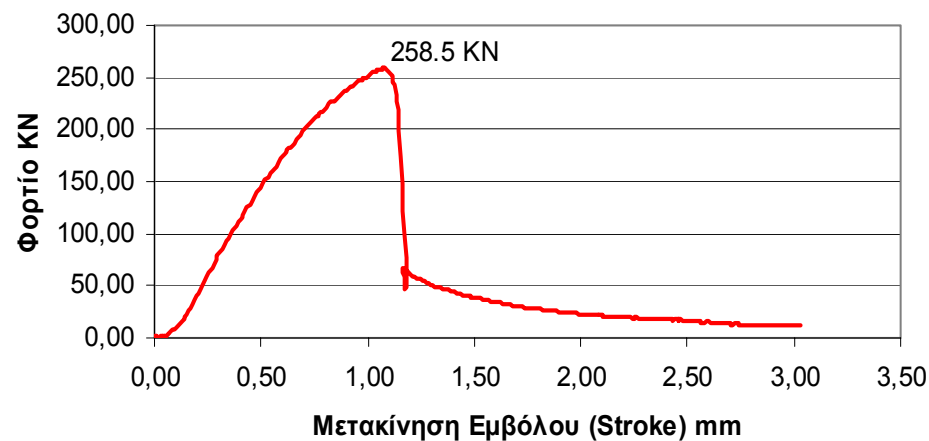


Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 006



Αριθμός Δοκιμίου:	007
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.10cm D=7.62cm
Βάρος:	1.605 Kg
Ειδικό Βάρος:	2330.76 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	16 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	2
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	258.5 KN
Αντοχή:	56.68 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	33.5 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	121

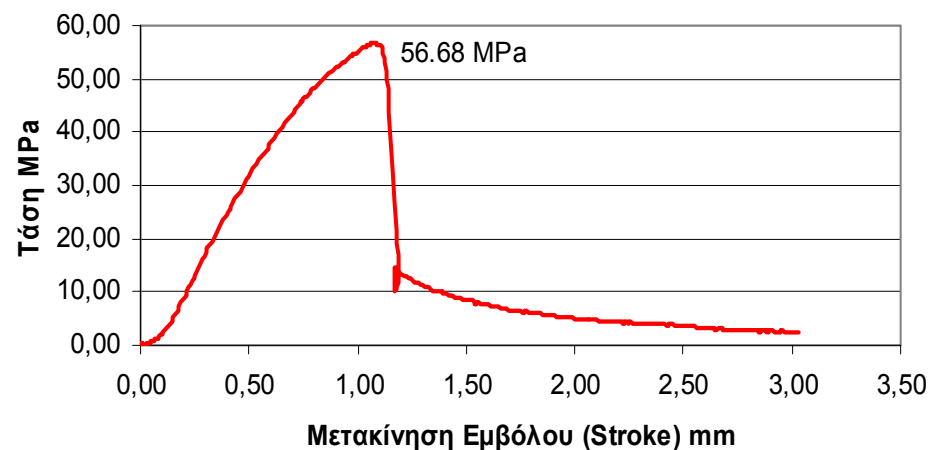
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 007



Δοκίμιο 007 Πριν

N/A

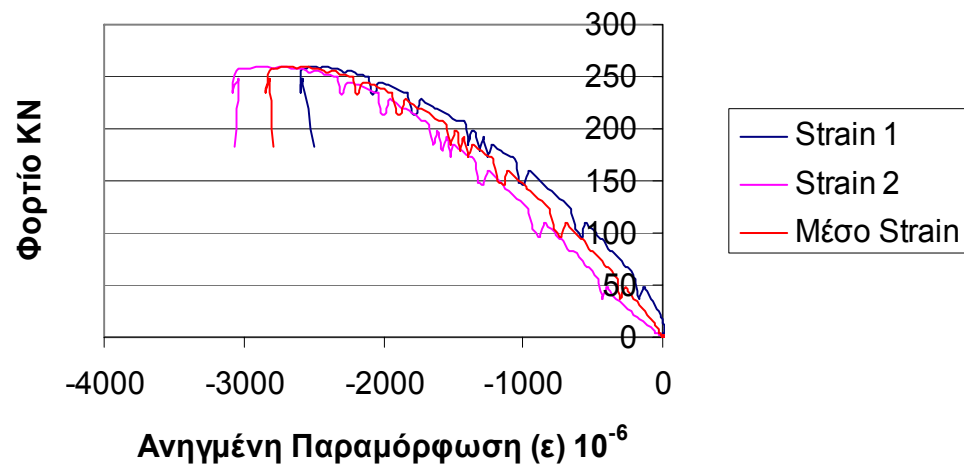
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 007



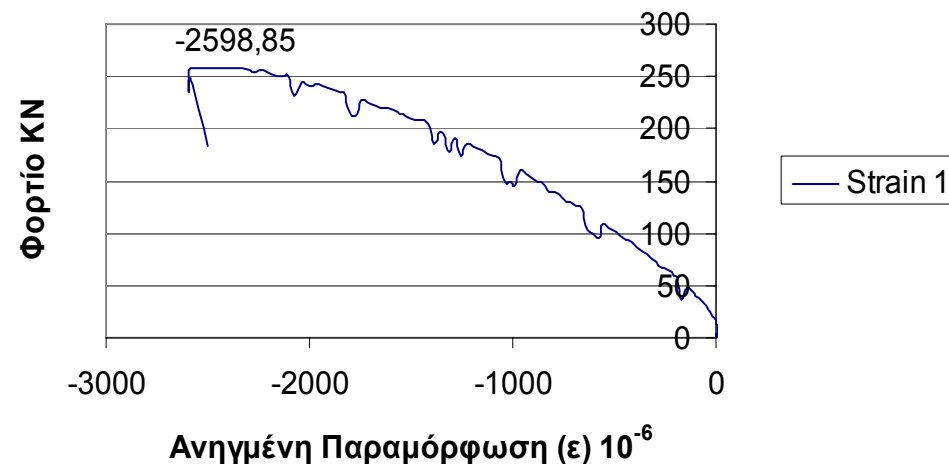
Δοκίμιο 007 Μετά



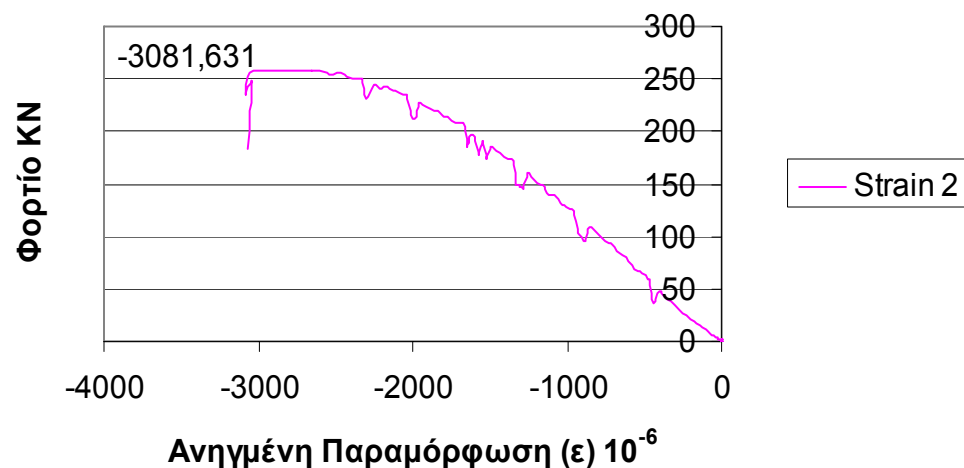
Ένδειξες Strain Gauges Δοκίμιο 007



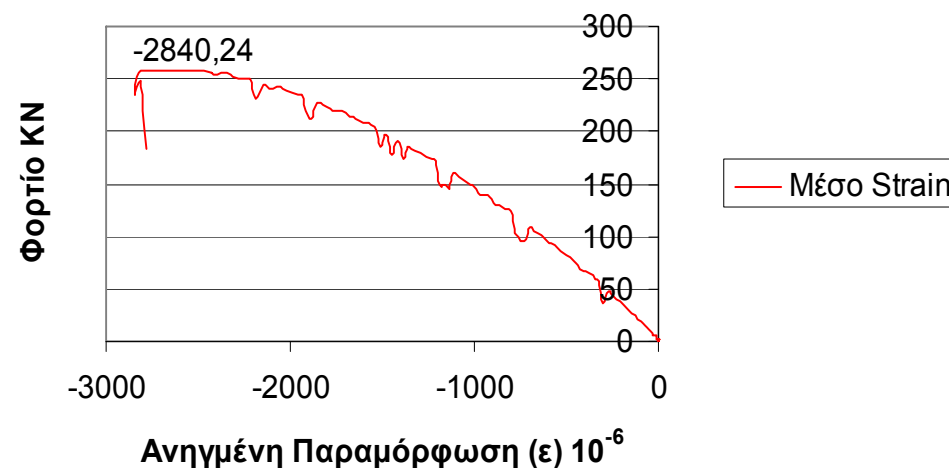
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 007

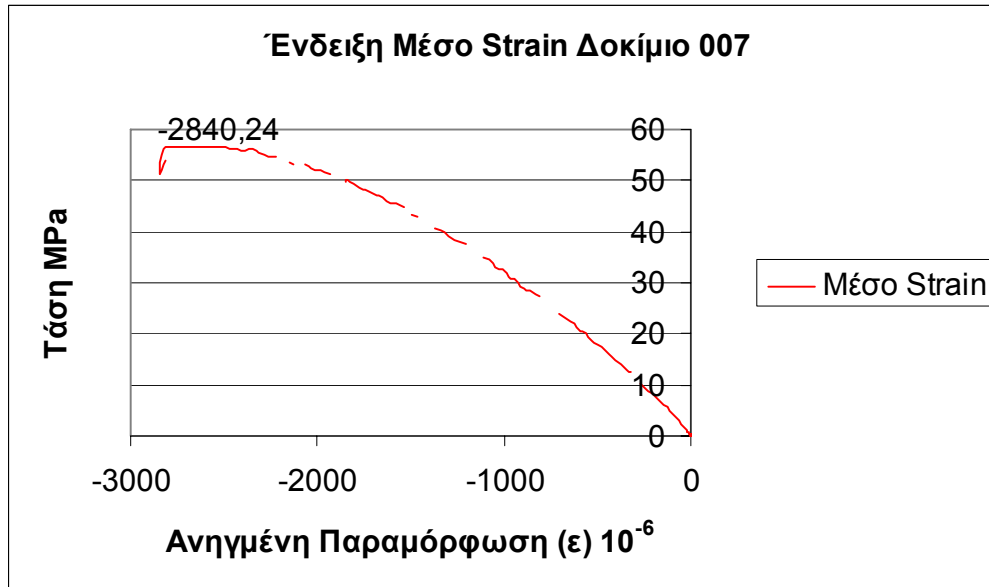


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 007



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 007





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\epsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 007 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

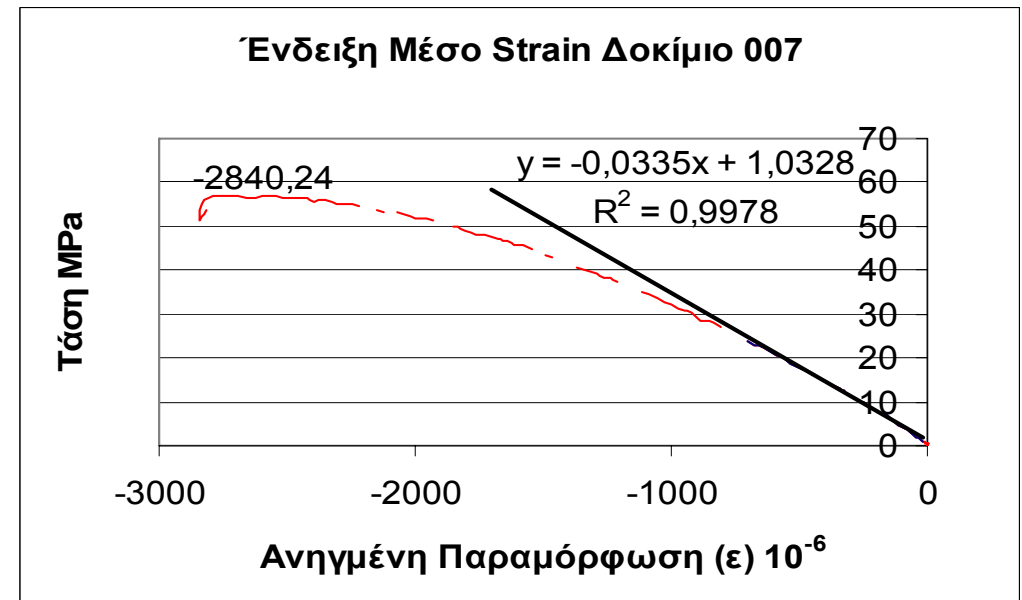
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.033 \text{ MPa}/\epsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9978$.

Επομένως:

$$E = 33.5 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:

008

Σειρά:

1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις:

L = 6in.
D = 3in.

Πραγματικές
Διαστάσεις:

L= 15.10cm
D=7.60cm

Βάρος:

1.610 Kg

Ειδικό Βάρος:

2350.35 Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

17 Δεκεμβρίου
2003

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

16 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

74.40 KN

Αντοχή:

4.13 MPa

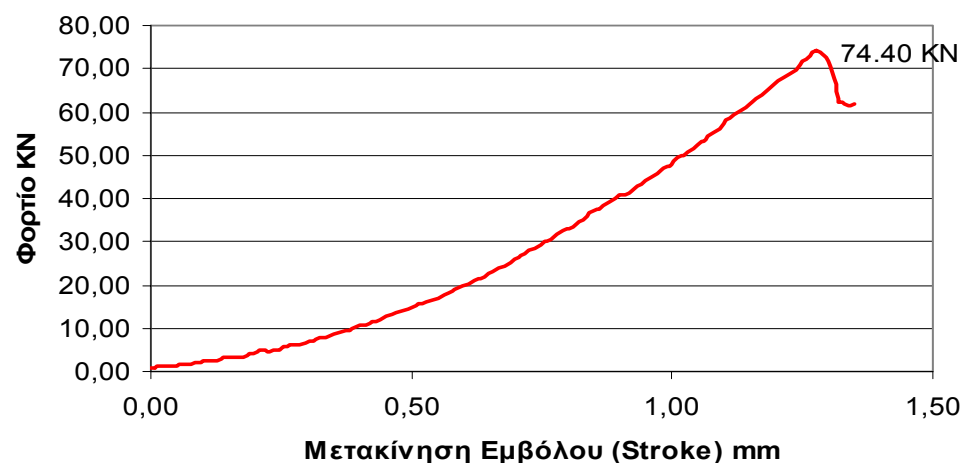
Μέτρο

Ελαστικότητας E

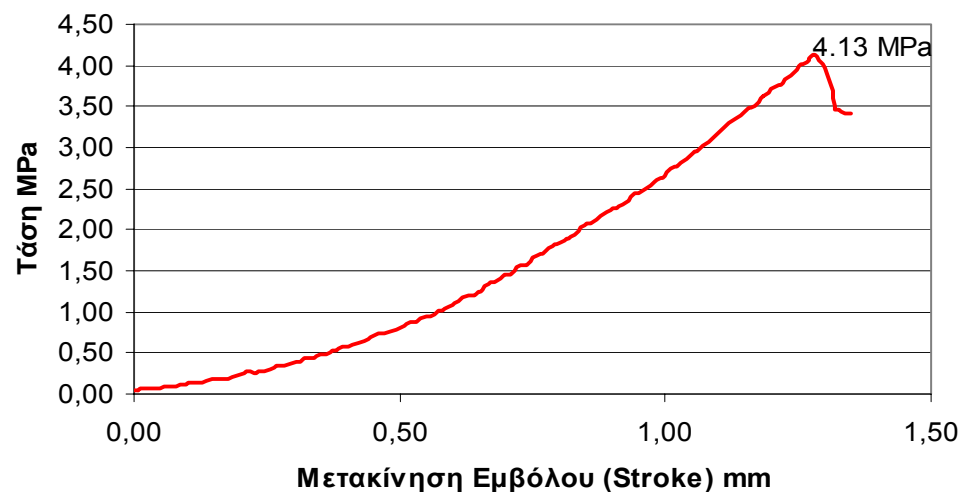
Ηλικία σε Ημέρες:

121

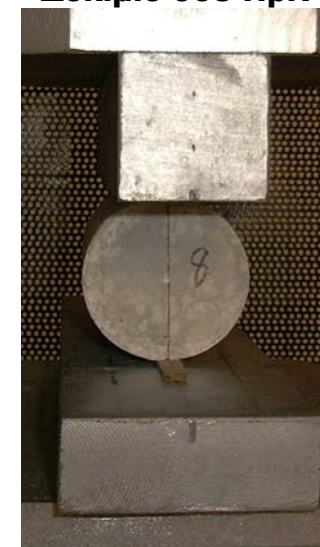
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 008



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 008



Δοκίμιο 008 Πριν

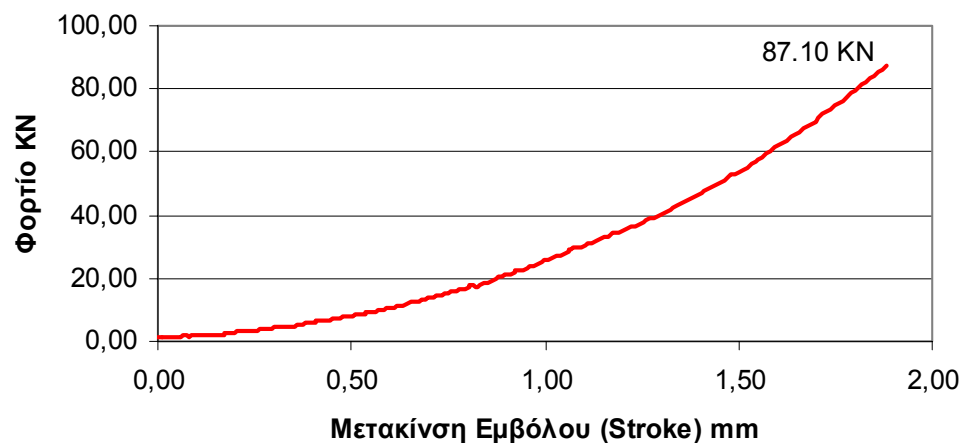


Δοκίμιο 008 Μετά

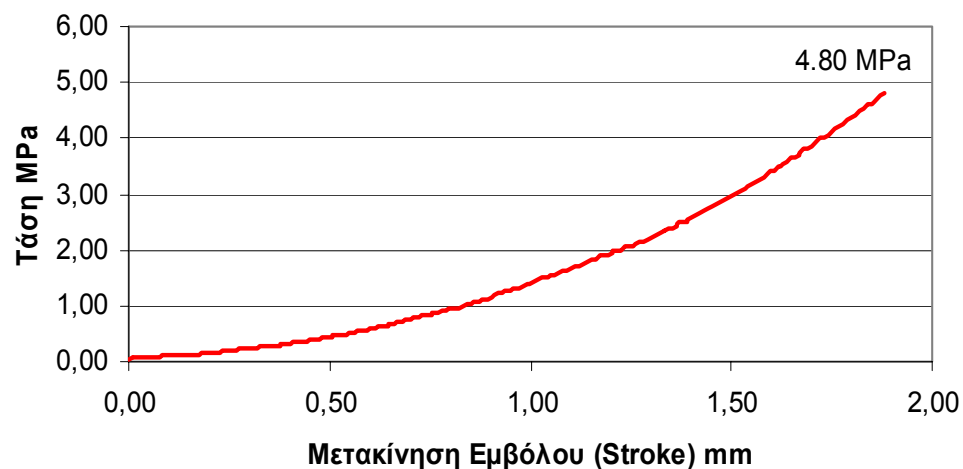
N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	009
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 6in. D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 15.20cm D=7.60cm
Βάρος:	1.605 Kg
Ειδικό Βάρος:	2327.63 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	16 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	87.10 KN
Αντοχή:	4.80 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	121

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 009



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 009



Δοκίμιο 009 Πριν



Δοκίμιο 009 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου: 010

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 6in.
Διαστάσεις: D = 3in.
Πραγματικές L= 15.30cm
Διαστάσεις: D=7.55cm

Βάρος: 1.605 Kg

Ειδικό Βάρος: 2343.15Kg/m³

Ημερομηνία 17 Δεκεμβρίου
Σκυροδέτησης: 2003

Ημερομηνία 15 Μαρτίου 2004
Εξαγωγής από

Δεξαμενή:
Ημερομηνία 15 Απριλίου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

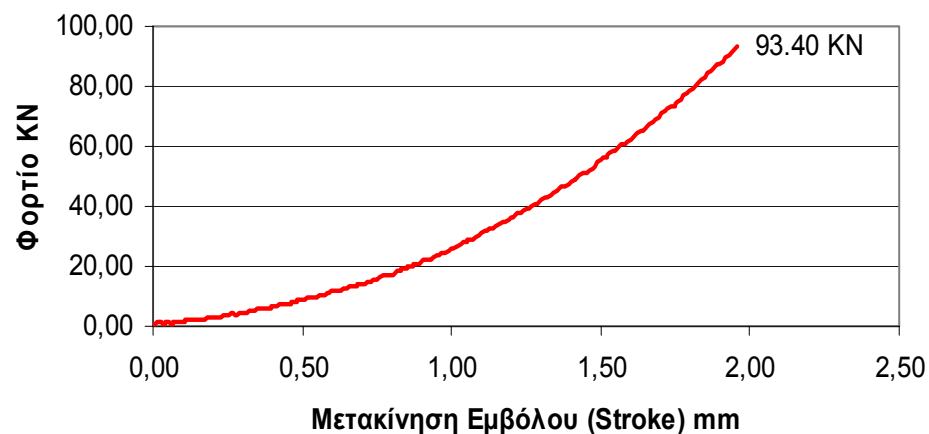
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 93.40 KN

Αντοχή: 5.15 MPa

Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 120

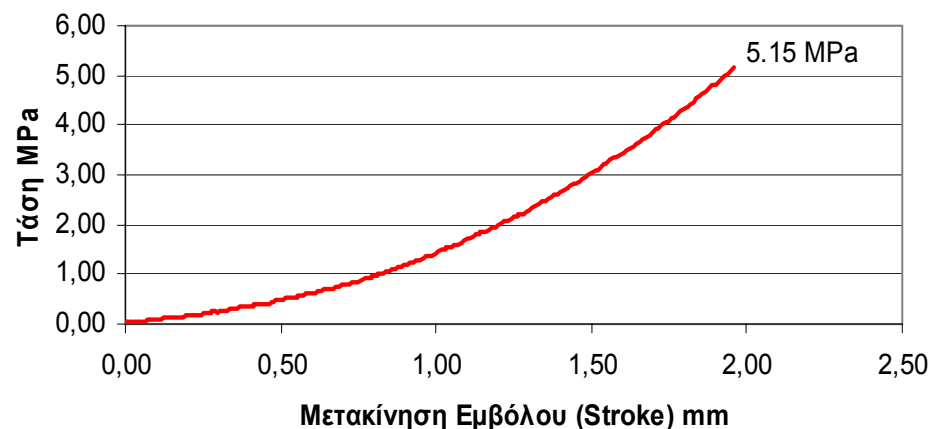
Διάγραμμα Φορτίο Μετακίνησης Δοκίμιο 010



Δοκίμιο 010 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 010



Δοκίμιο 010 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

011

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 15.24cm
D=7.62cm

Βάρος: 1.600 Kg

Ειδικό Βάρος: 2302.16Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 22 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

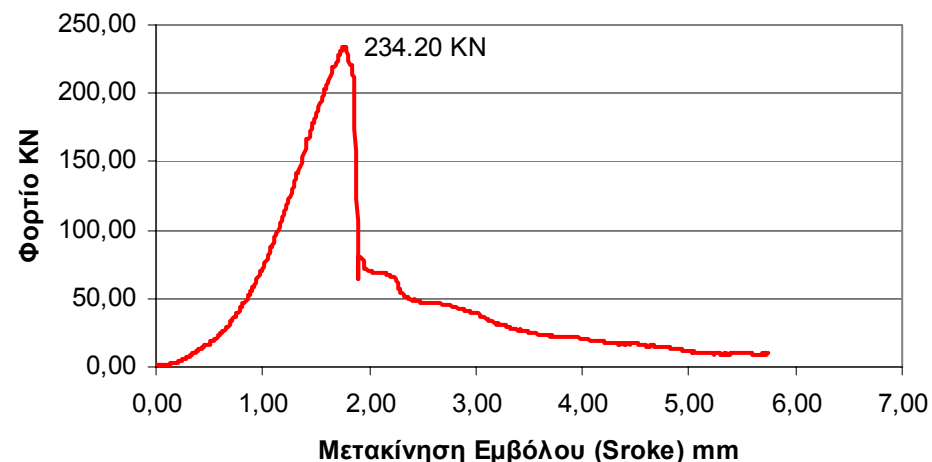
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 234.20 KN

Αντοχή: 51.36 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 127

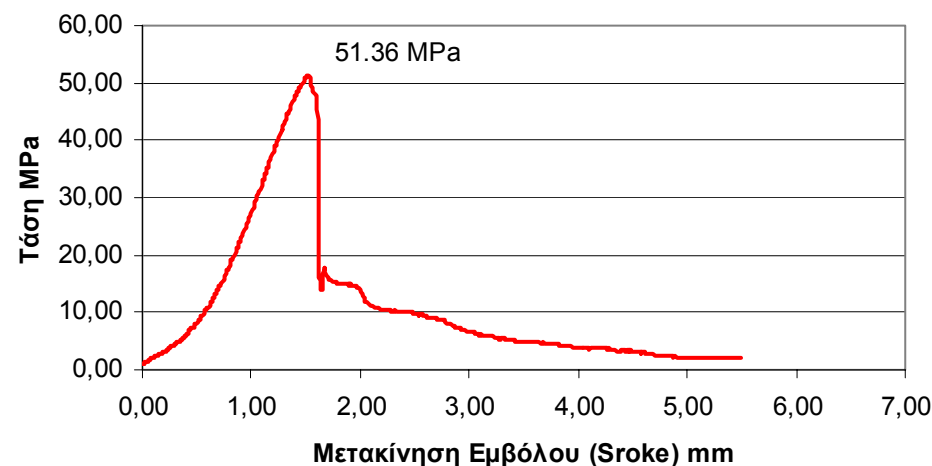
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 011



Δοκίμιο 011 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 011



Δοκίμιο 011 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου: 012

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 6in.
Διαστάσεις: D = 3in.
Πραγματικές L= 15.30cm
Διαστάσεις: D=7.55cm

Βάρος: 1.620 Kg

Ειδικό Βάρος: 2365.05Kg/m³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης: 15 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

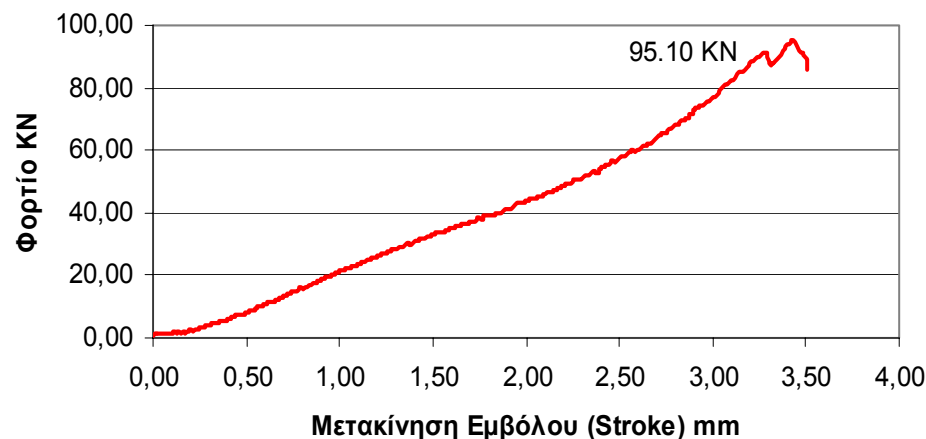
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 95.10 KN

Αντοχή: 5.24 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 120

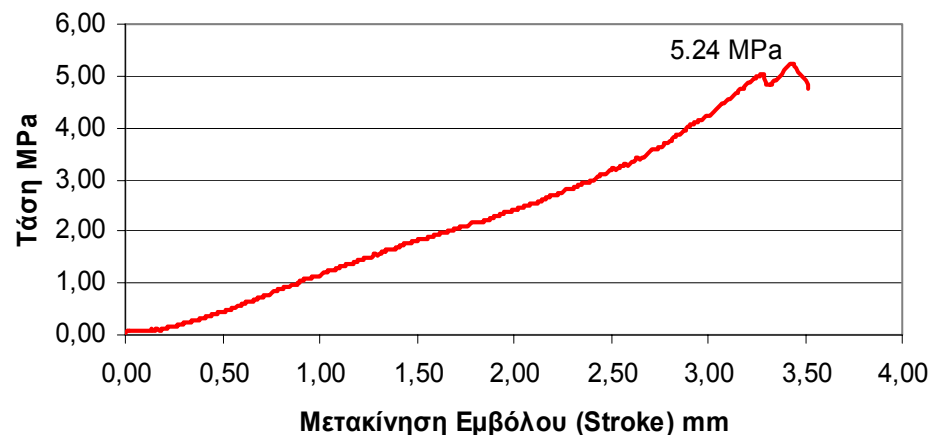
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 012



Δοκίμιο 012 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 012



Δοκίμιο 012 Μετά

N/A

Πειραματική Διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος

Κάνος Αργύρης

Αριθμός Δοκιμίου:

013

Σειρά:

1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.30cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.615 Kg

Ειδικό Βάρος:

2357.75Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

17 Δεκεμβρίου
2003

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

15 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

64.20 KN

Αντοχή:

3.54 MPa

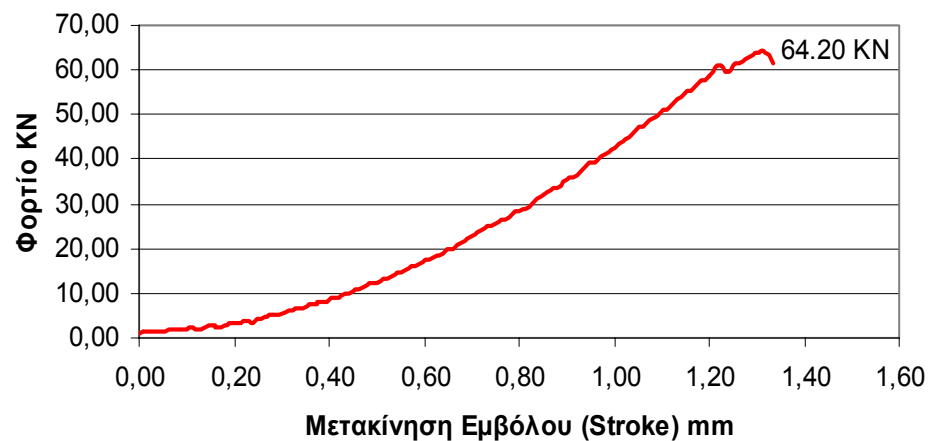
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

120

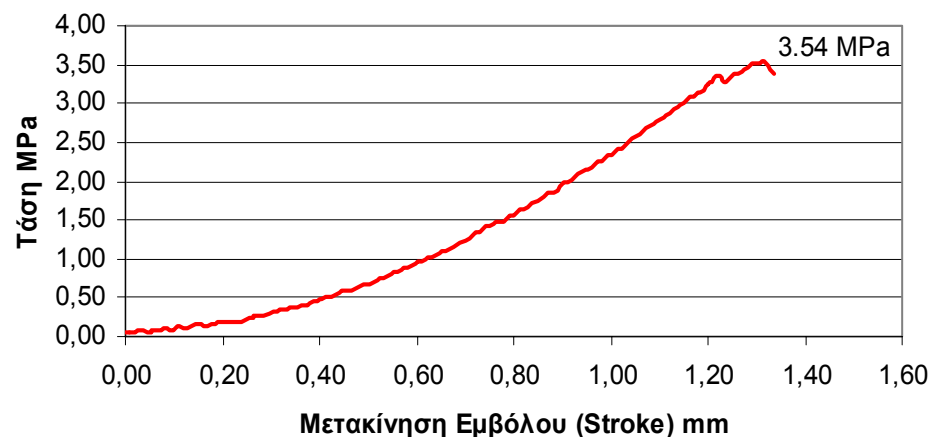
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 013



Δοκίμιο 013 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 013



Δοκίμιο 013 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

015

Σειρά:

1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 8in.

Διαστάσεις:

D = 4in.

Πραγματικές

L= 20.32cm

Διαστάσεις:

D=10.16cm

Βάρος:

3.840 Kg

Ειδικό Βάρος:

2330.94 Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

17 Δεκεμβρίου
2003

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

22 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

2

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

440.0 kN

Αντοχή:

54.27 MPa

Μέτρο

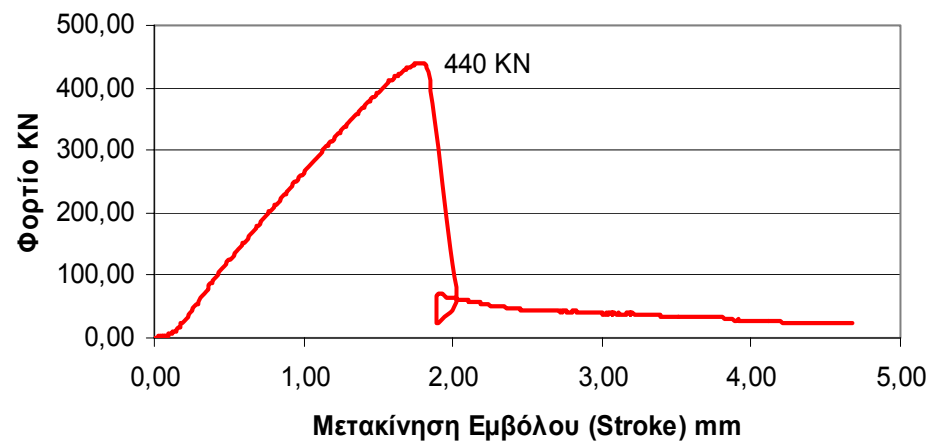
Ελαστικότητας E

33.4 GPa

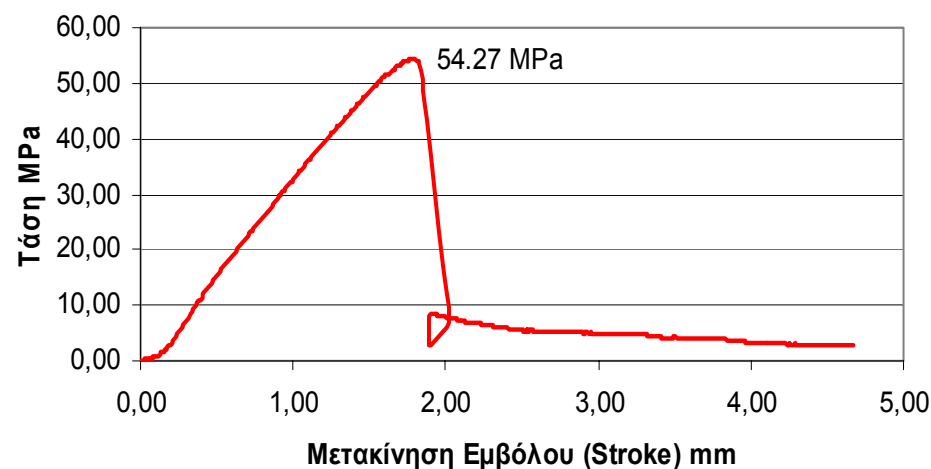
Ηλικία σε Ημέρες:

96

Διάγραμμα φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 015



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 015



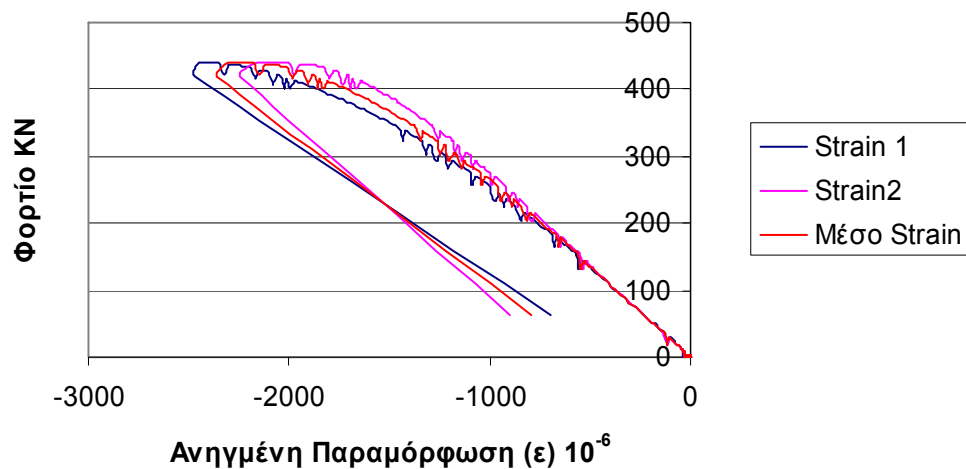
Δοκίμιο 015 Πριν

N/A

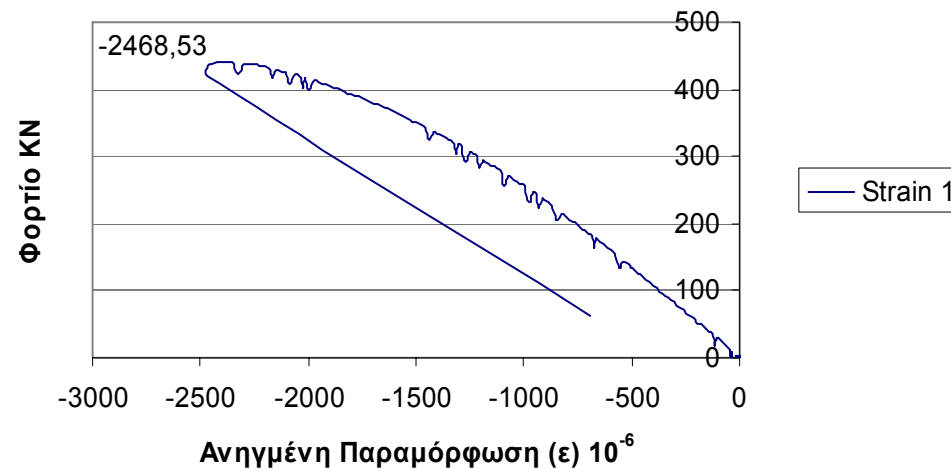
Δοκίμιο 015 Μετά



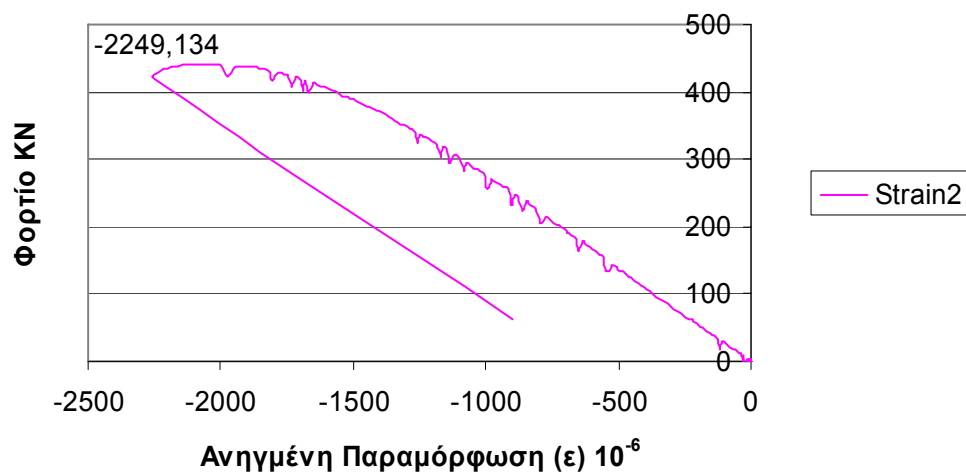
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 015



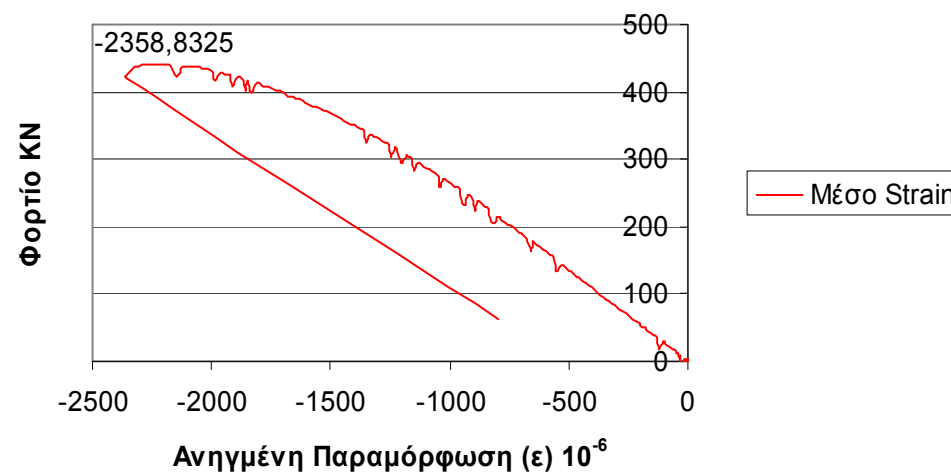
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 015

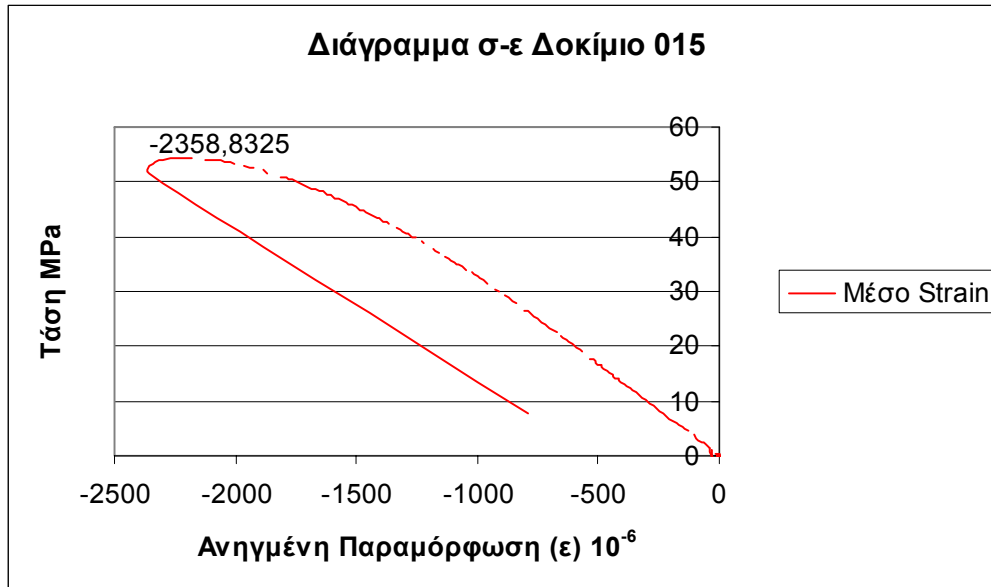


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 015



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 015





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 015 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

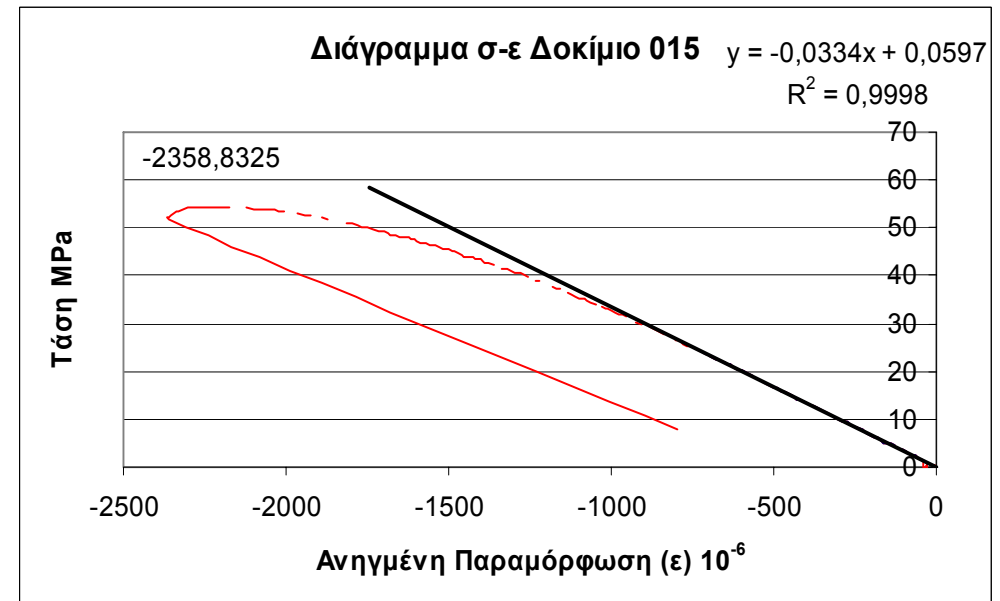
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.033 \text{ MPa}/\varepsilon 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9998$.

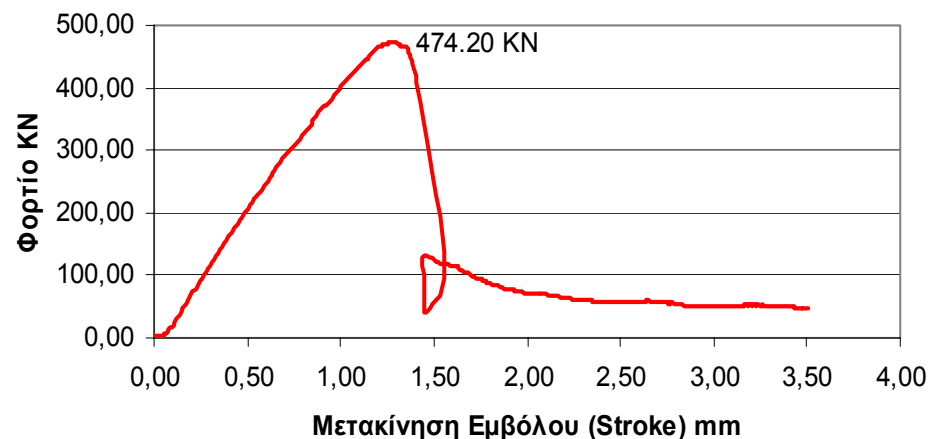
Επομένως:

$$E = 33.4 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:	016
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.32cm D=10.16cm
Βάρος:	3.840 Kg
Ειδικό Βάρος:	2330.94 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	21 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Ολίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	3
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	474.20 KN
Αντοχή:	58.49 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	30.4 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	126

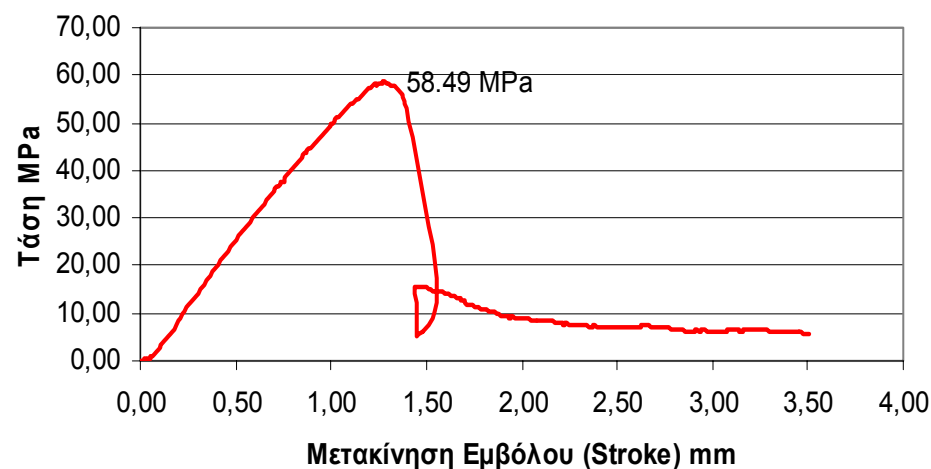
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 016



Δοκίμιο 016 Πριν

N/A

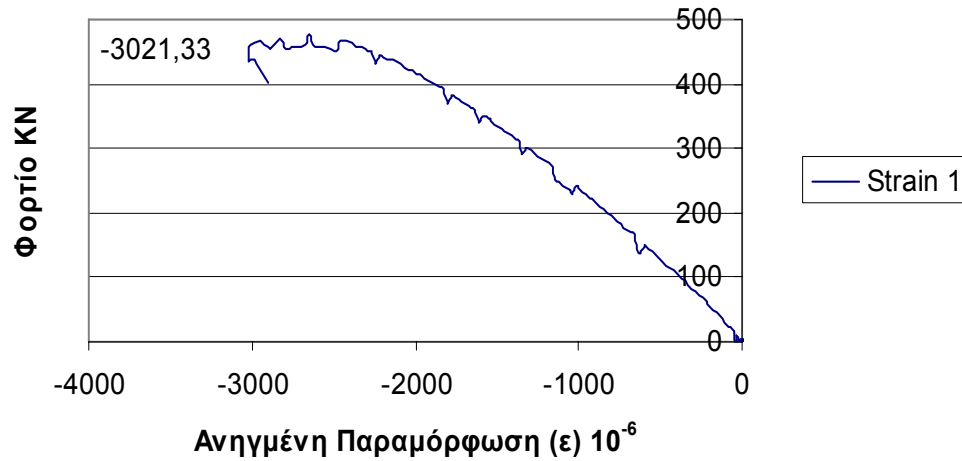
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 016



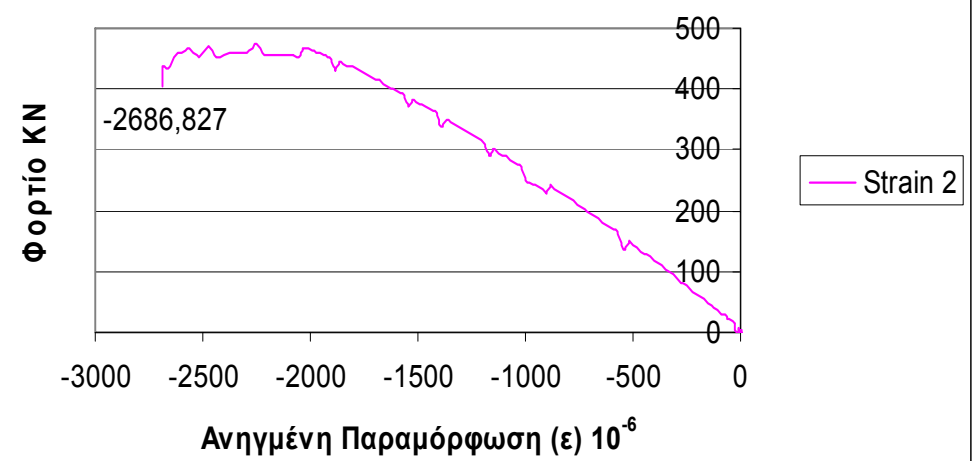
Δοκίμιο 016 Μετά



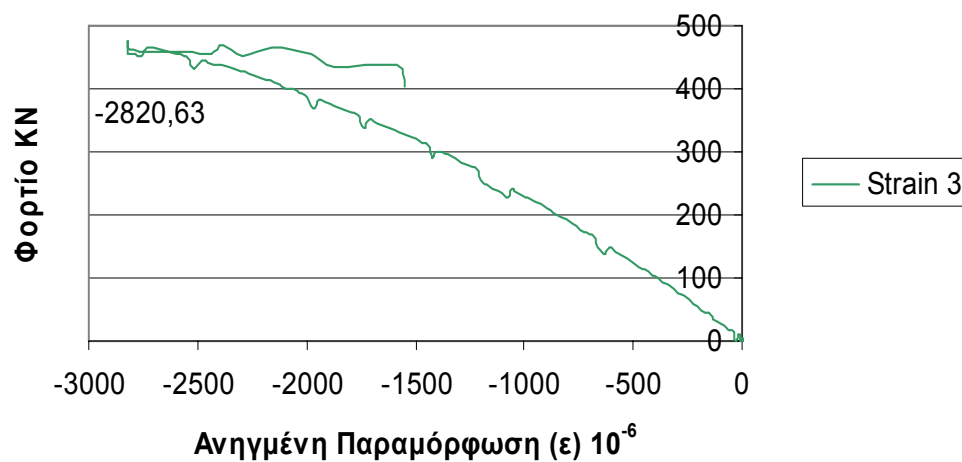
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 016



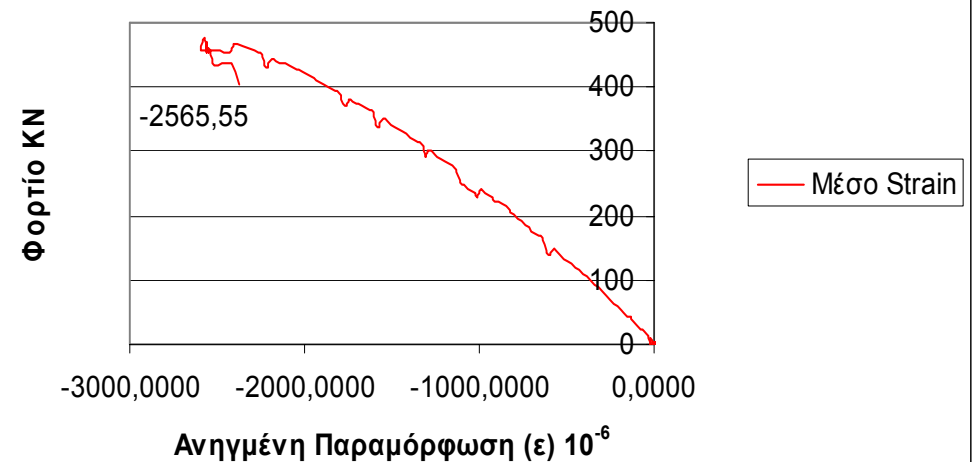
Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 016

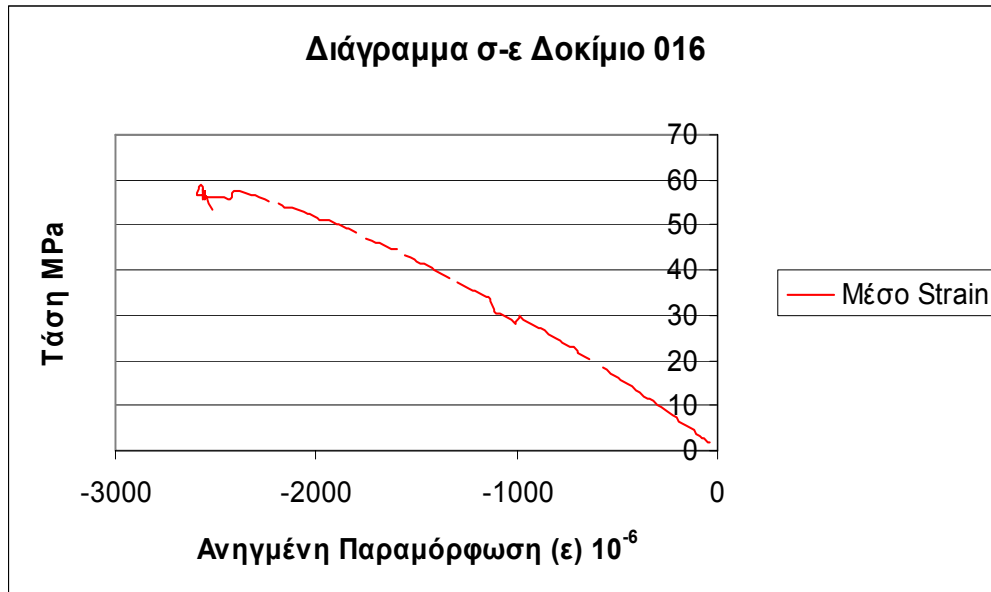


Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 016



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 016





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 016 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

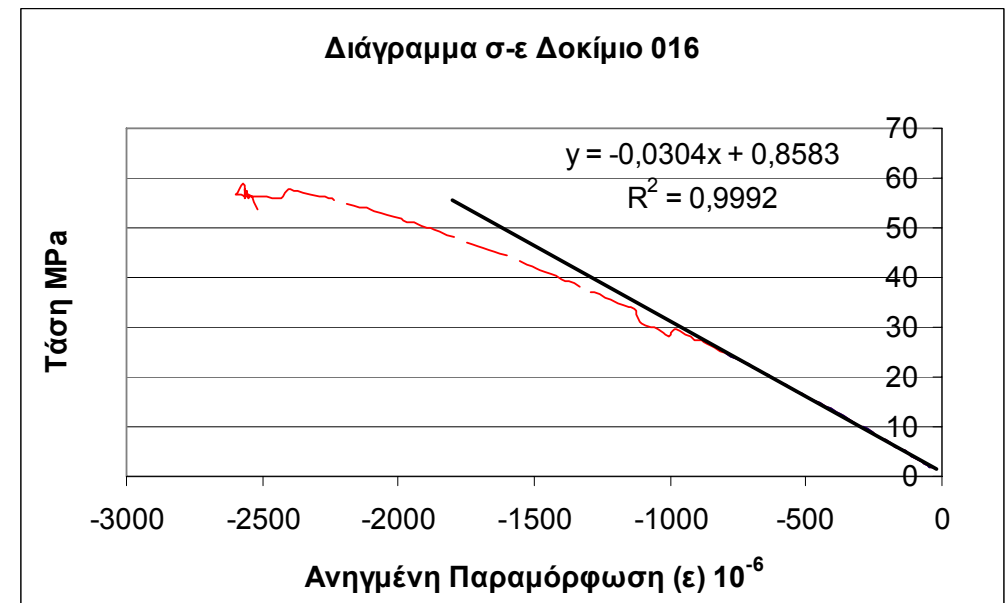
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.030 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9992$.

Επομένως:

$$E = 30.4 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:

017

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 8in.
D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 20.32cm
D=10.16cm

Βάρος: 3.835 Kg

Ειδικό Βάρος: 2327.90 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 22 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

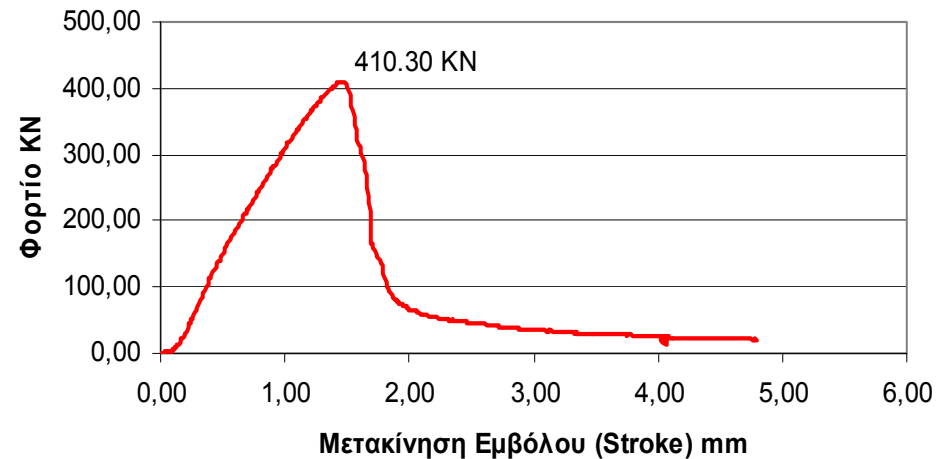
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 410.30 KN

Αντοχή: 50.61 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες: 96

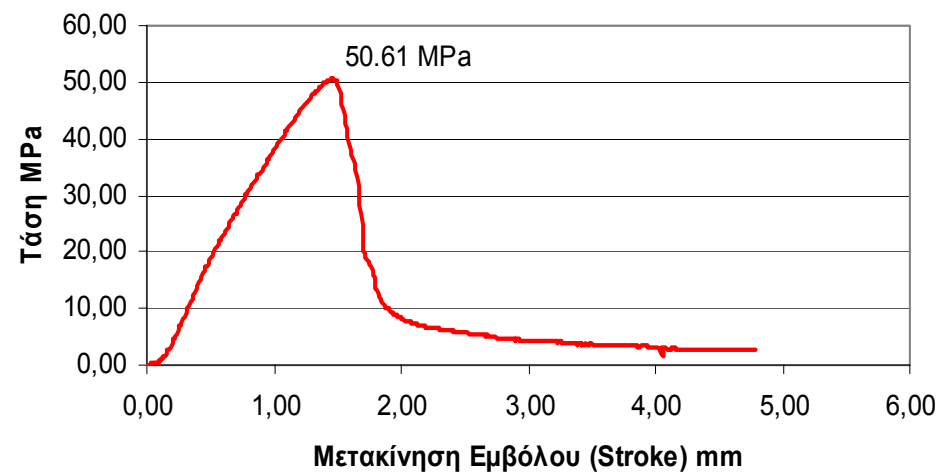
Διάγραμμα Φορτίο Μετακίνησης Δοκίμιο 017



Δοκίμιο 017 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 017

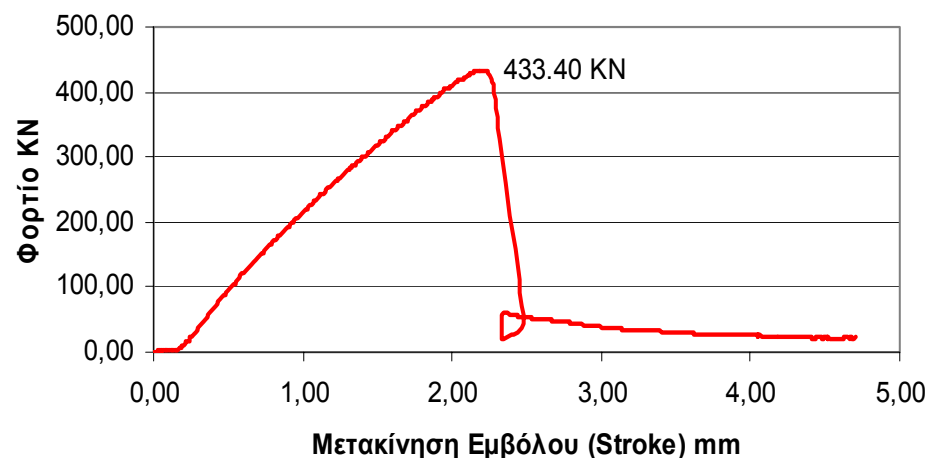


Δοκίμιο 017 Μετά

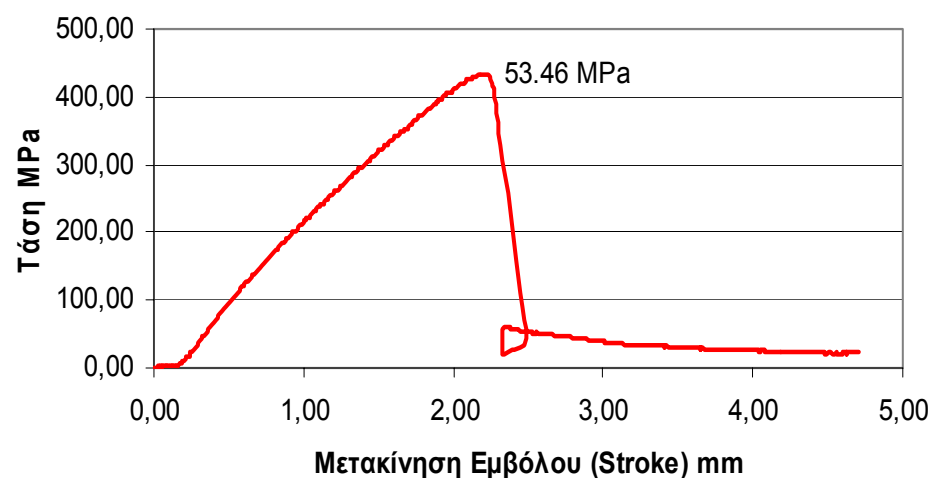


Αριθμός Δοκιμίου:	018
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.32cm D=10.16cm
Βάρος:	3.865 Kg
Ειδικό Βάρος:	2346.11 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	22 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	433.40 KN
Αντοχή:	53.46 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	
Ηλικία σε Ημέρες:	96

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 018



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 018



Δοκίμιο 018 Πριν

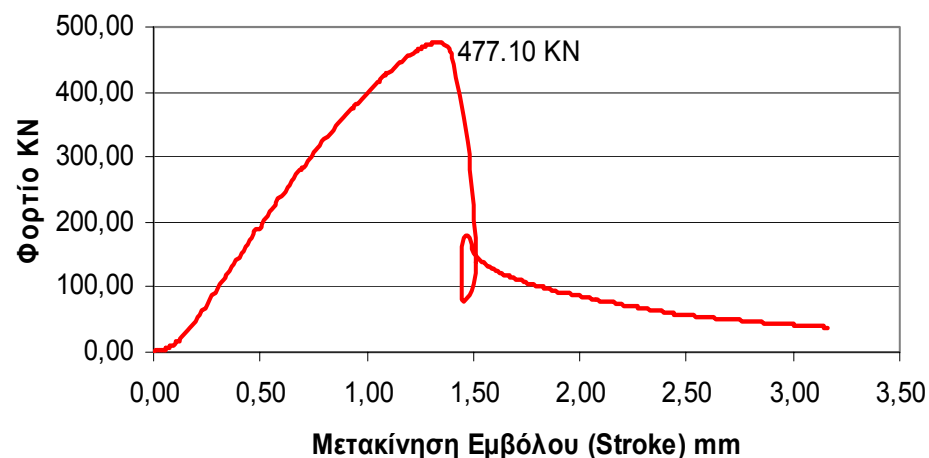


Δοκίμιο 018 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	019
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.32cm D=10.16cm
Βάρος:	3.850 Kg
Ειδικό Βάρος:	2337.01 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	20 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	2
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	477.10 KN
Αντοχή:	58.85 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	56.4 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	125

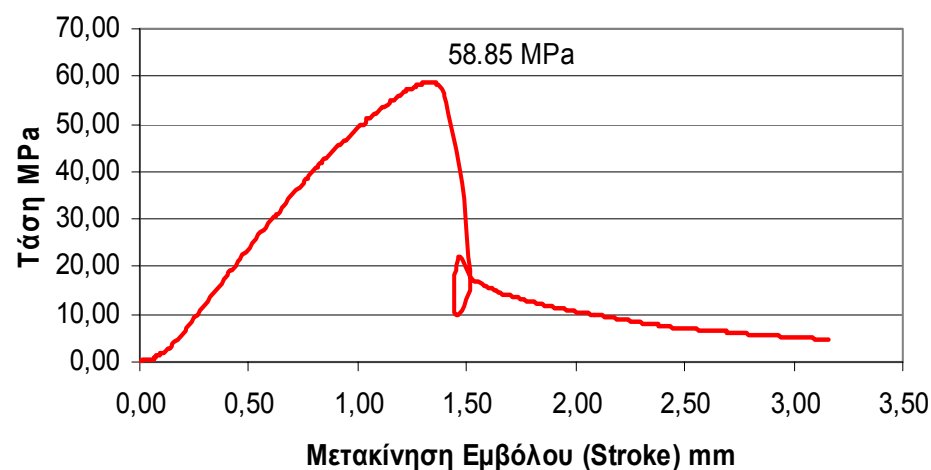
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 019



Δοκίμιο 019 Πριν



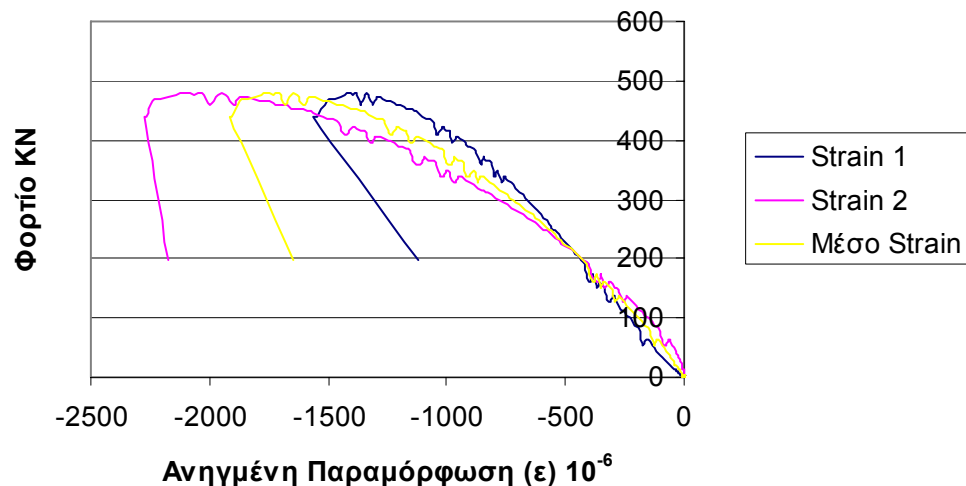
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 019



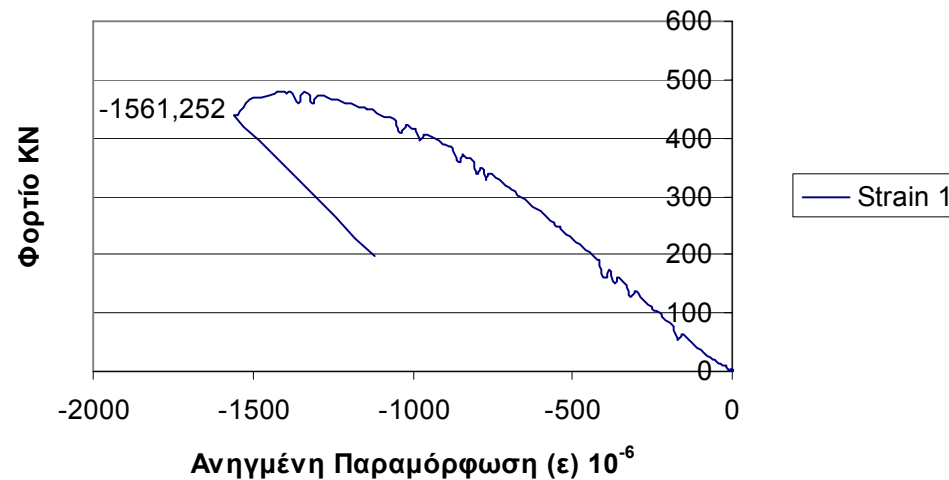
Δοκίμιο 019 Μετά



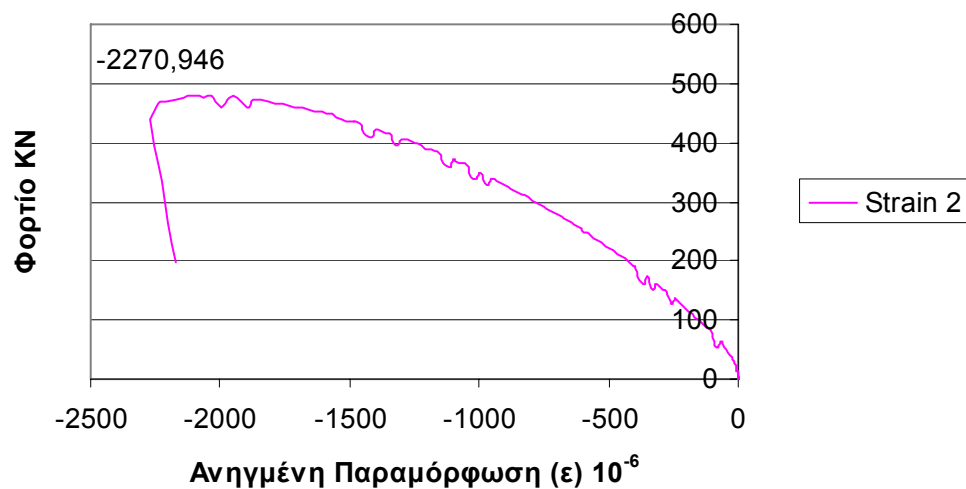
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 019



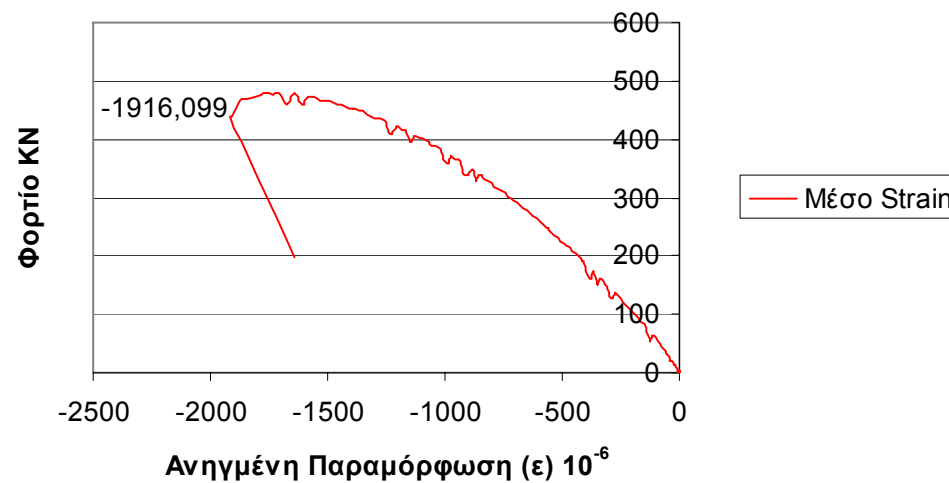
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 019

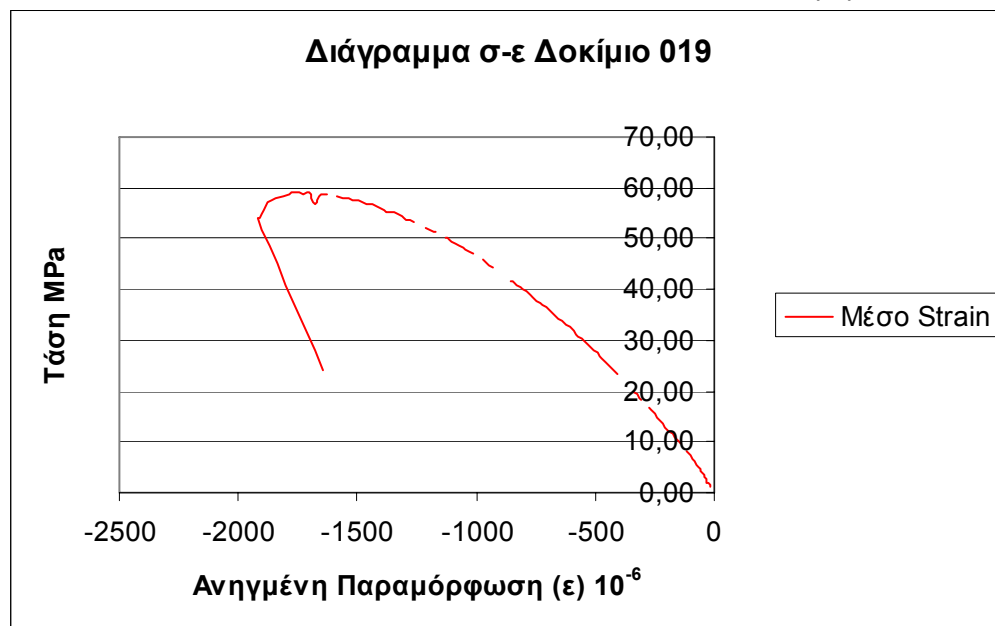


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 019



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 019





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 019 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

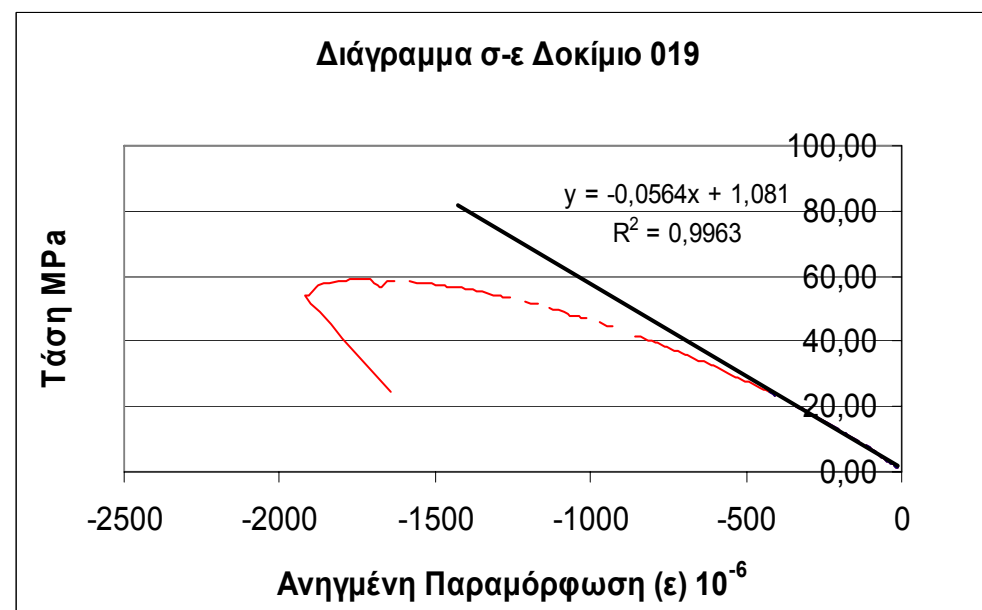
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.056 \text{ MPa}/\varepsilon 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9963$.

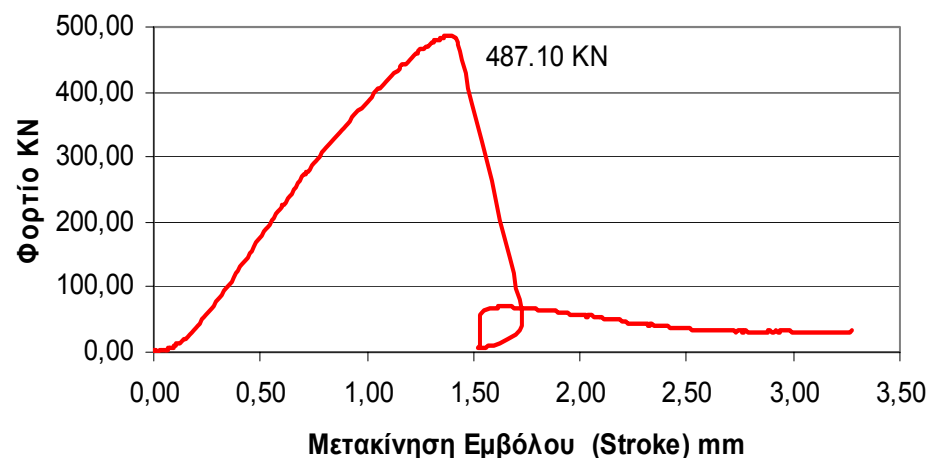
Επομένως:

$$E = 56.4 \text{ GPa}$$

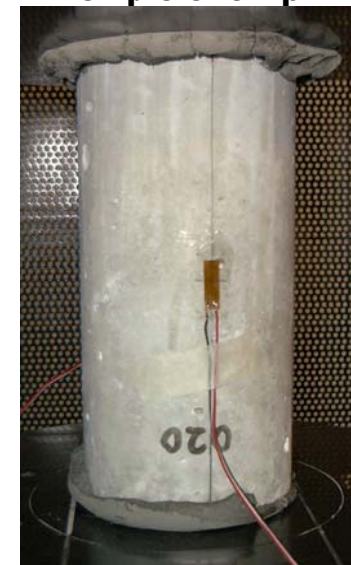


Αριθμός Δοκιμίου:	020
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.32cm D=10.16cm
Βάρος:	3.835 Kg
Ειδικό Βάρος:	2327.90 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	21 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	2
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	487.10 KN
Αντοχή:	60.08 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	35.5 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	126

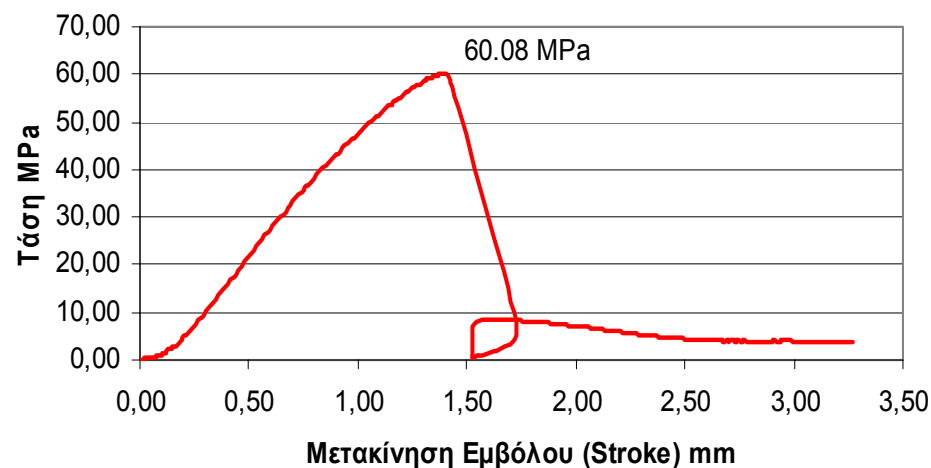
Διάγραμμα Φορτίο Μετακίνησης Δοκίμιο 020



Δοκίμιο 020 Πριν



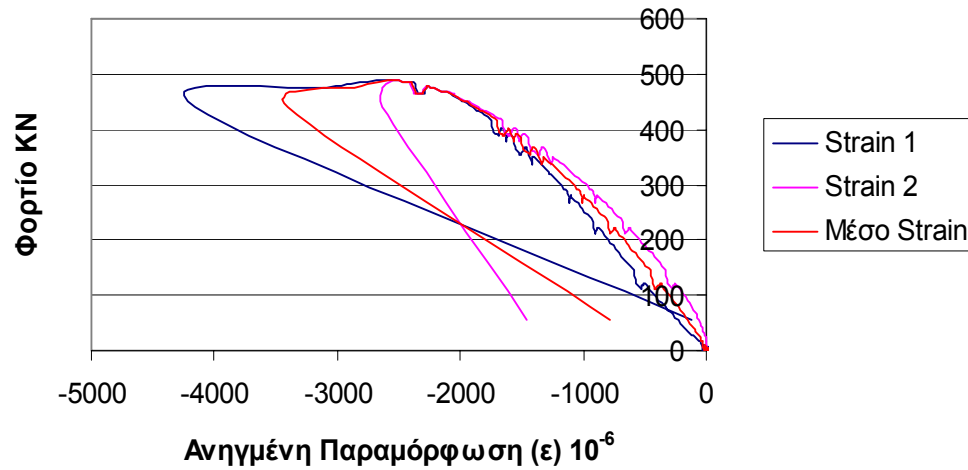
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 020



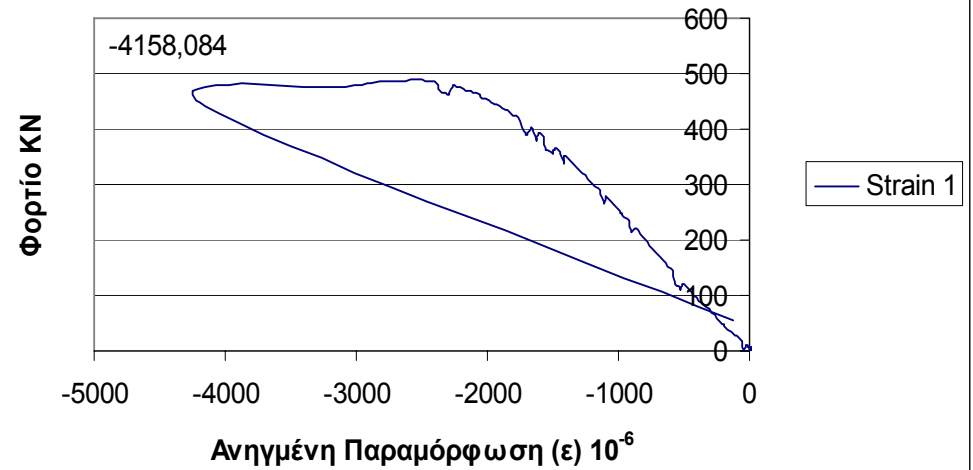
Δοκίμιο 020 Μετά



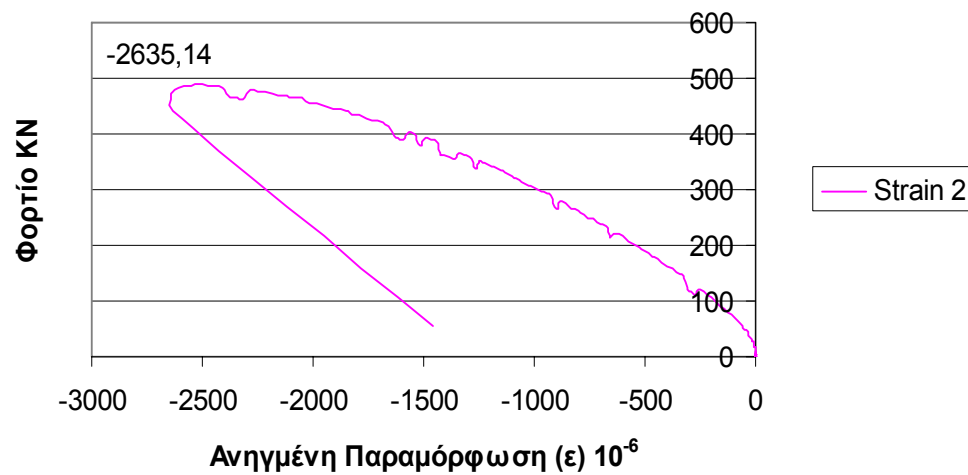
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 020



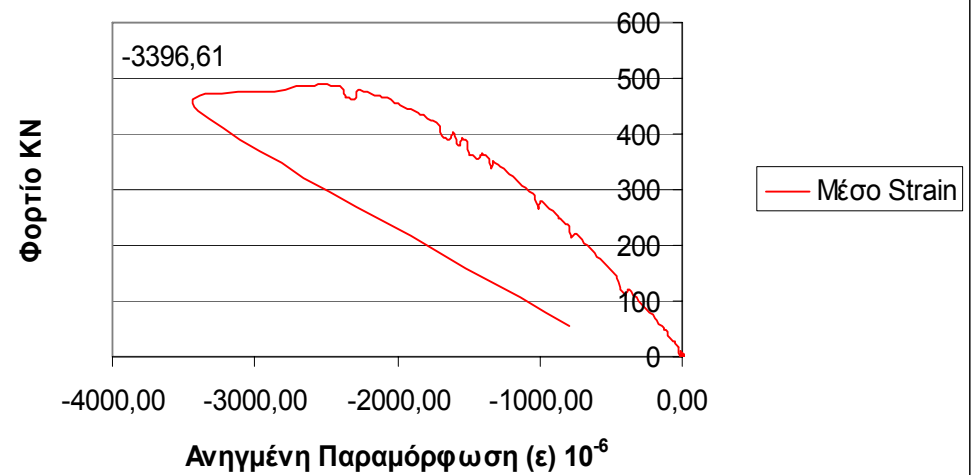
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 020

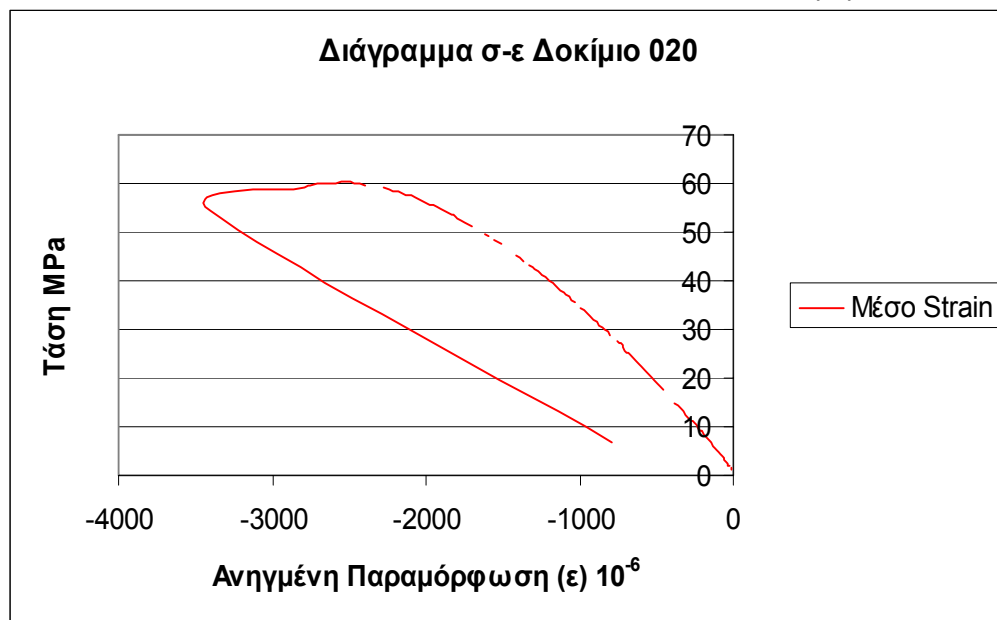


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 020



Ένδειξη Μέσου Strain Δοκίμιο 020





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 020 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκησιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

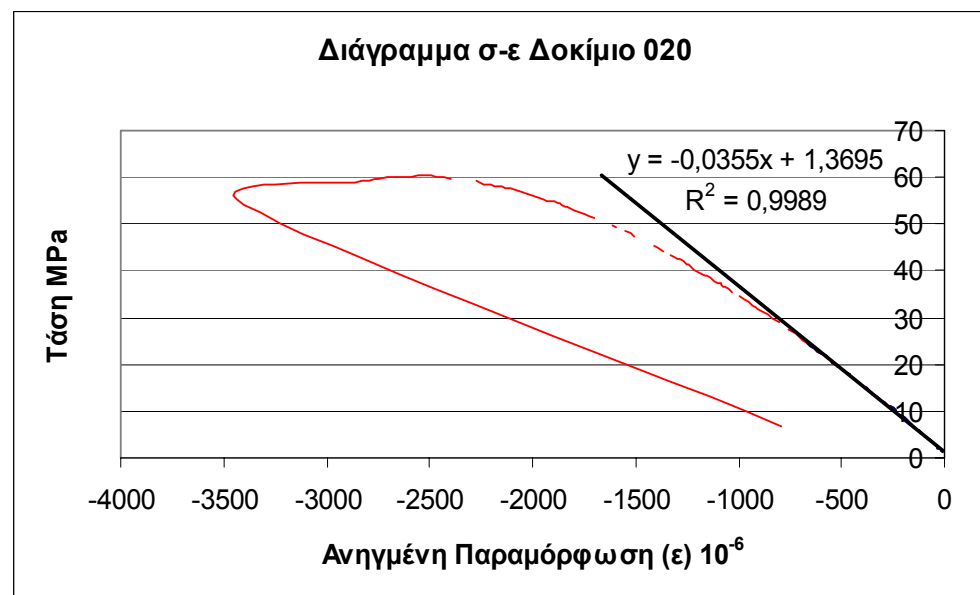
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.035 \text{ MPa}/\varepsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9989$.

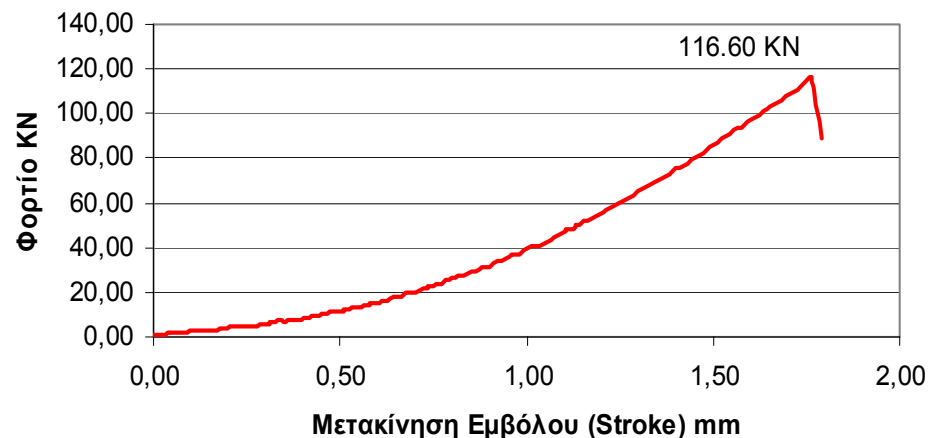
Επομένως:

$$E = 35.5 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:	021
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.30cm D=10.10cm
Βάρος:	3.845 Kg
Ειδικό Βάρος:	2364.11 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	7 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	116.6 kN
Αντοχή:	3.62 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	112

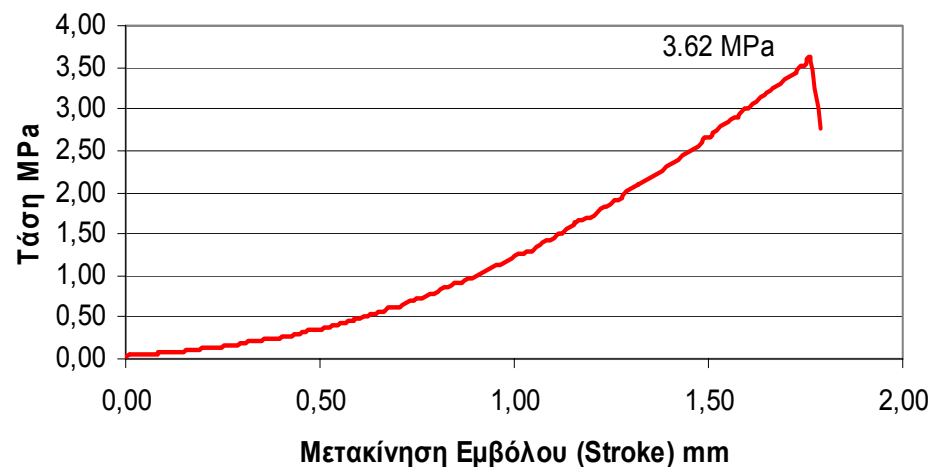
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 021



Δοκίμιο 021 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 021

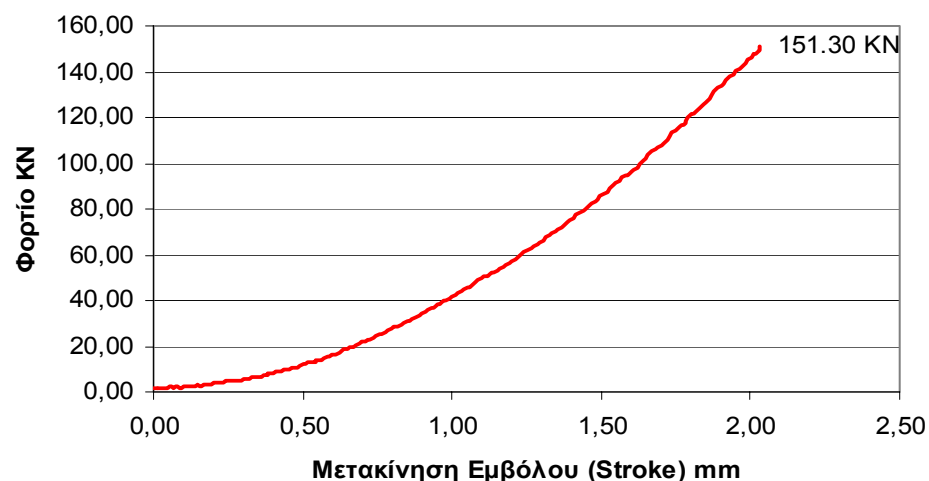


Δοκίμιο 021 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	022
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.40cm D=10.10cm
Βάρος:	3.840 Kg
Ειδικό Βάρος:	2349.46 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	22 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	151.30 KN
Αντοχή:	4.67 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	127

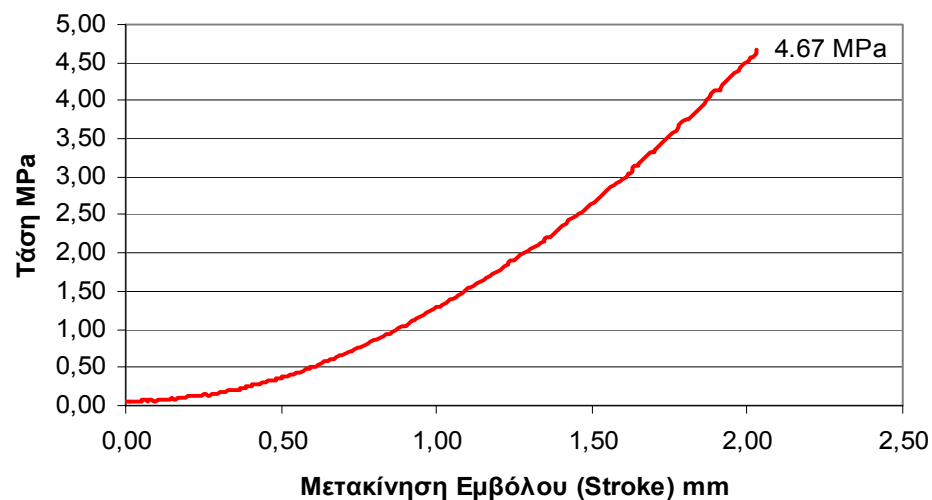
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 022



Δοκίμιο 022 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 022

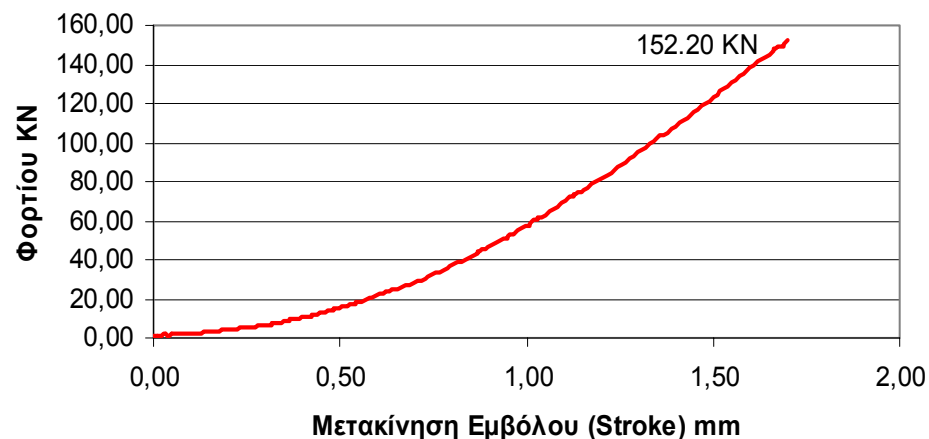


Δοκίμιο 022 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	023
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 8in. D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 20.40cm D=10.10cm
Βάρος:	3.825 Kg
Ειδικό Βάρος:	2340.28 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	22 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	152.20 KN
Αντοχή:	4.70 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	127

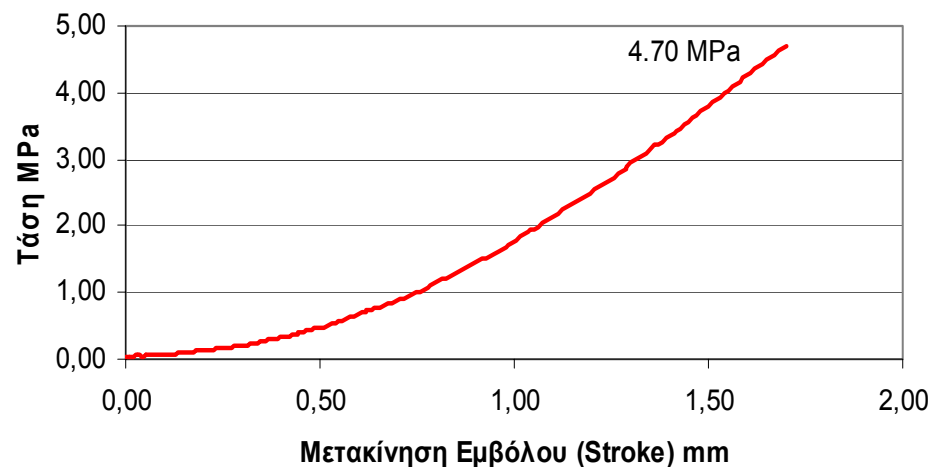
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 023



Δοκίμιο 023 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 023



Δοκίμιο 023 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου: 024

Σειρά: 1η 15mm Max Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 8in.
D = 4in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 20.50cm
D=10.10cm

Βάρος: 3.865 Kg

Ειδικό Βάρος: 2353.22 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 22 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

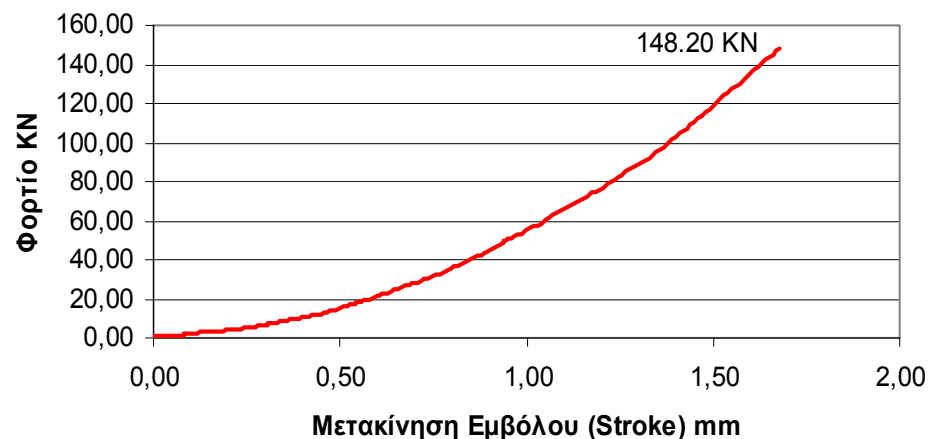
Φορτίο Αστοχίας: 148.20 KN

Αντοχή: 4.56 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: -----

Ηλικία σε Ημέρες: 127

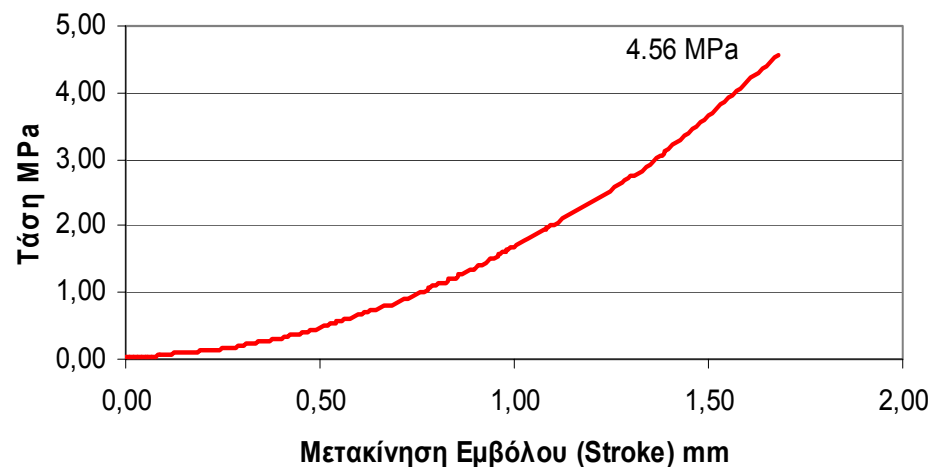
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 024



Δοκίμιο 024 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 024



Δοκίμιο 024 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου: 027

Σειρά: 1η 15mm Max Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.50cm
D=15.24cm

Βάρος: 12.765 Kg

Ειδικό Βάρος: 2294.36 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 16 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

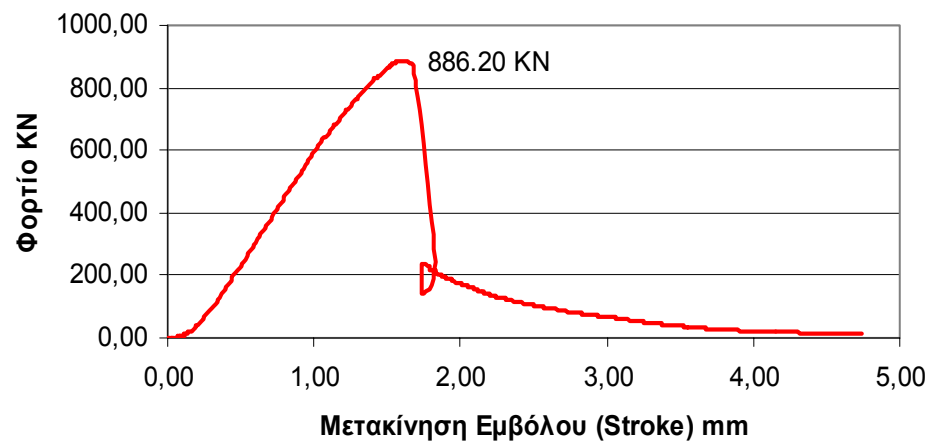
Φορτίο Αστοχίας: 886.2 KN

Αντοχή: 48.58 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: -----

Ηλικία σε Ημέρες: 121

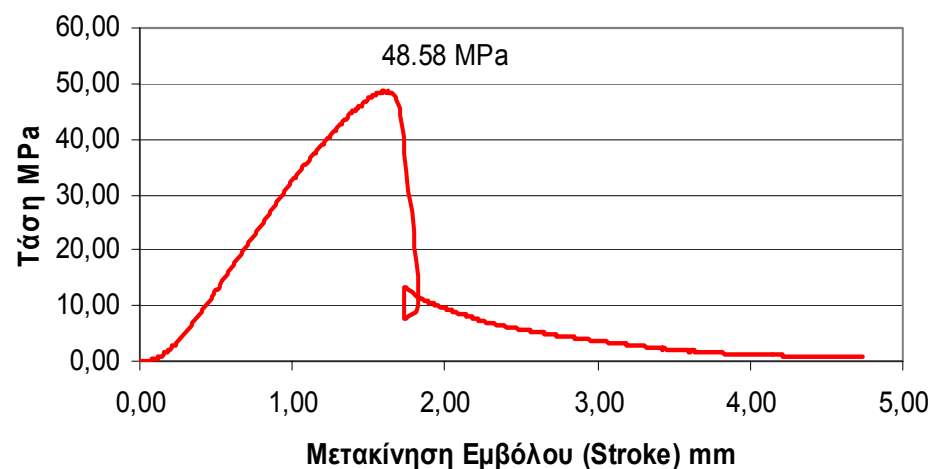
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 027



Δοκίμιο 027 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 027



Δοκίμιο 027 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου: 028

Σειρά: 1η 15mm Max Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.48cm
D=15.24cm

Βάρος: 12.745 Kg

Ειδικό Βάρος: 2292.27 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 19 Μαρτίου 2004

Είδος Φορτίου: Ώλιψη Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

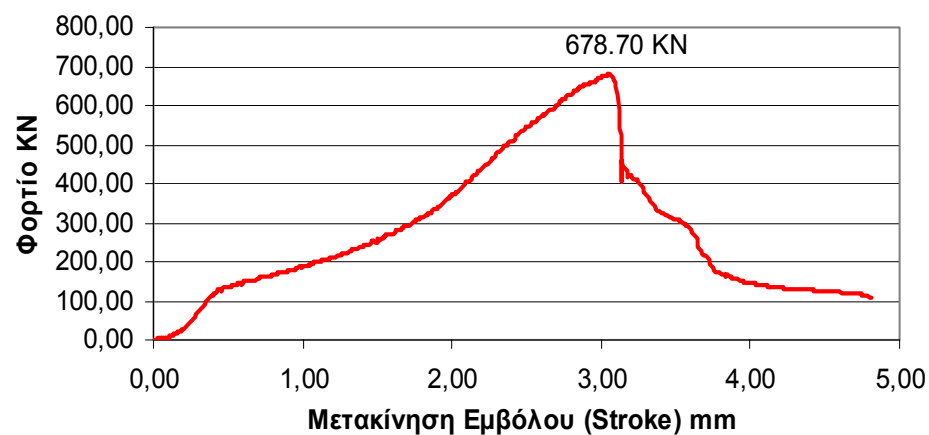
Φορτίο Αστοχίας: 678.7 KN

Αντοχή: 37.21 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: -----

Ηλικία σε Ημέρες: 93

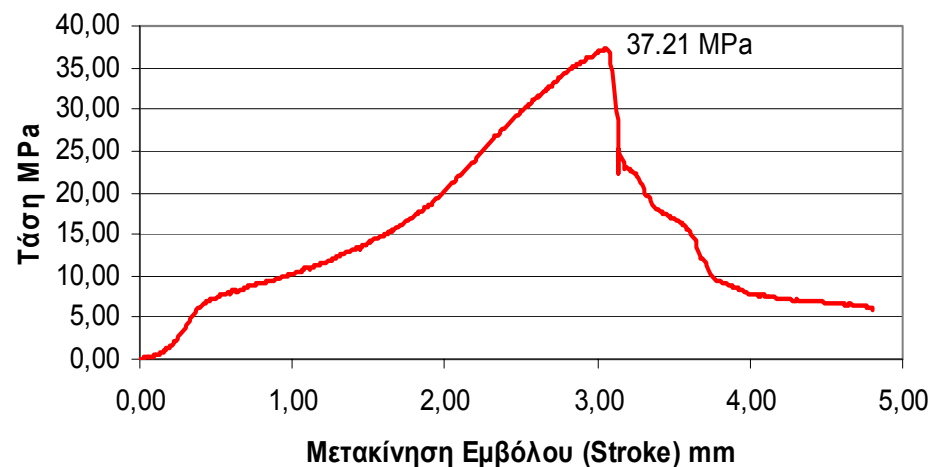
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 028



Δοκίμιο 028 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 028

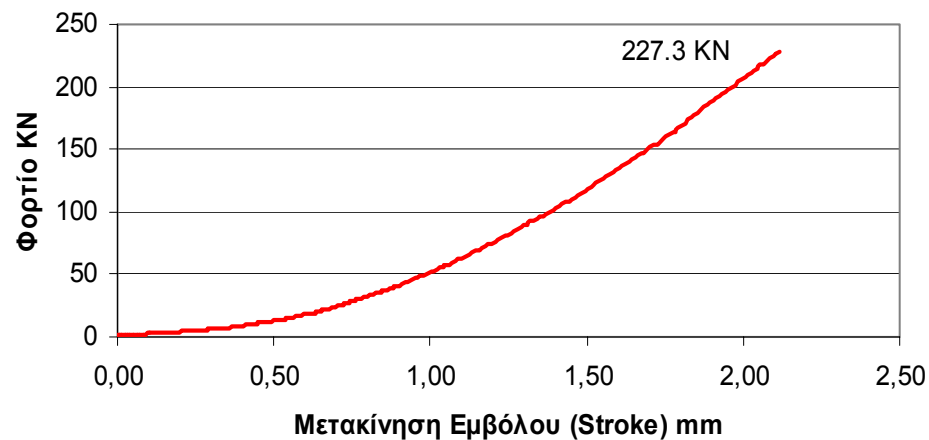


Δοκίμιο 028 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	030
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.50cm D=15.15cm
Βάρος:	12.760 Kg
Ειδικό Βάρος:	2320.79 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	30 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	227.3 KN
Αντοχή:	3.13 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	145

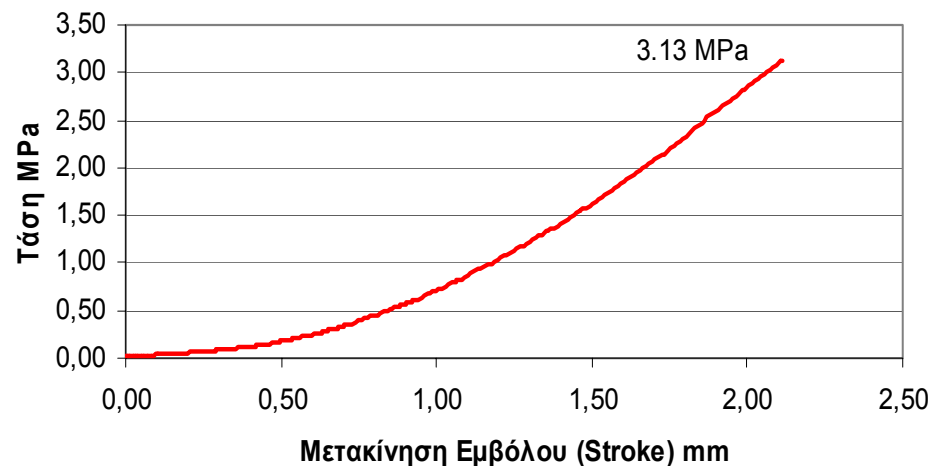
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 030



Δοκίμιο 030 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 030

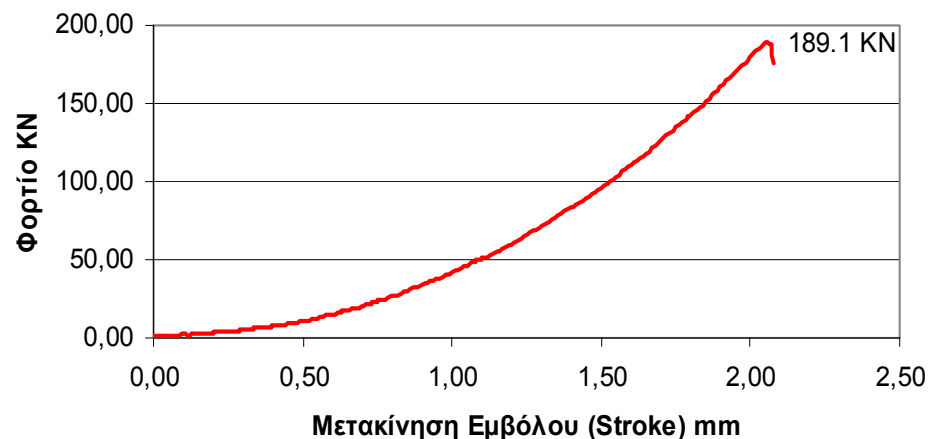


Δοκίμιο 030 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	031
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.40cm D=15.20cm
Βάρος:	12.740 Kg
Ειδικό Βάρος:	2309.50 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	30 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	189.1 KN
Αντοχή:	2.61 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	145

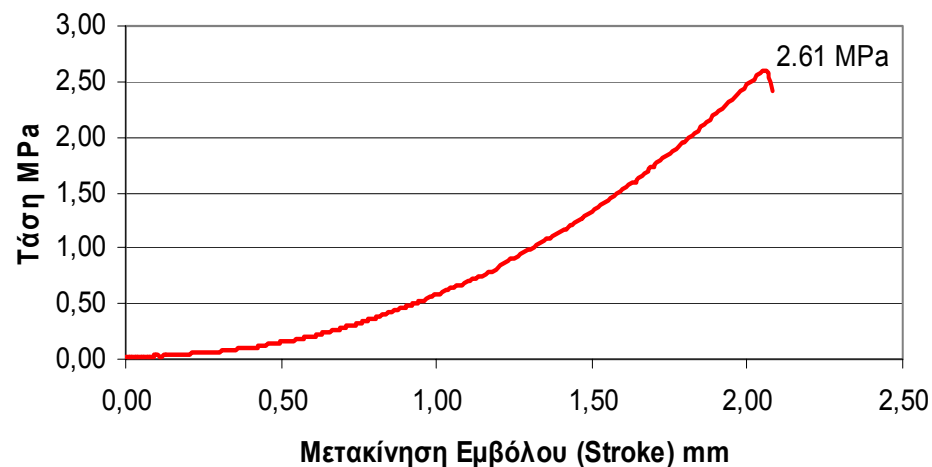
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 031



Δοκίμιο 031 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 031

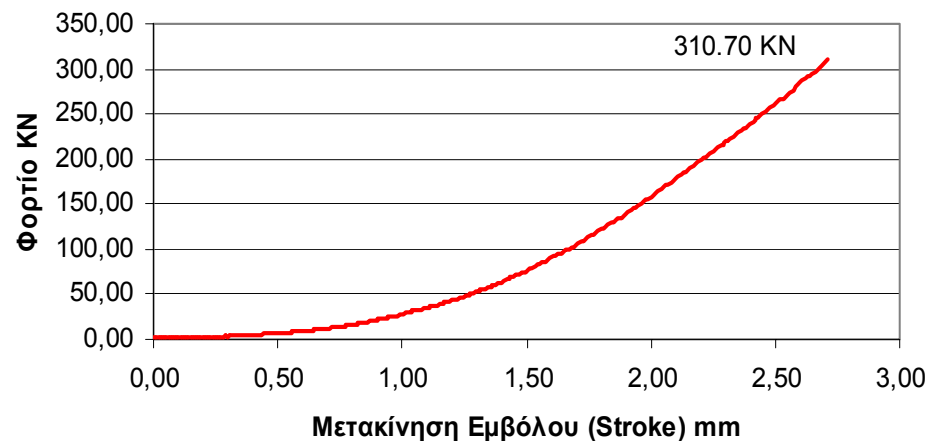


Δοκίμιο 031 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	032
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.50cm D=15.20cm
Βάρος:	12.780 Kg
Ειδικό Βάρος:	2309.16 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	30 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	310.7 KN
Αντοχή:	4.27 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	145

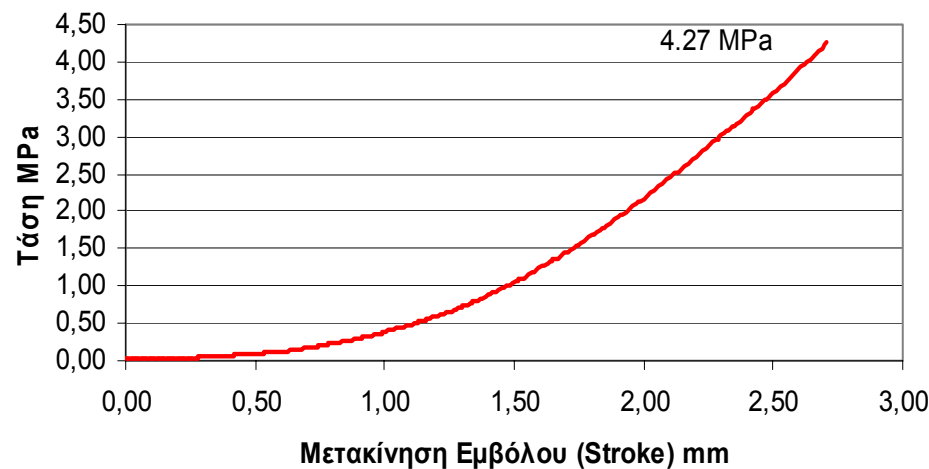
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 032



Δοκίμιο 032 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 032

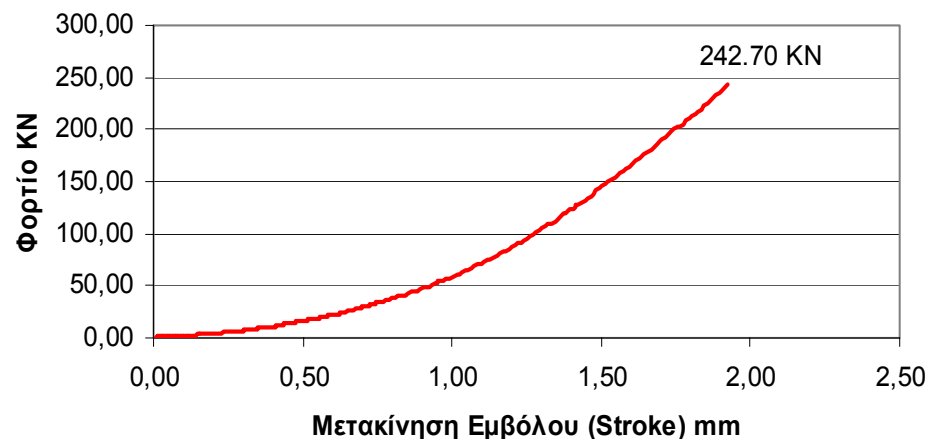


Δοκίμιο 032 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	033
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.50cm D=15.10cm
Βάρος:	12.750 Kg
Ειδικό Βάρος:	2334.35 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	30 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	242.7 KN
Αντοχή:	3.35 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	145

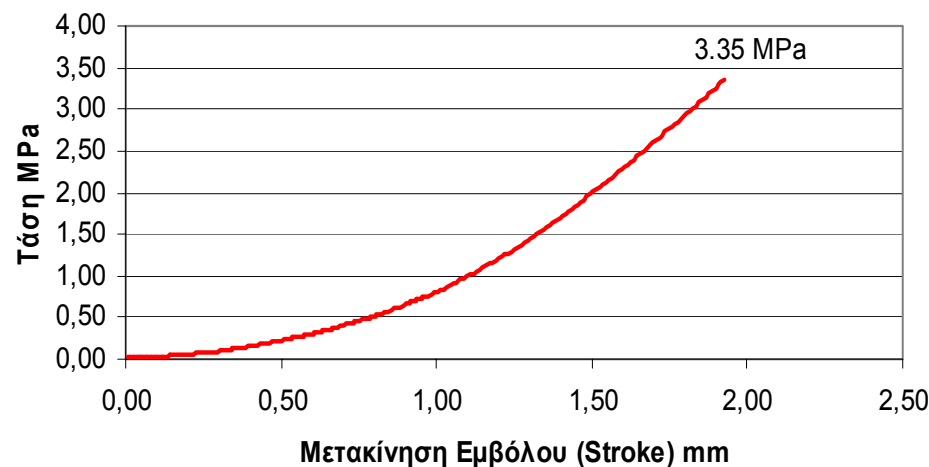
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκιμίου 033



Δοκίμιο 033 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκιμίου 033



Δοκίμιο 033 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου: 034

Σειρά: 1η 15mm Max Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.60cm
D=15.10cm

Βάρος: 12.815 Kg

Ειδικό Βάρος: 2338.59 Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

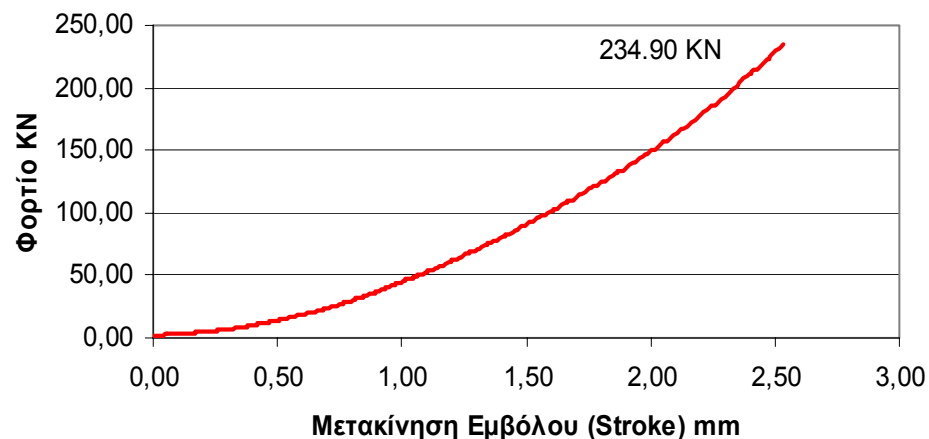
Φορτίο Αστοχίας: 234.90 KN

Αντοχή: 3.24 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 145

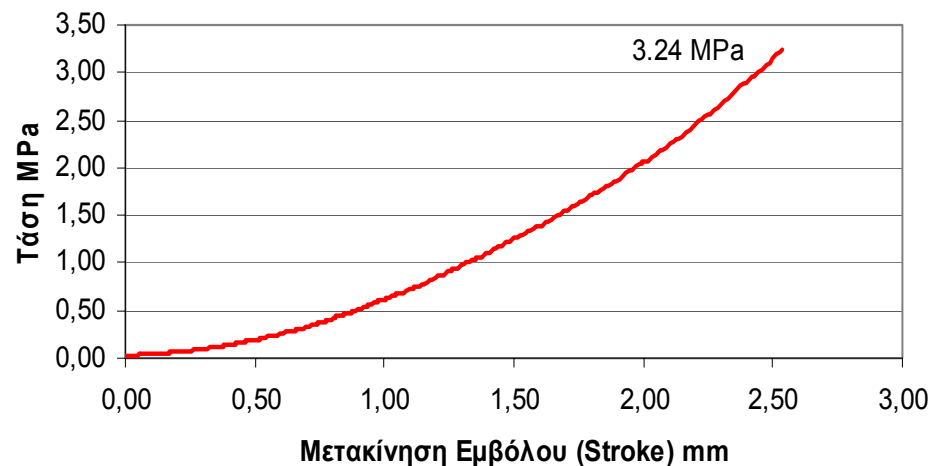
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 034



Δοκίμιο 034 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 034

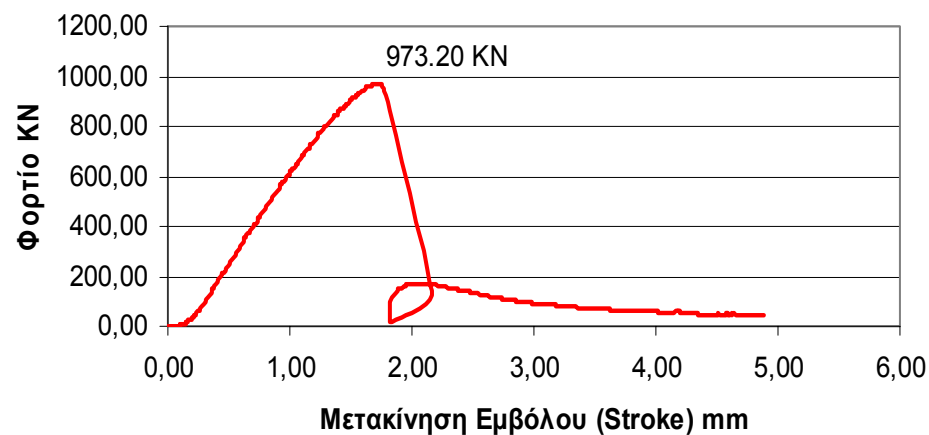


Δοκίμιο 034 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	035
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.48cm D=15.24cm
Βάρος:	12.760 Kg
Ειδικό Βάρος:	2294.96 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	20 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	2
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	973.20 KN
Αντοχή:	53.35 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	27 GPa
Ηλικία σε Ημέρες:	125

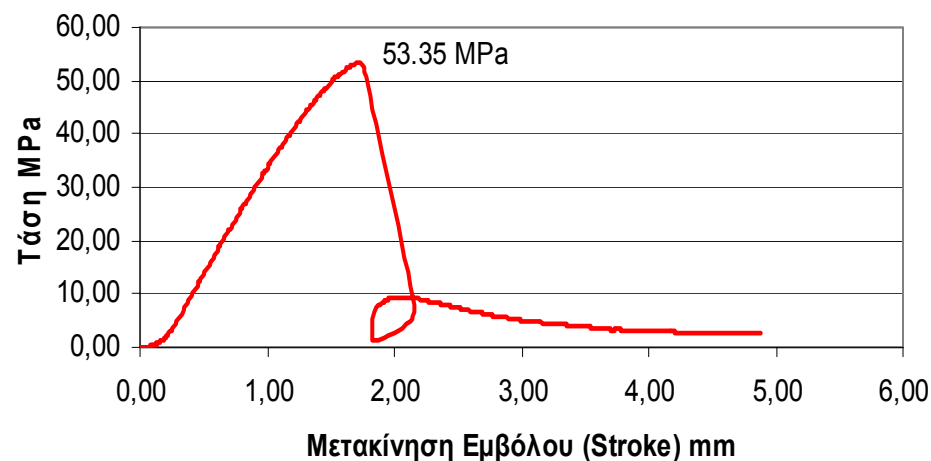
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 035



Δοκίμιο 035 Πριν

N/A

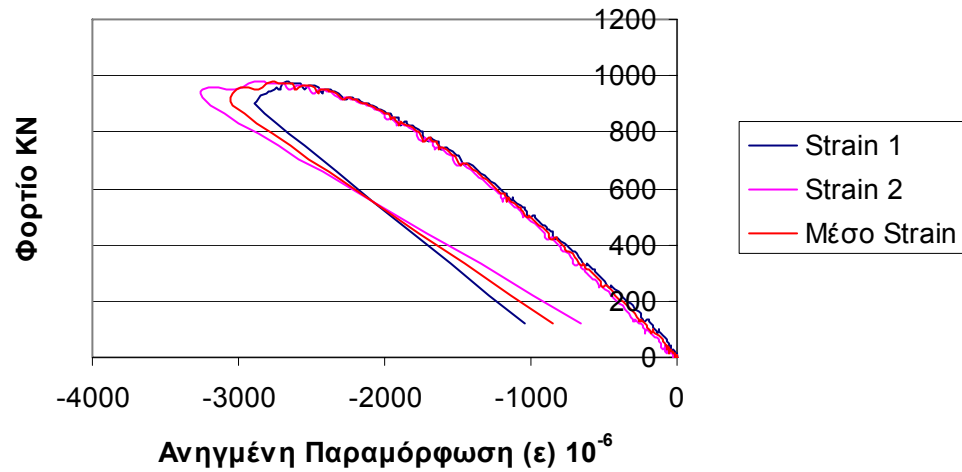
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 035



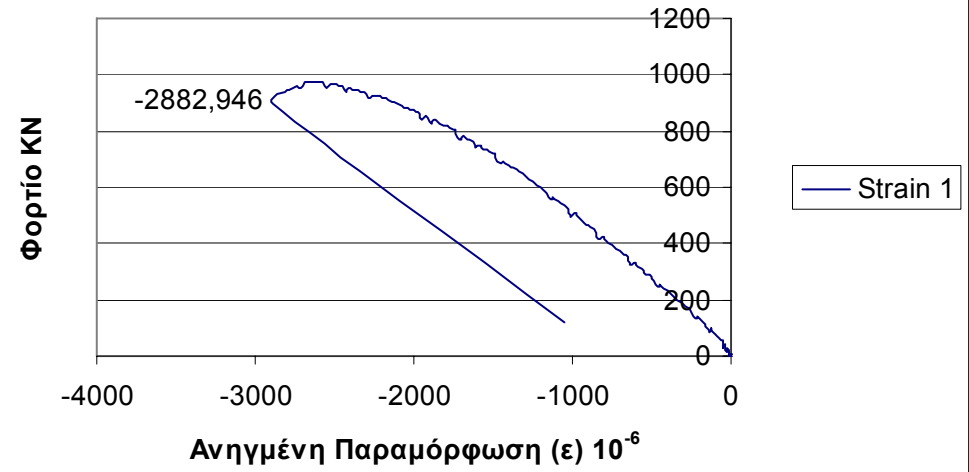
Δοκίμιο 035 Μετά



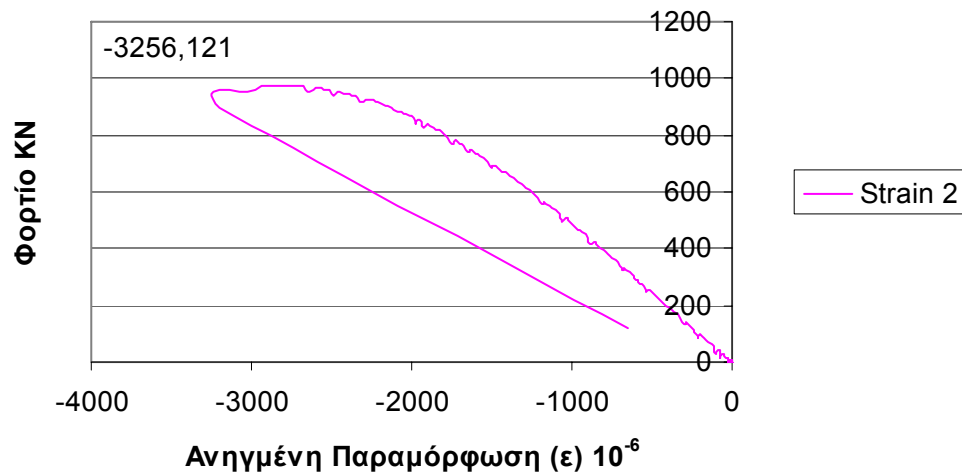
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 035



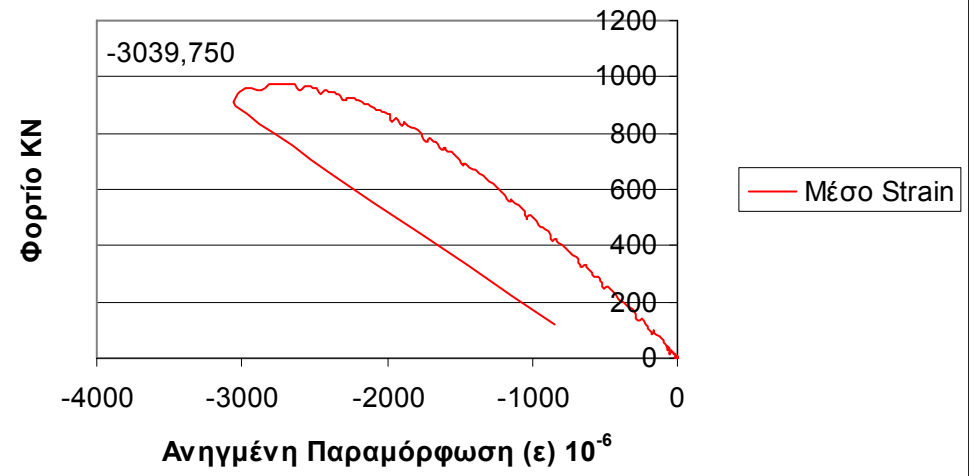
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 035

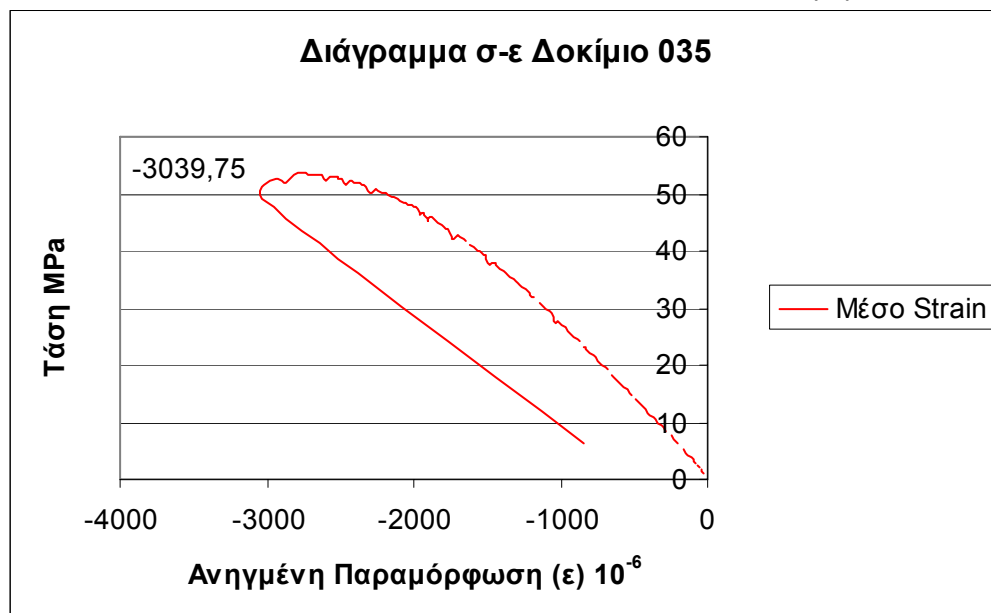


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 035



Ένδειξη Μέσου Strain Δοκίμιο 035





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.027 \text{ MPa}/\varepsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9995$.

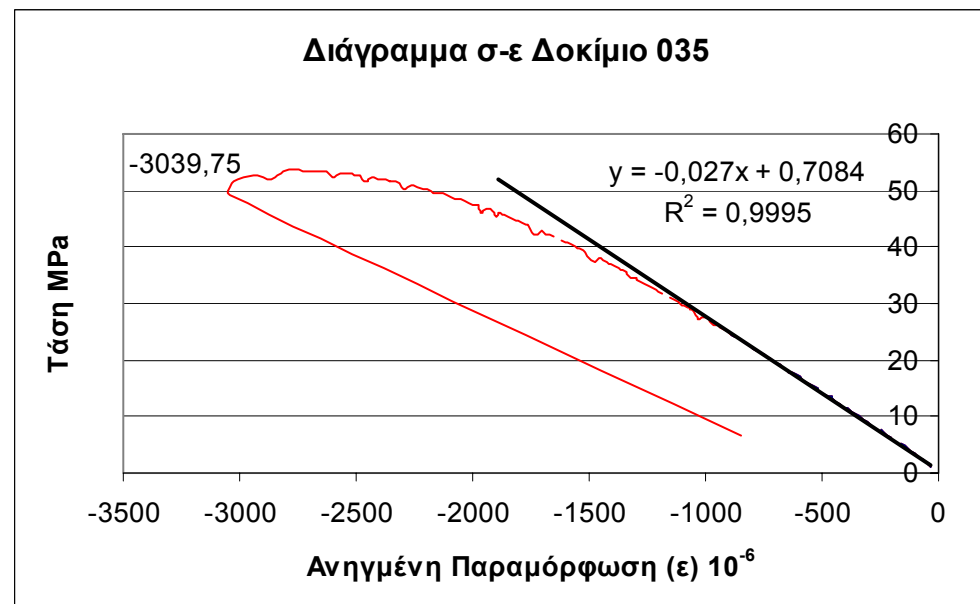
Επομένως:

$$E = 27 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

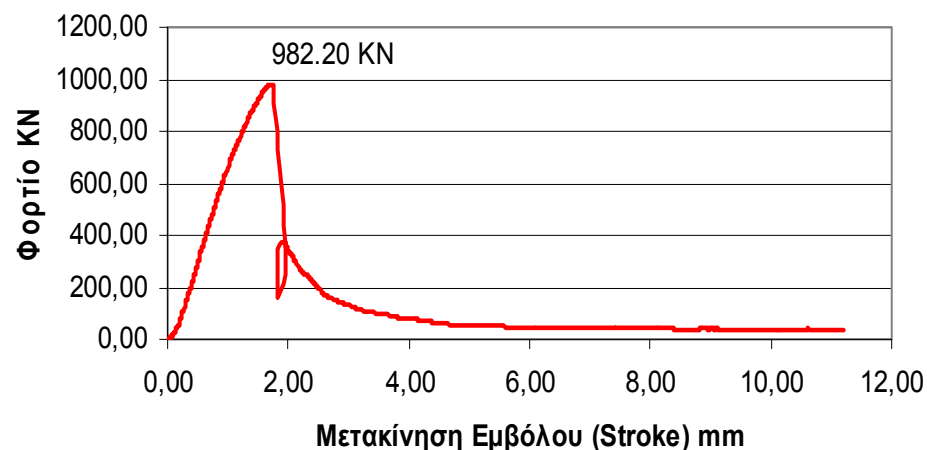
$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 035 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:	036
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.48cm D=15.24cm
Βάρος:	12.830 Kg
Ειδικό Βάρος:	2307.55 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	21 Απριλίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	982.20 KN
Αντοχή:	53.84 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	126

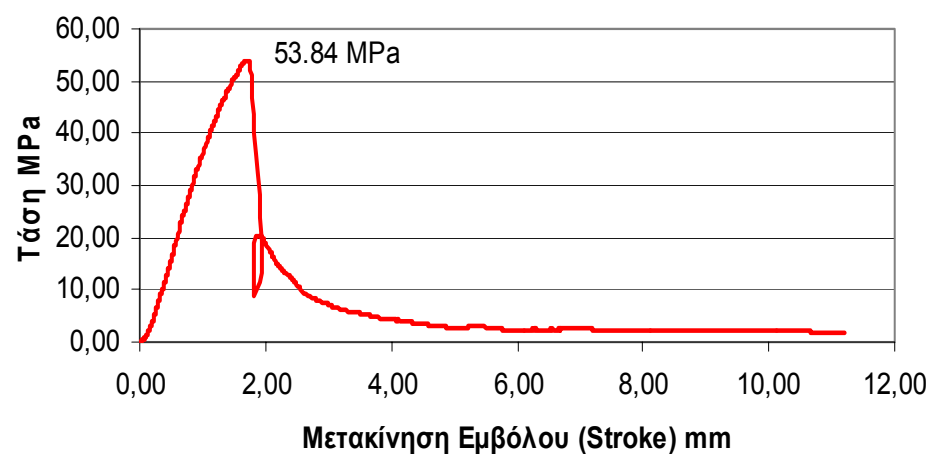
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 036



Δοκίμιο 036 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 036



Δοκίμιο 036 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου: 037

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.48cm
D=15.24cm

Βάρος: 12.790 Kg

Ειδικό Βάρος: 2300.36
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου 2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 20 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 3

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

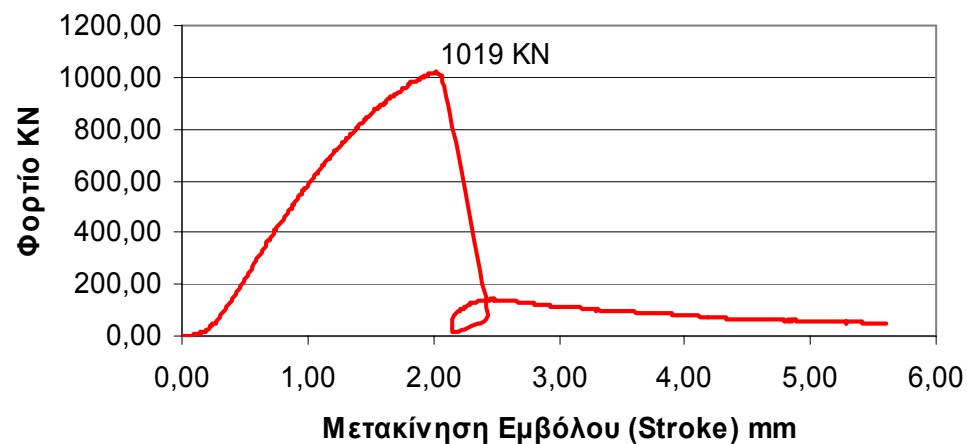
Φορτίο Αστοχίας: 1019 KN

Αντοχή: 55.86 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 32.7 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 125

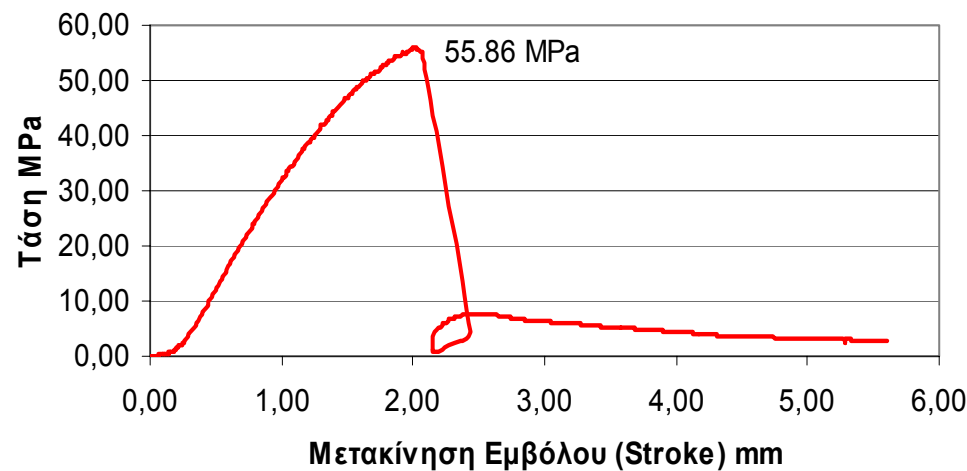
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 037



Δοκίμιο 037 Πριν

N/A

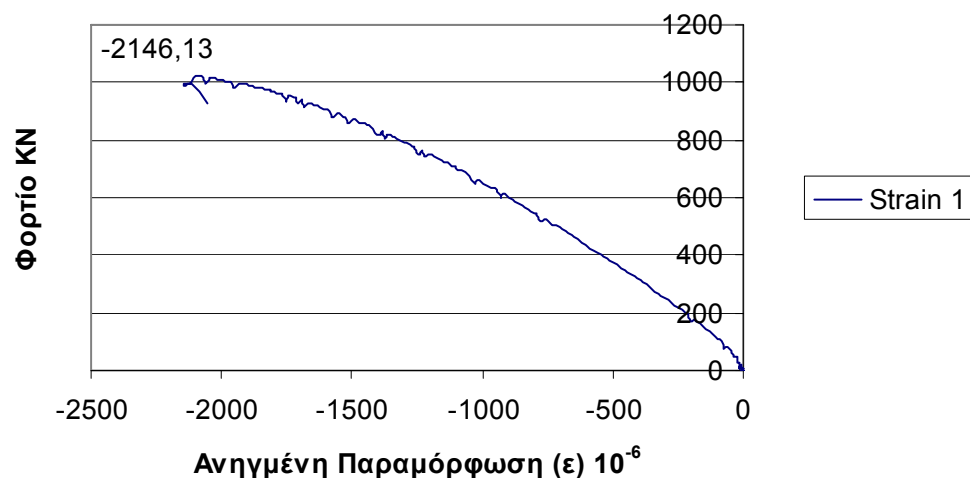
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 037



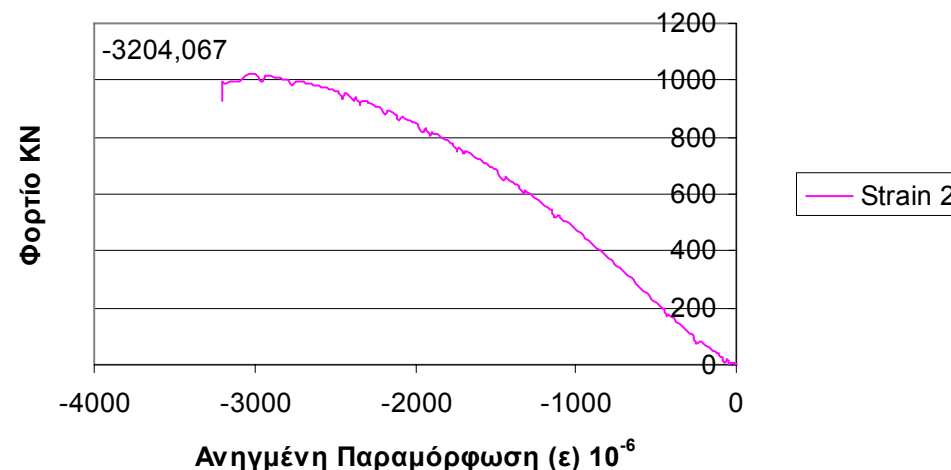
Δοκίμιο 037 Μετά

N/A

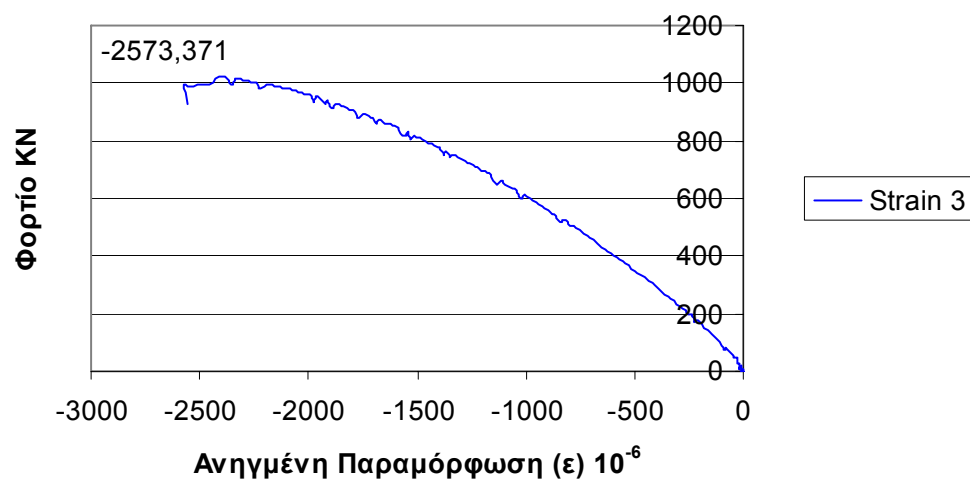
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 037



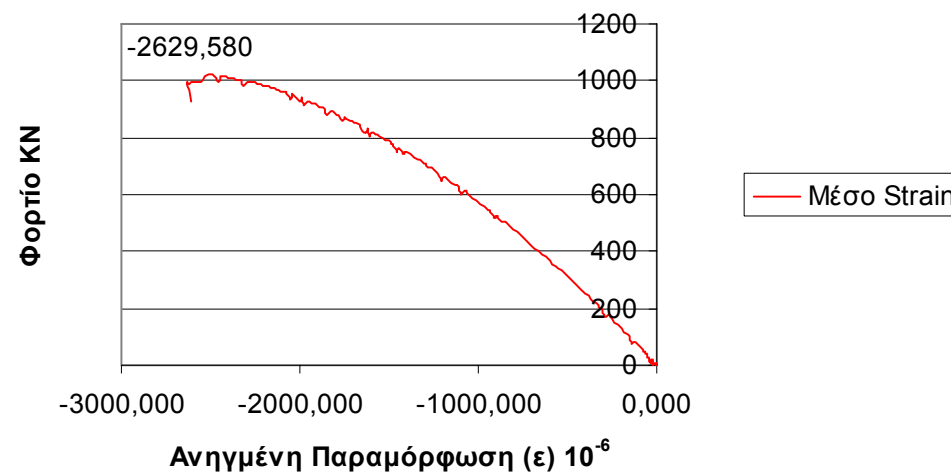
Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 037

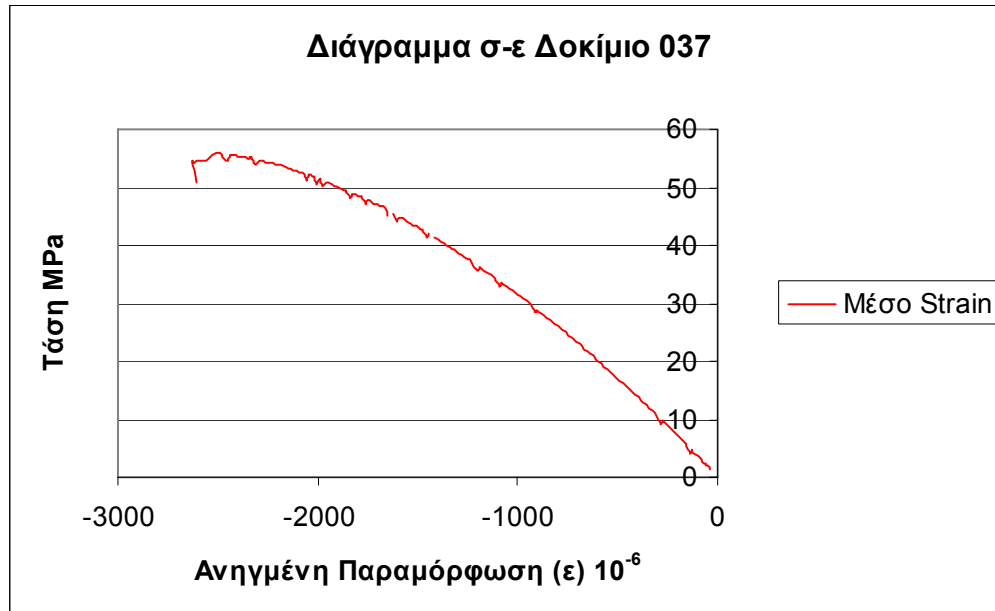


Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 037



Ένδειξη Μέσου Strain Δοκίμιο 037





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.032 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9988$.

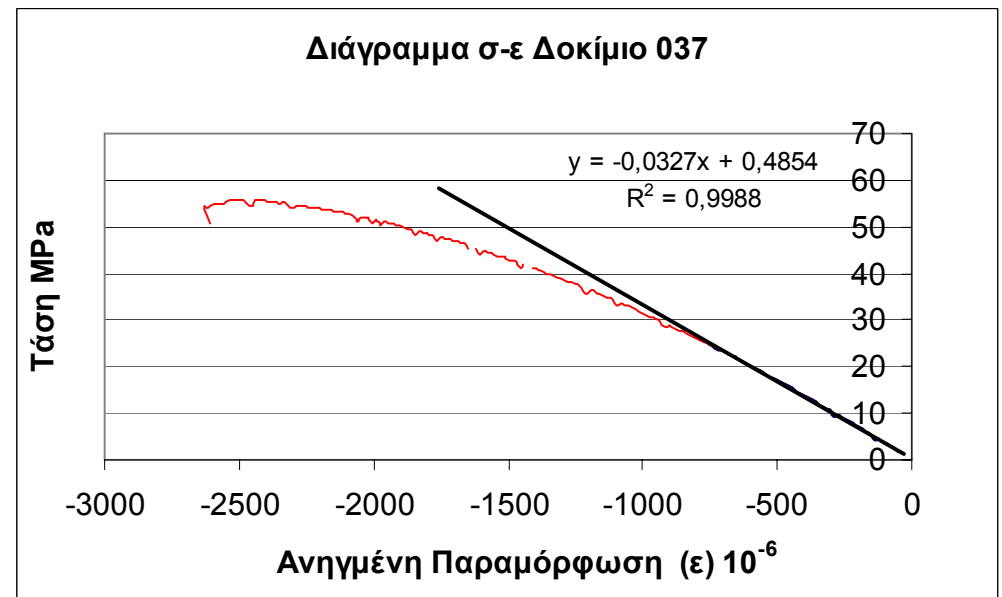
Επομένως:

$$E = 32.7 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 037 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου

038

Σειρά: 1η 15mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.48cm
D=15.24cm

Βάρος: 12.715 Kg

Ειδικό Βάρος: 2286.87
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 17 Δεκεμβρίου
2003

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 15 Μαρτίου
2004

Ημερομηνία Θραύσης: 19 Μαρτίου
2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

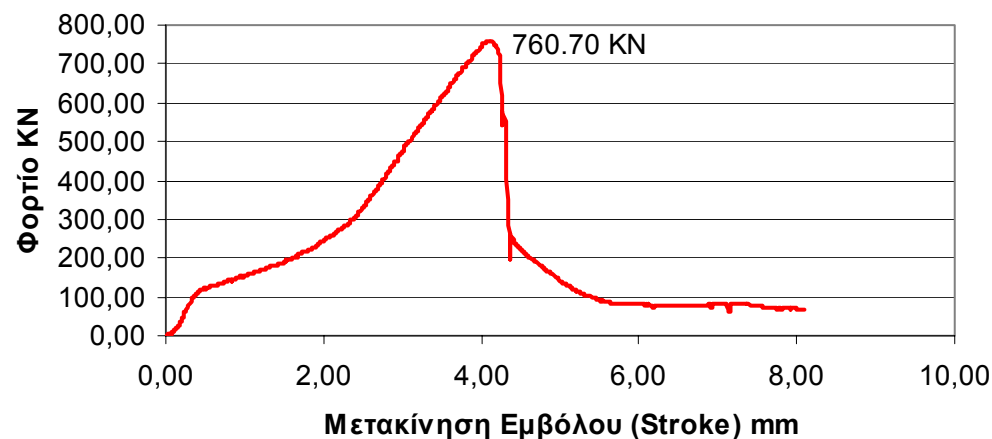
Φορτίο Αστοχίας: 760.70 KN

Αντοχή: 41.70 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 93

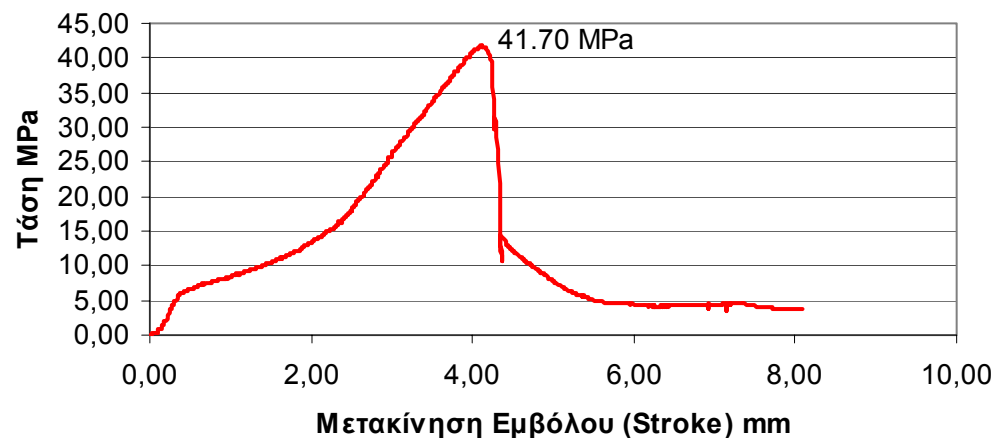
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 038



Δοκίμιο 038 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 038

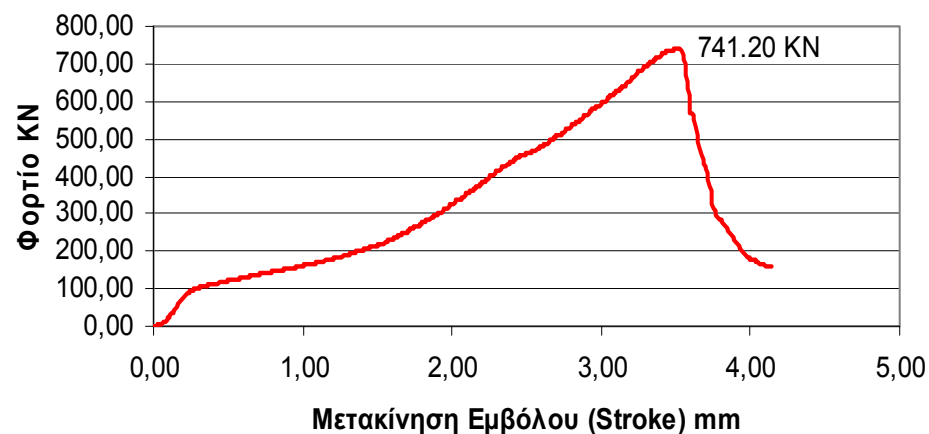


Δοκίμιο 038 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	039
Σειρά:	1η 15mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.48cm D=15.24cm
Βάρος:	12.835 Kg
Ειδικό Βάρος:	2308.45 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	17 Δεκεμβρίου 2003
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	15 Μαρτίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	19 Μαρτίου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	741.20 KN
Αντοχή:	40.63 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	93

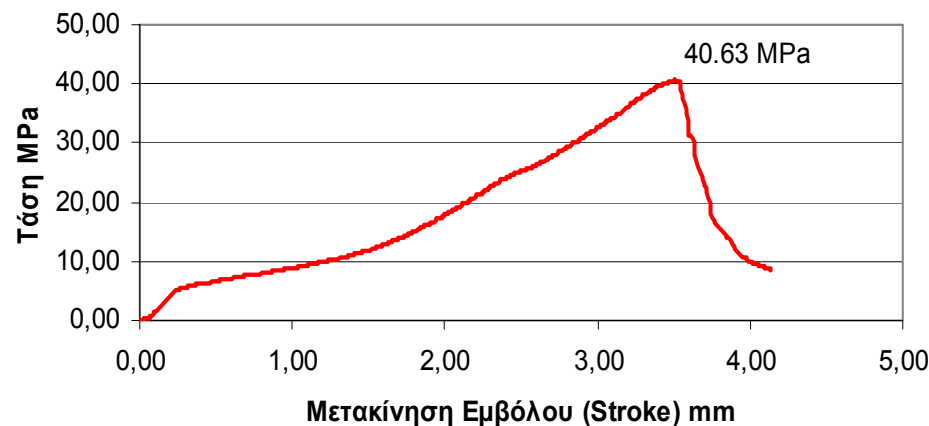
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 039



Δοκίμιο 039 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 039

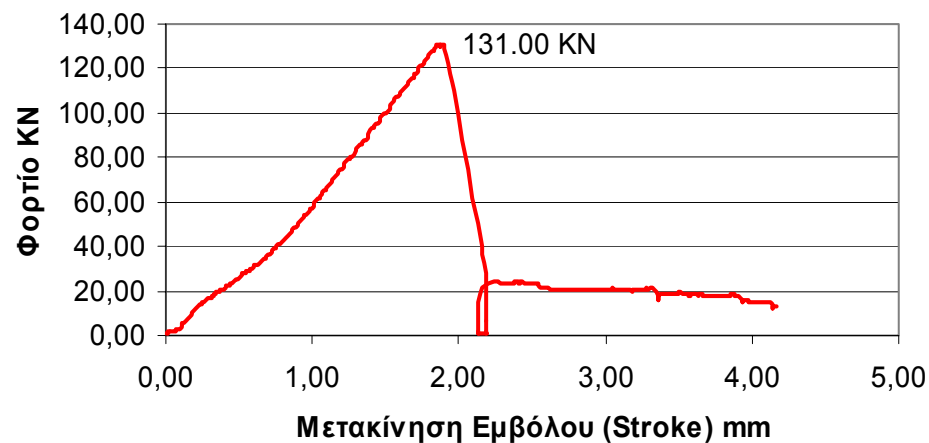


Δοκίμιο 039 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:	040
Σειρά:	2η 5mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 4in. D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 10.20cm D=5.05cm
Βάρος:	0.480 Kg
Ειδικό Βάρος:	2349.462 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	2 Φεβρουαρίου 2004
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	21 Απριλίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	13 Μαΐου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	131.00 KN
Αντοχή:	65.40 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	101

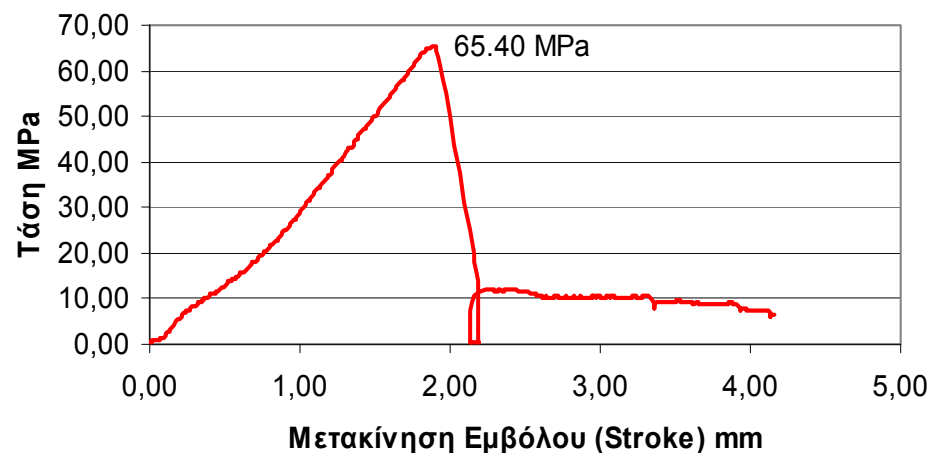
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 040



Δοκίμιο 040 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 040



Δοκίμιο 040 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου: 041

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 4in.
D = 2in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 10.15cm
D=5.05cm

Βάρος: 0.480 Kg

Ειδικό Βάρος: 2361.036
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 13 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

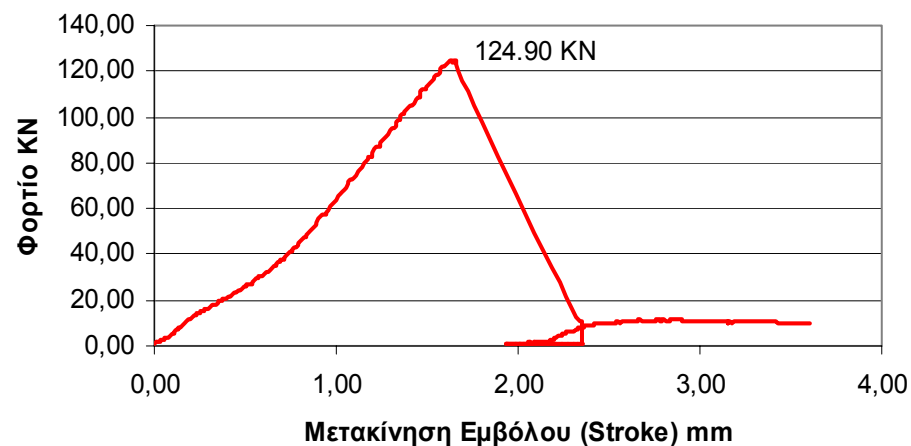
Φορτίο Αστοχίας: 124.90 KN

Αντοχή: 62.36 MPa

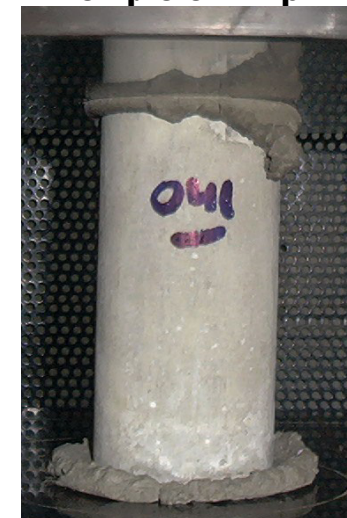
Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 101

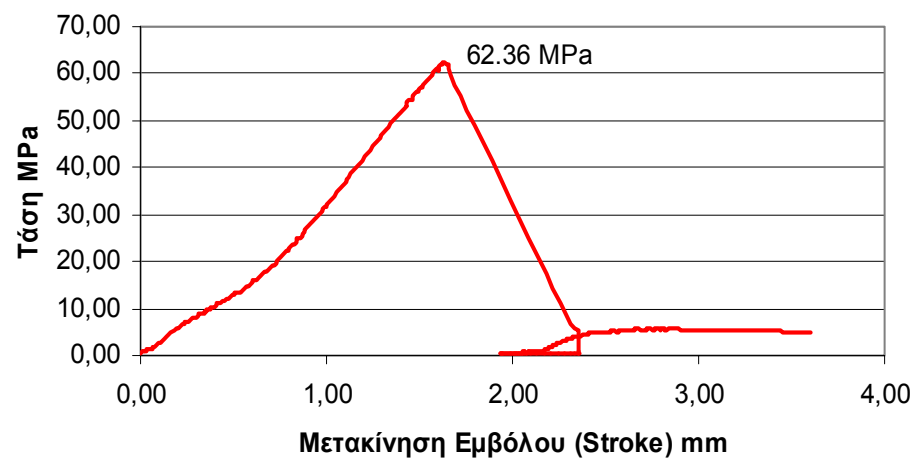
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 041



Δοκίμιο 041 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 041



Δοκίμιο 041 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

042

Σειρά:

2η 5mm Max

Κόκκος

Τυπικές

L = 4in.

Διαστάσεις:

D = 2in.

Πραγματικές

L= 10.20cm

Διαστάσεις:

D=5.05cm

Βάρος:

0.475 Kg

Ειδικό Βάρος:

2324.988

Kg/m³

Ημερομηνία

2 Φεβρουαρίου

Σκυροδέτησης:

2004

Ημερομηνία

21 Απριλίου 2004

Εξαγωγής από

Δεξαμενή:

Ημερομηνία

13 Μαΐου 2004

Θραύσης:

Είδος Φορτίου:

Θλίψη

Compression

Αριθμός Strain

Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης

0.01 mm/s

εμβόλου (stroke):

111.20 KN

Φορτίο Αστοχίας:

Αντοχή:

55.52 MPa

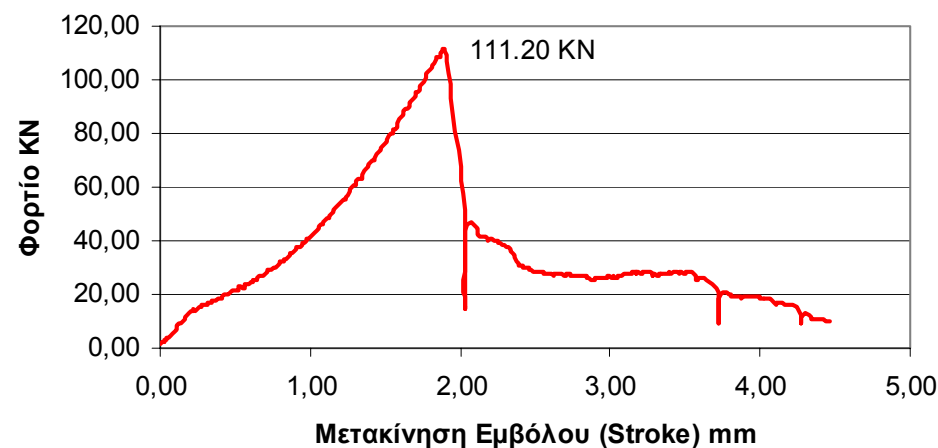
Μέτρο

Ελαστικότητας E

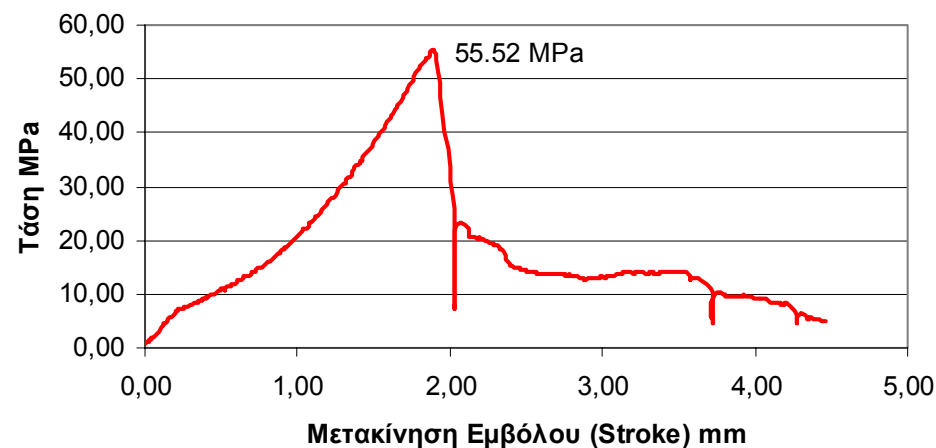
Ηλικία σε Ημέρες:

101

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 042



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 042



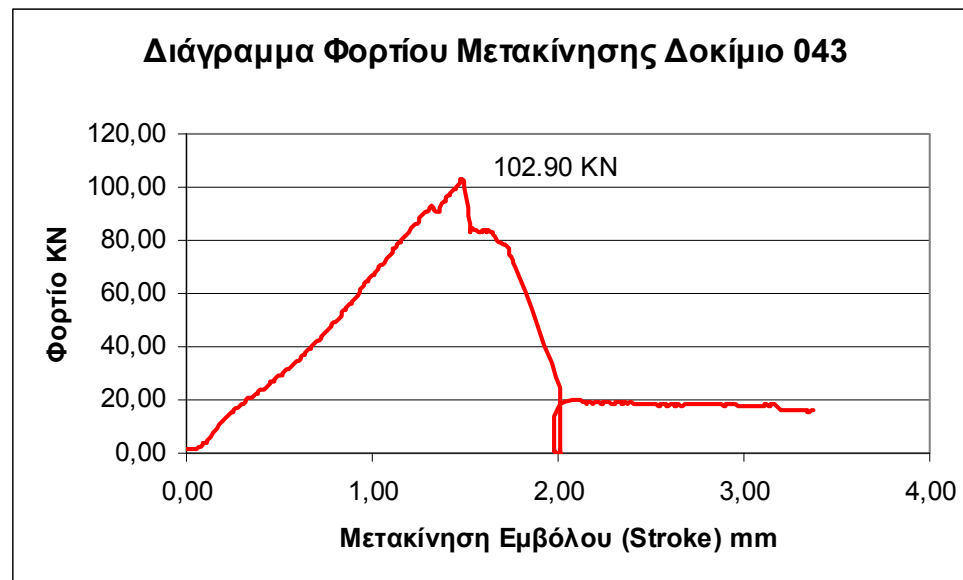
Δοκίμιο 042 Πριν



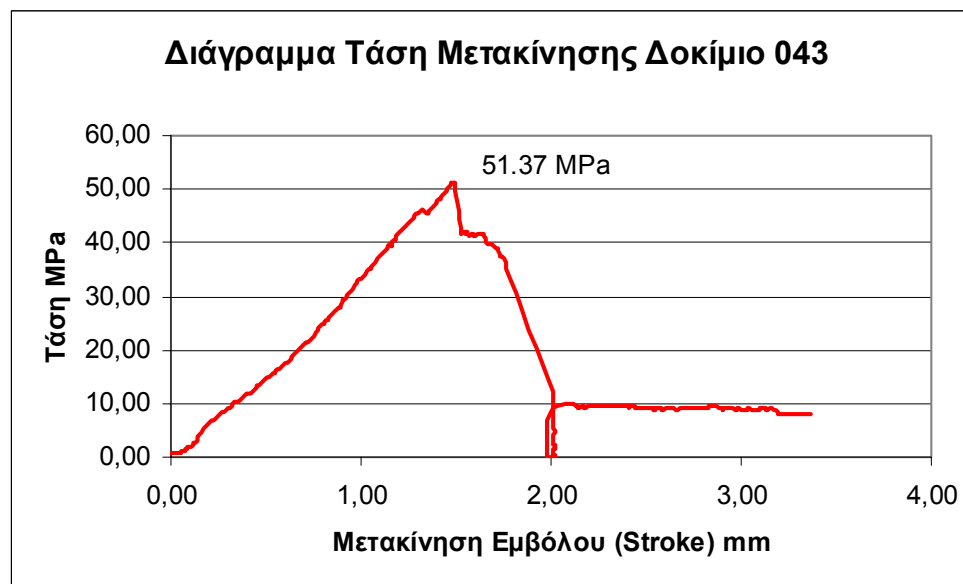
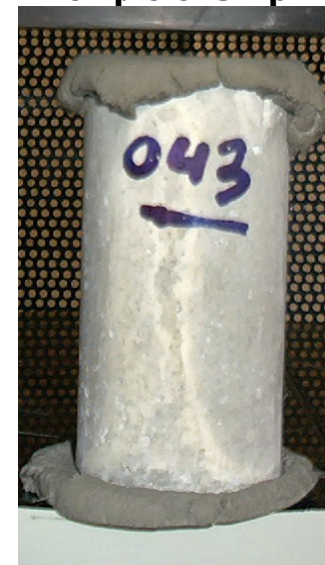
Δοκίμιο 042 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	043
Σειρά:	2η 5mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 4in. D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 10.10cm D=5.05cm
Βάρος:	0.485 Kg
Ειδικό Βάρος:	2397.440 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	2 Φεβρουαρίου 2004
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	21 Απριλίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	13 Μαΐου 2004
Είδος Φορτίου:	Θλίψη Compression
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	102.90 KN
Αντοχή:	51.37 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	101



Δοκίμιο 043 Πριν



Δοκίμιο 043 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

044

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 4in.
D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 10.10cm
D=5.05cm

Βάρος: 0.470 Kg

Ειδικό Βάρος: 2323.292
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 22 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 2
με γωνία 120°

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

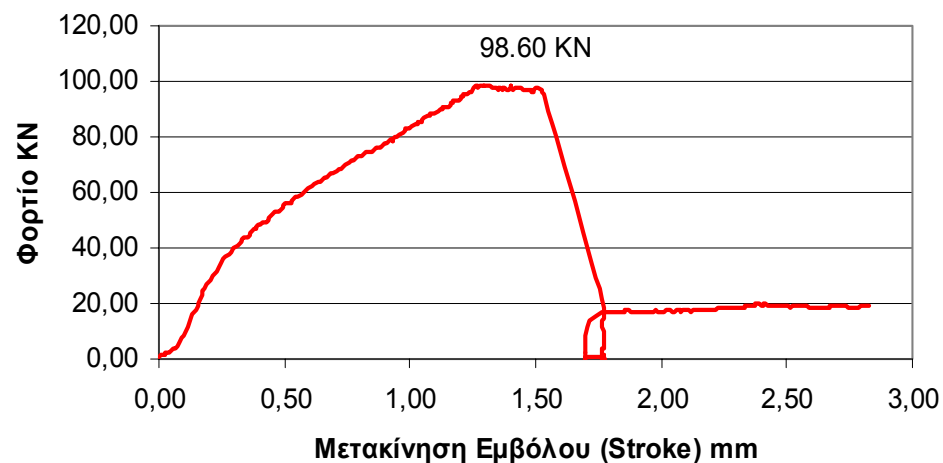
Φορτίο Αστοχίας: 98.60 KN

Αντοχή: 49.23 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 36.4GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 110

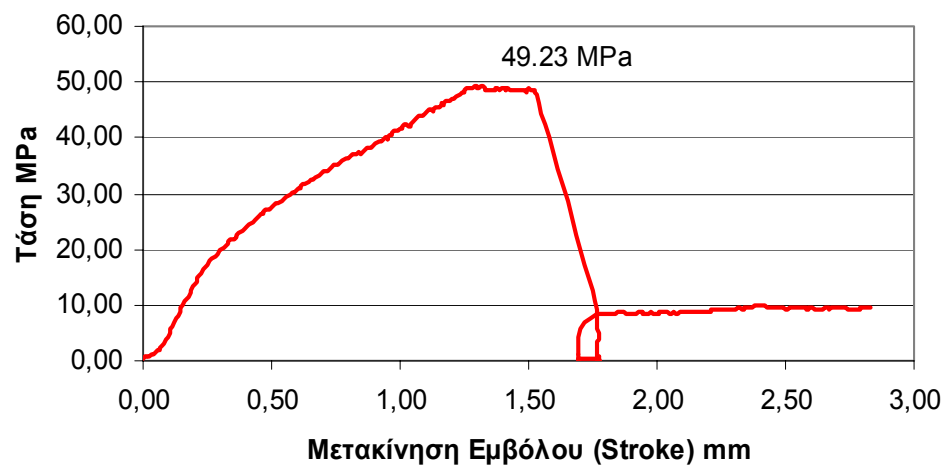
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 044



Δοκίμιο 044 Πριν

N/A

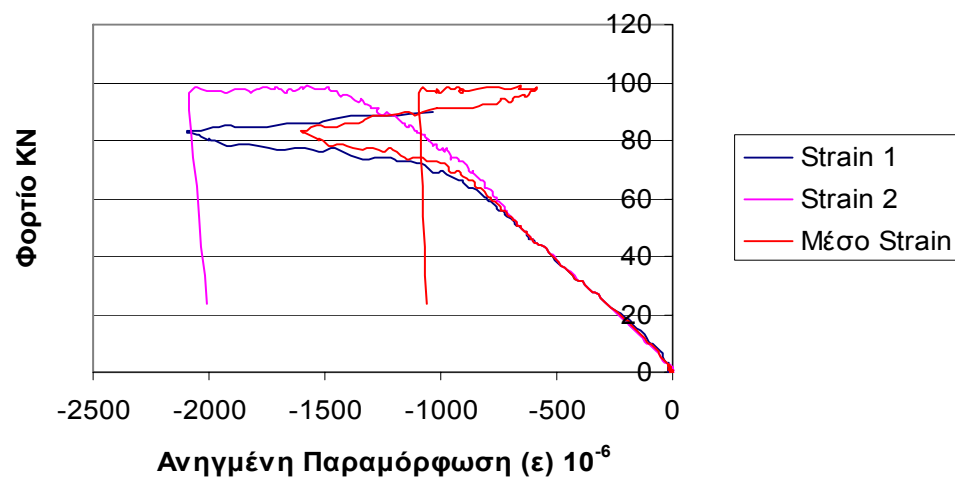
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 044



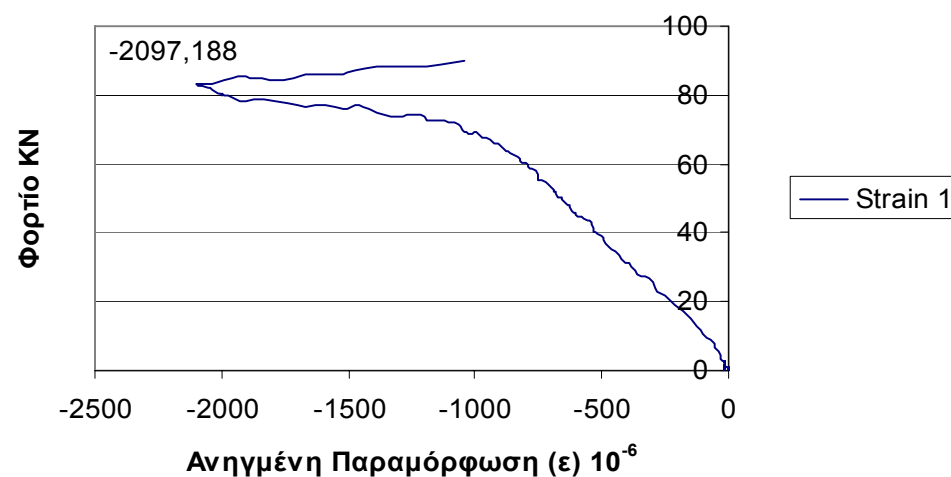
Δοκίμιο 044 Μετά



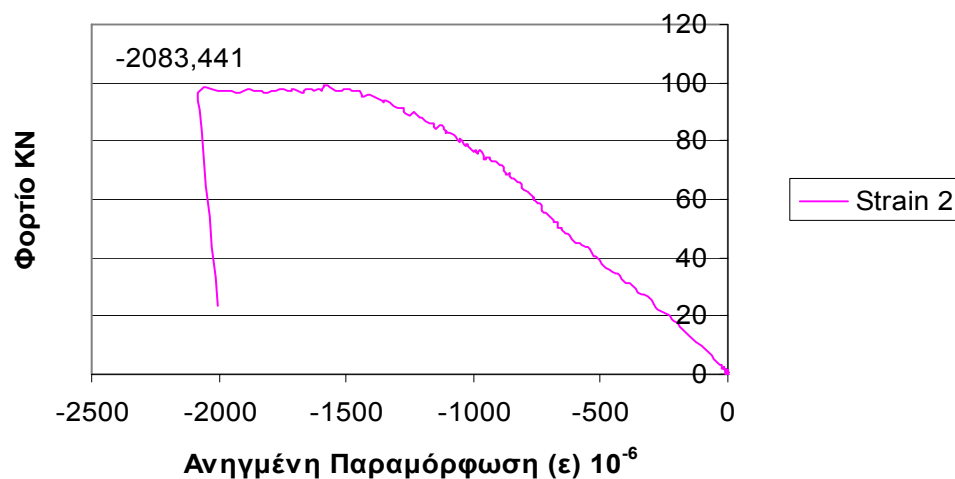
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 044



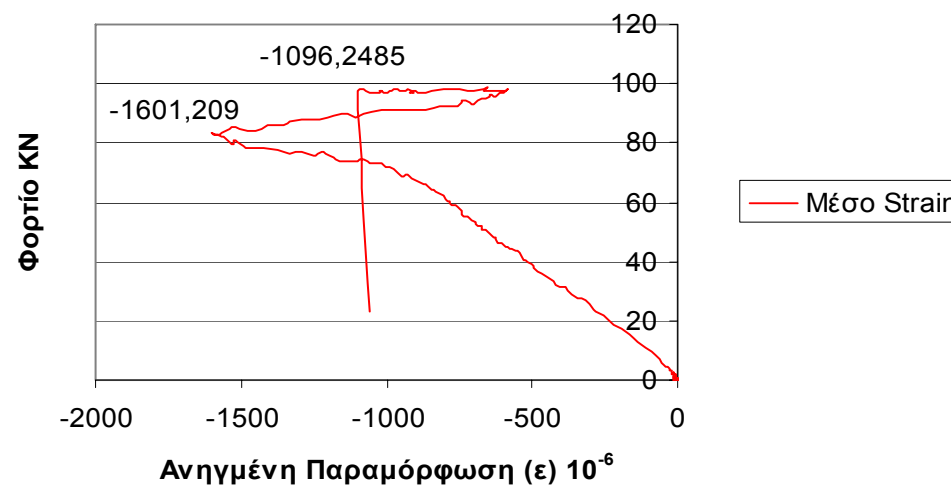
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 044

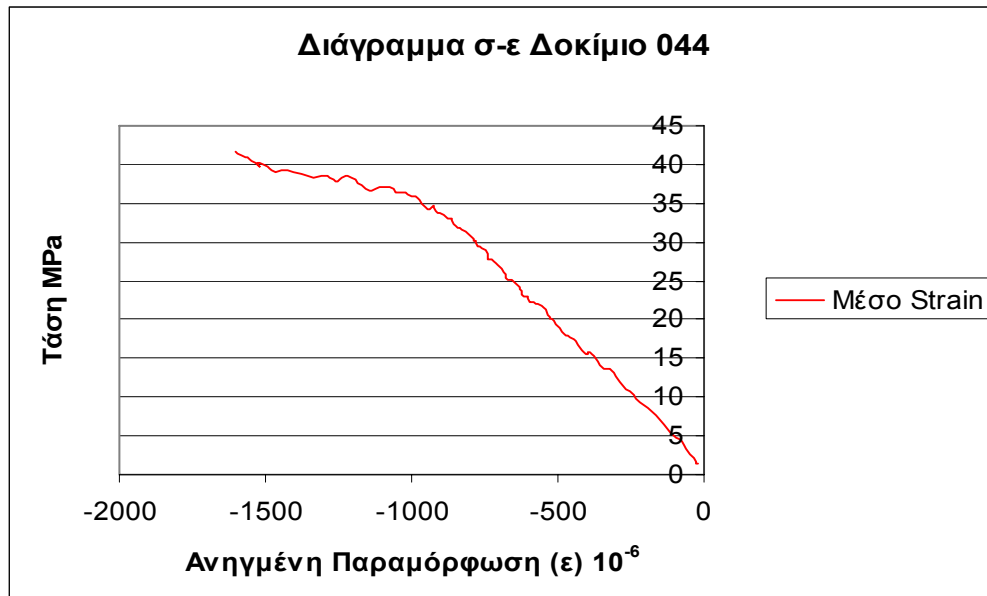


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 044



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 044





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R². Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.036 MPa/ε 10⁻⁶ και R² = 0.9981.

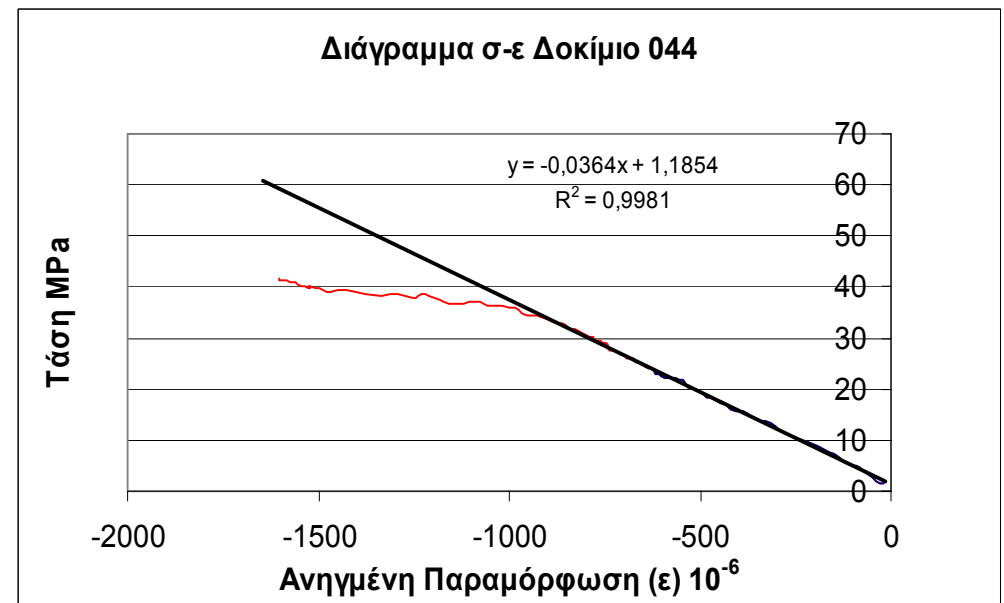
Επομένως:

$$E = 36.4 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 044 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

045

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 4in.

Διαστάσεις:

D = 2in.

Πραγματικές

L= 10.10cm

Διαστάσεις:

D=5.05cm

Βάρος:

0.470 Kg

Ειδικό Βάρος:

2323.292
Kg/m³

Ημερομηνία

2 Φεβρουαρίου

Σκυροδέτησης:

2004

Ημερομηνία

21 Απριλίου 2004

Εξαγωγής από

Δεξαμενή:

Ημερομηνία

13 Μαΐου 2004

Θραύσης:

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain

Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης

0.01 mm/s

εμβόλου (stroke):

Φορτίο Αστοχίας:

91.60 KN

Αντοχή:

45.73 MPa

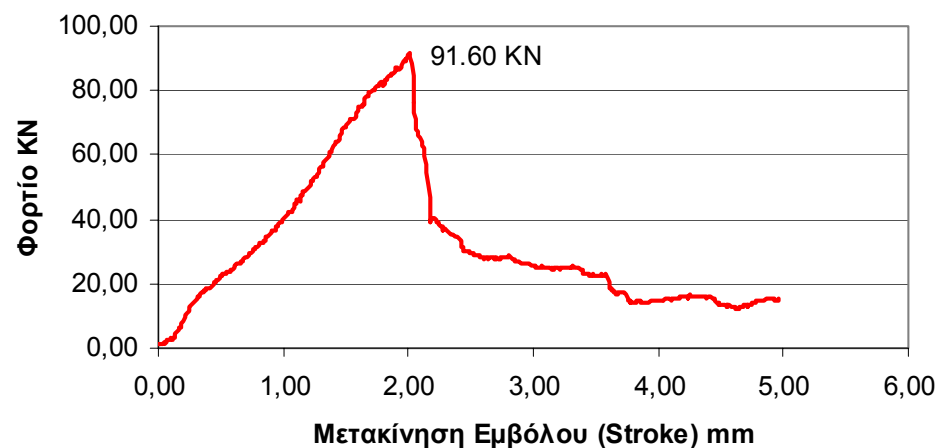
Μέτρο

Ελαστικότητας E

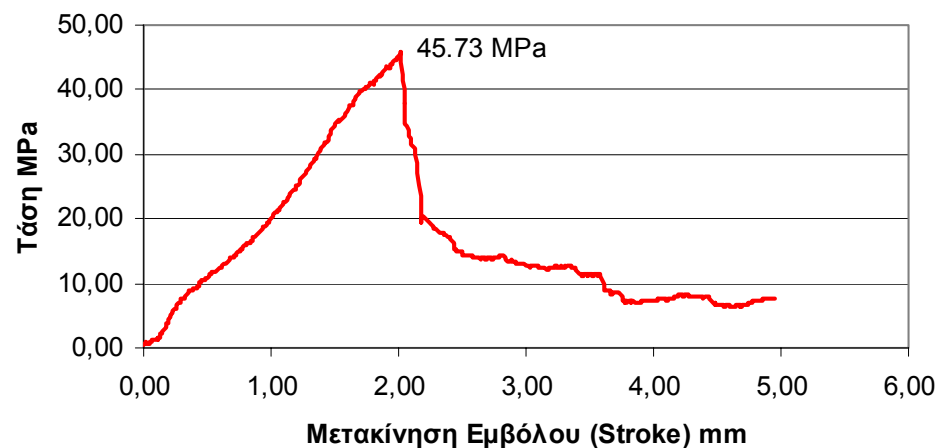
Ηλικία σε Ημέρες:

101

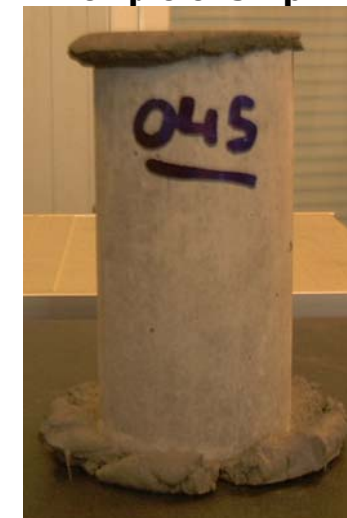
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 045



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 045



Δοκίμιο 045 Πριν



Δοκίμιο 045 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

046

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 4in.
Διαστάσεις: D = 2in.
Πραγματικές L= 10.15cm
Διαστάσεις: D=5.05cm

Βάρος: 0.475 Kg

Ειδικό Βάρος: 2336.442
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από Δεξαμενή:

Ημερομηνία 22 Μαΐου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges: 2

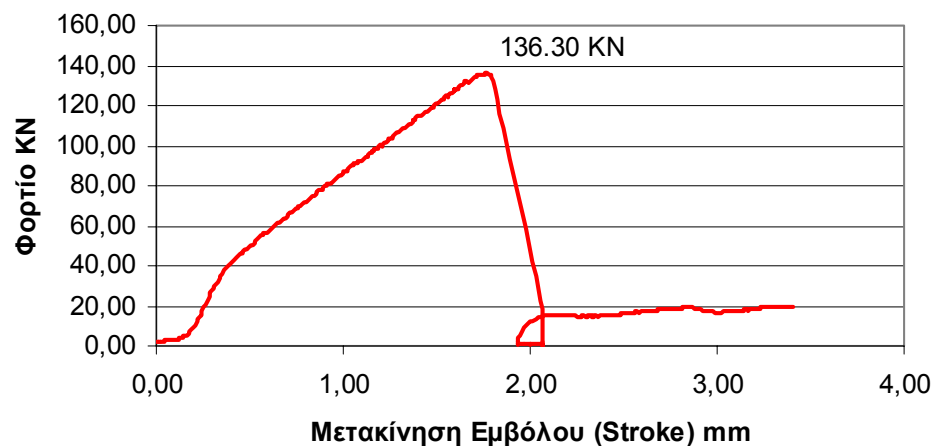
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 136.30 KN

Αντοχή: 68.05 MPa

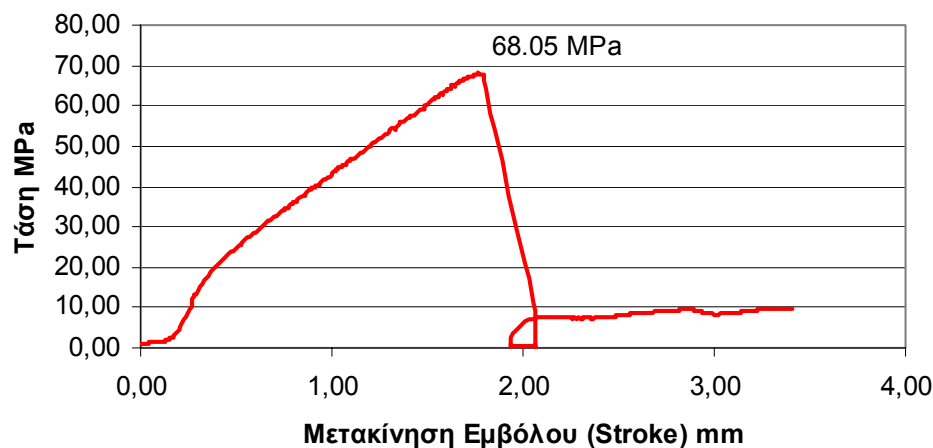
Μέτρο 38.2 GPa
Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες: 110

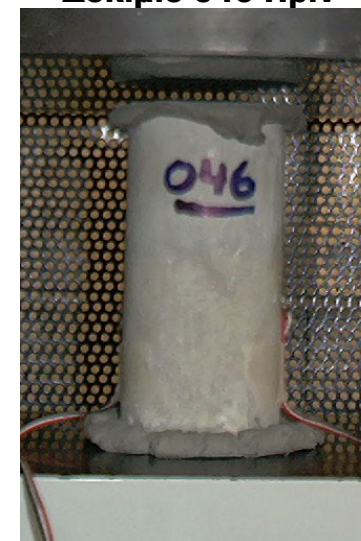
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 046



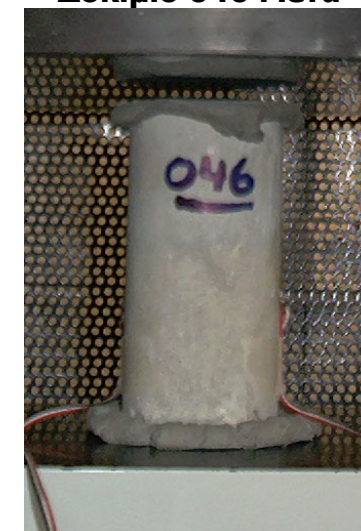
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 046



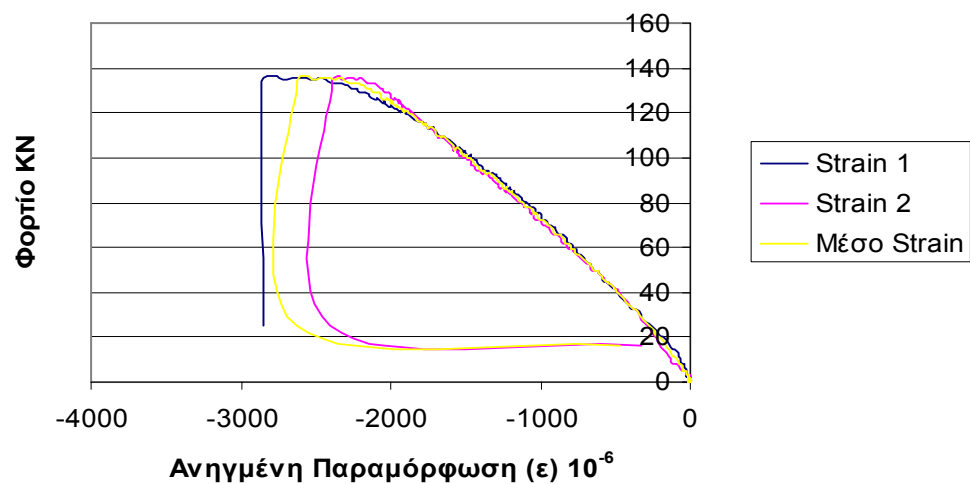
Δοκίμιο 046 Πριν



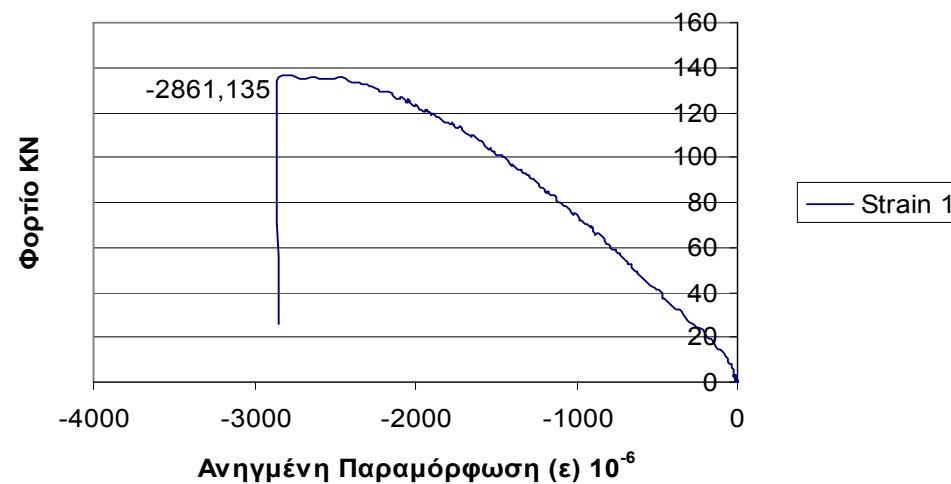
Δοκίμιο 046 Μετά



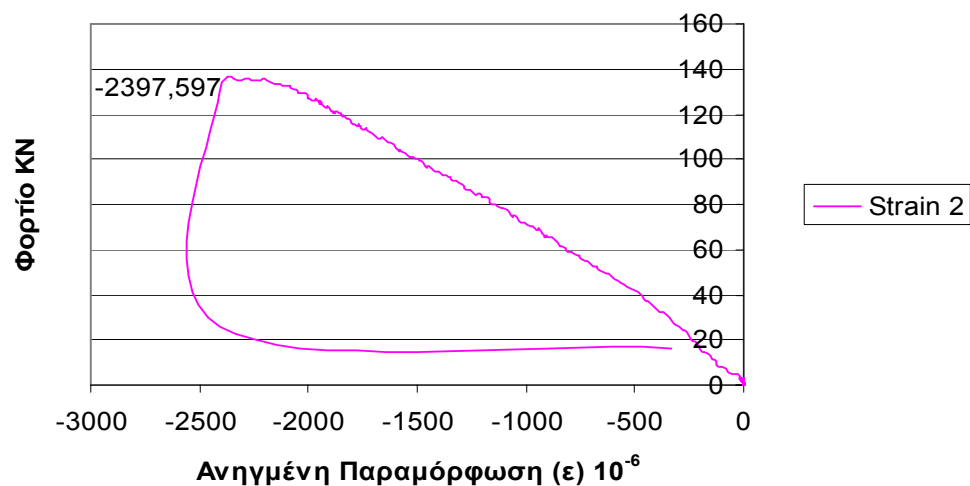
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 046



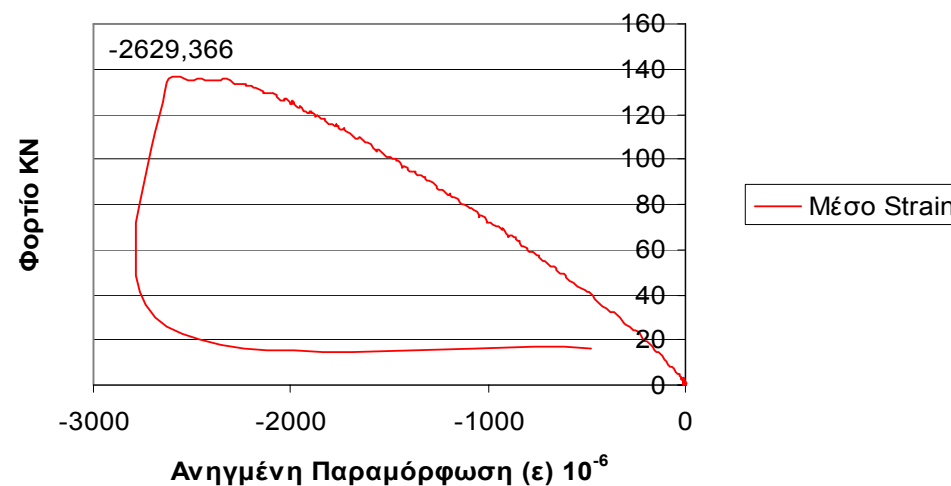
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 046

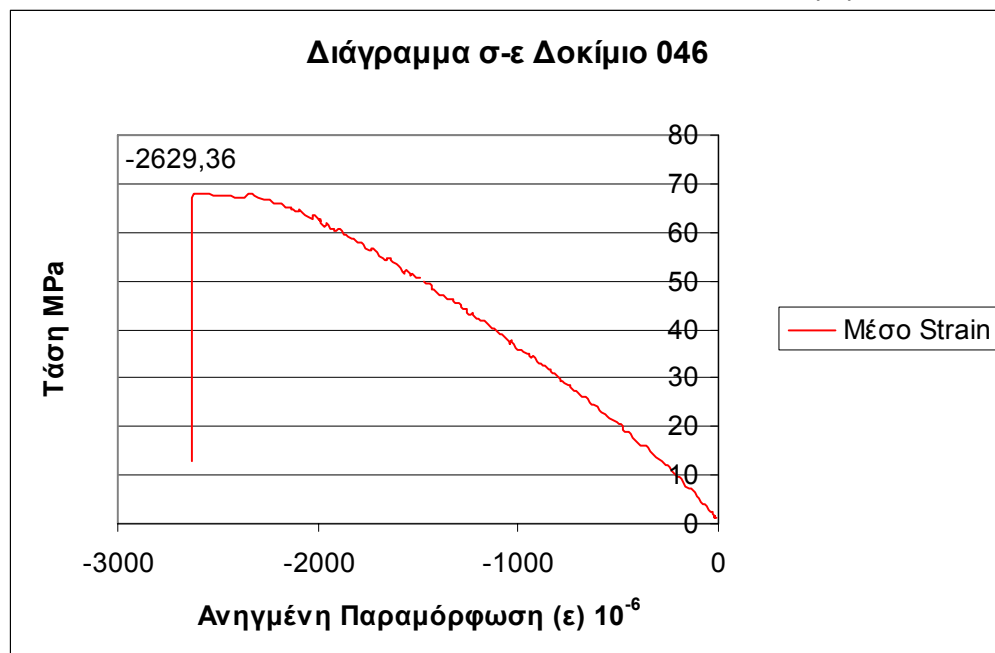


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 046



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 046





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.038 MPa/ε 10^{-6} και $R^2 = 0.9964$.

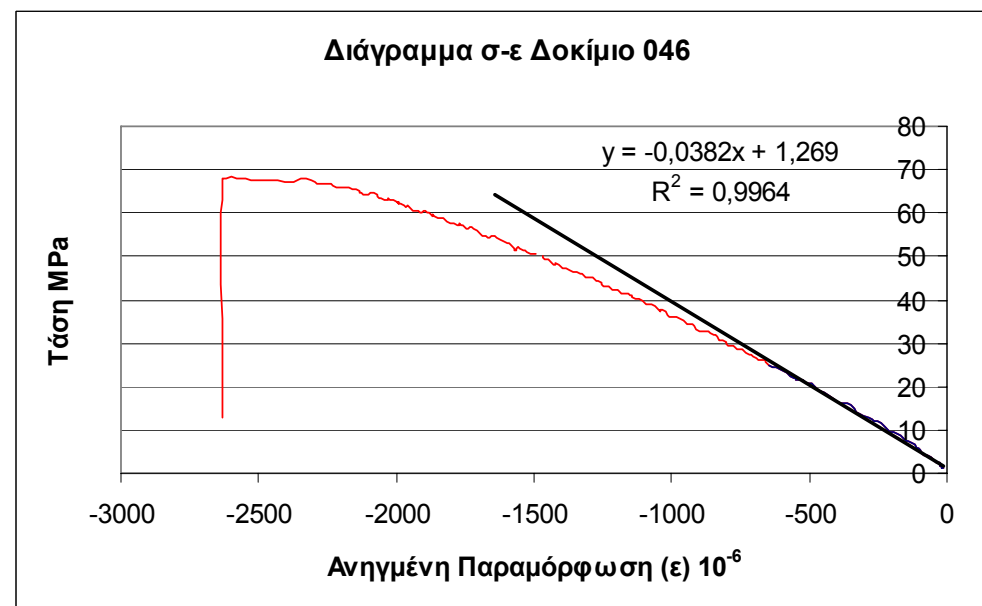
Επομένως:

$$E = 38.2 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 046 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

047

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 4in.
Διαστάσεις: D = 2in.
Πραγματικές L = 10.10cm
Διαστάσεις: D = 5.05cm

Βάρος: 0.475 Kg

Ειδικό Βάρος: 2348.008
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 17 Μαΐου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

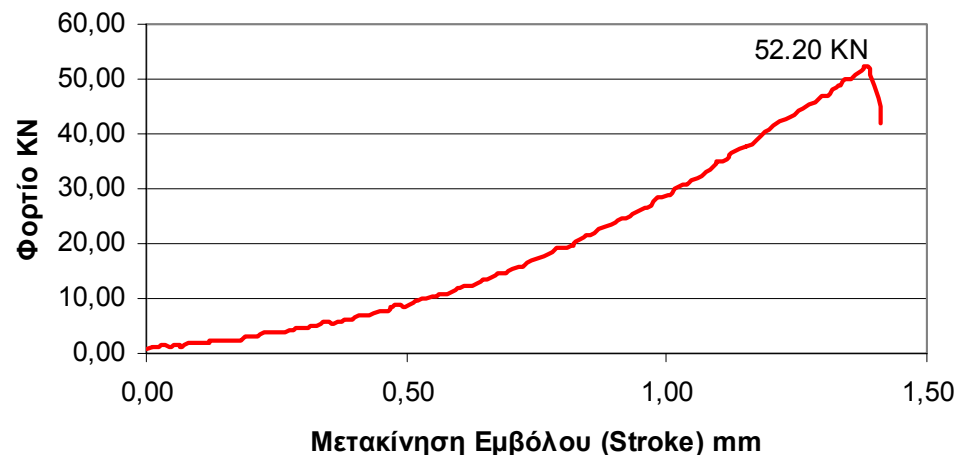
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 52.50 KN

Αντοχή: 6.52 MPa

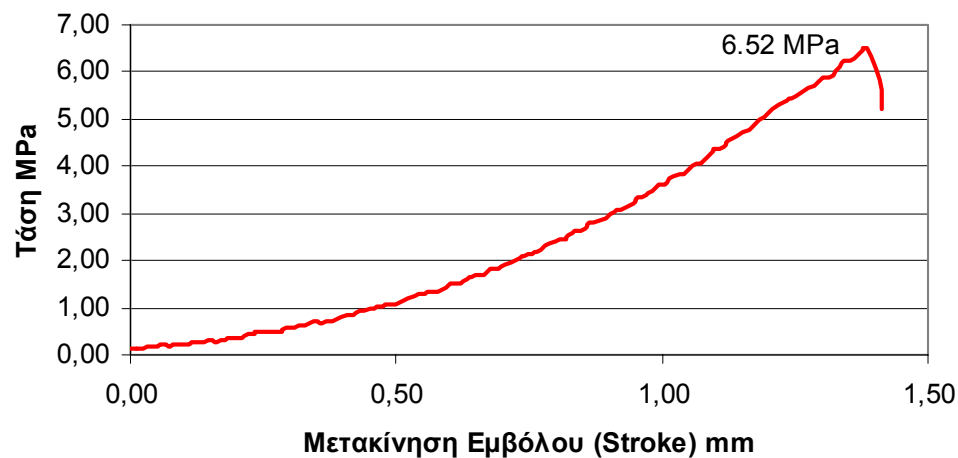
Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 105

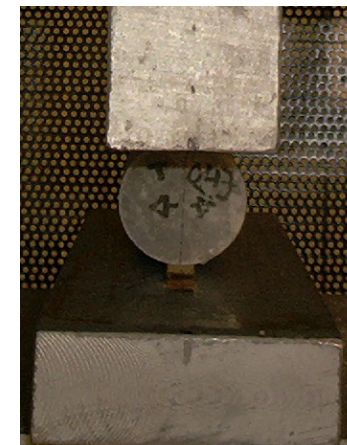
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 047



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 047



Δοκίμιο 047 Πριν



Δοκίμιο 047 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

048

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 4in.
Διαστάσεις: D = 2in.
Πραγματικές L= 10.20cm
Διαστάσεις: D=5.05cm

Βάρος: 0.485 Kg

Ειδικό Βάρος: 2373.936
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου
Εξαγωγής από: 2004

Δεξαμενή:
Ημερομηνία
Θραύσης: 18 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

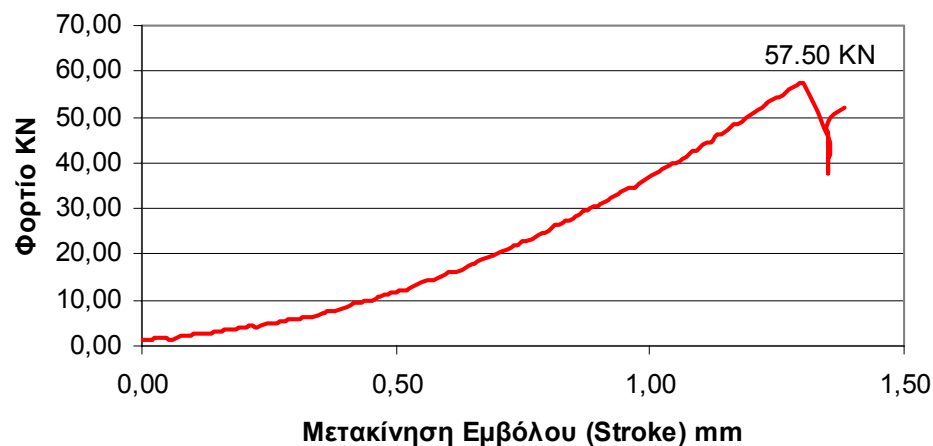
Ρυθμός
Μετακίνησης 0.01 mm/s
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 57.50 KN

Αντοχή: 7.11 MPa

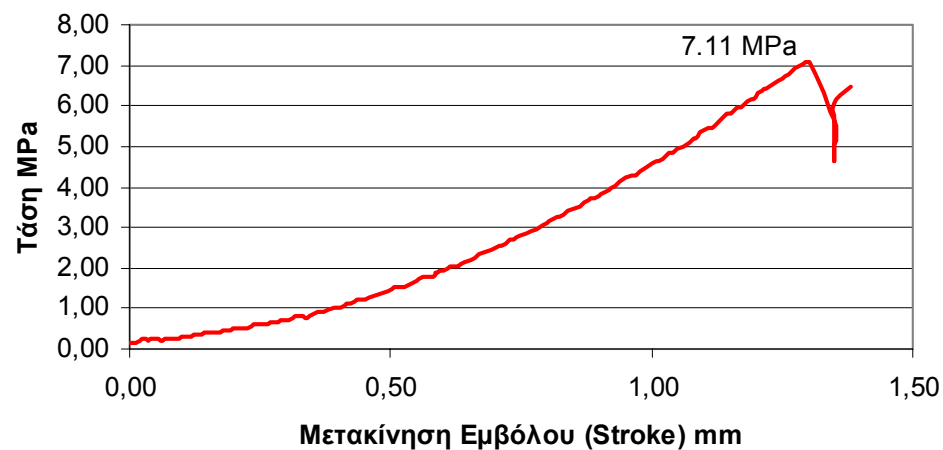
Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 048



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 048



Δοκίμιο 048 Πριν

N/A

Δοκίμιο 048 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

049

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 4in.
Διαστάσεις: D = 2in.
Πραγματικές L= 10.10cm
Διαστάσεις: D=5.05cm

Βάρος: 0.475 Kg

Ειδικό Βάρος: 2348.008
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου
Εξαγωγής από: 2004
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 18 Μαΐου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης 0.01 mm/s
εμβόλου (stroke):

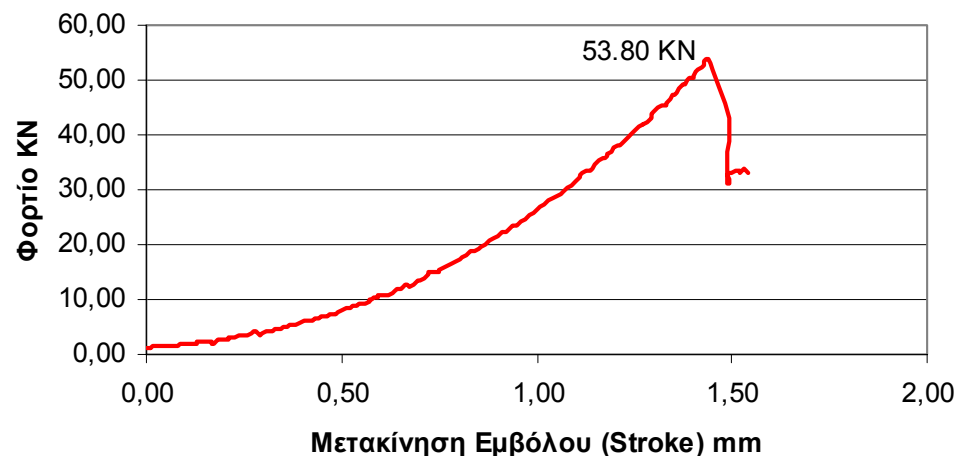
Φορτίο Αστοχίας: 53.80 KN

Αντοχή: 6.72 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

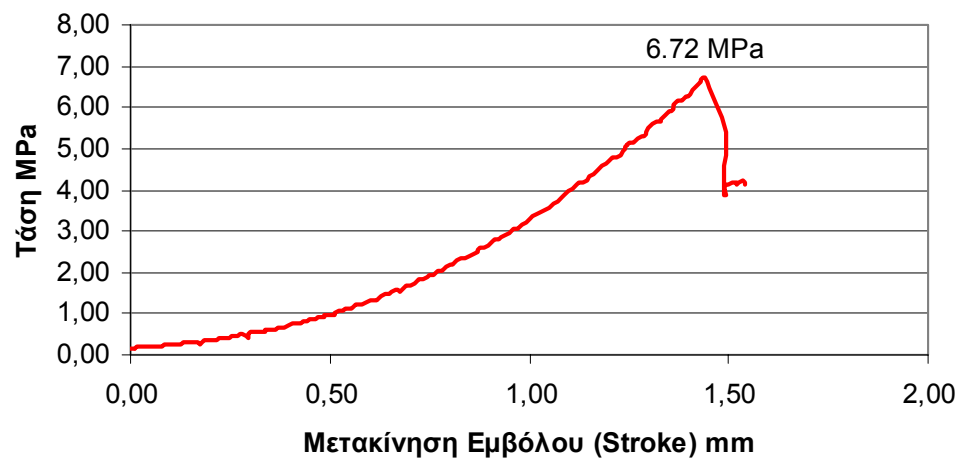
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 049



Δοκίμιο 049 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 049



Δοκίμιο 049 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

050

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 4in.
D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 10.10cm
D=5.05cm

Βάρος: 0.480 Kg

Ειδικό Βάρος: 2372.724
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 18 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

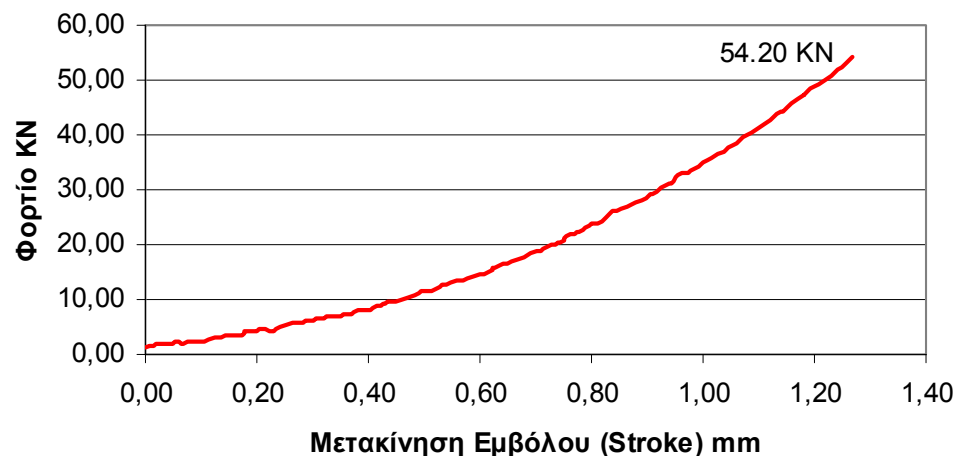
Φορτίο Αστοχίας: 54.20 KN

Αντοχή: 6.76 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

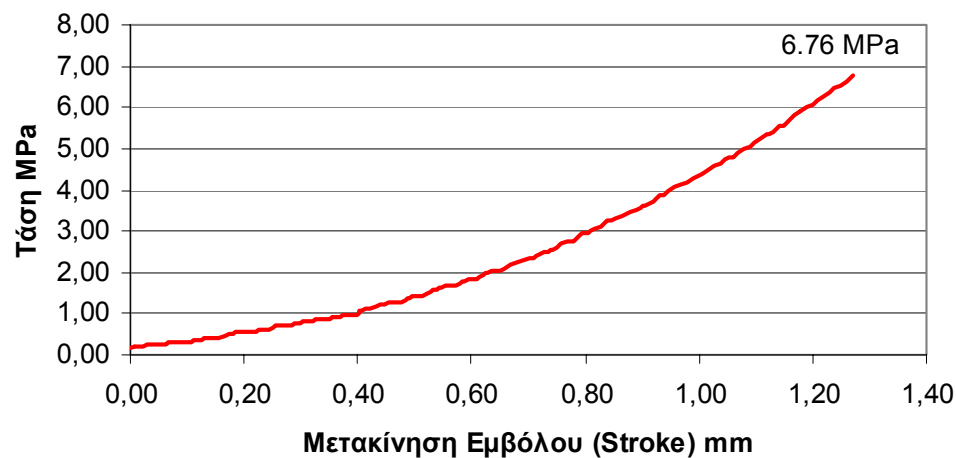
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 050



Δοκίμιο 050 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 050



Δοκίμιο 050 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

051

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 4in.
D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 10.15cm
D=5.05cm

Βάρος: 0.480 Kg

Ειδικό Βάρος: 2361.036
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 20 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

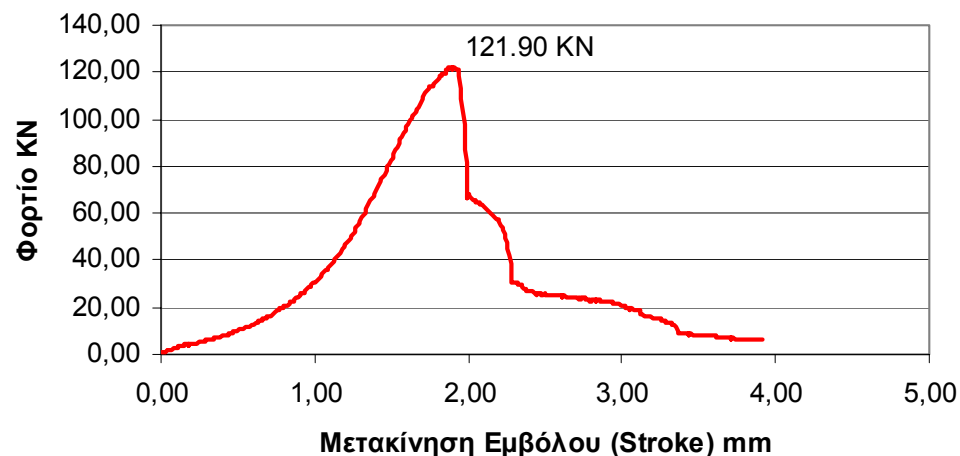
Φορτίο Αστοχίας: 121.90 KN

Αντοχή: 60.86 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 108

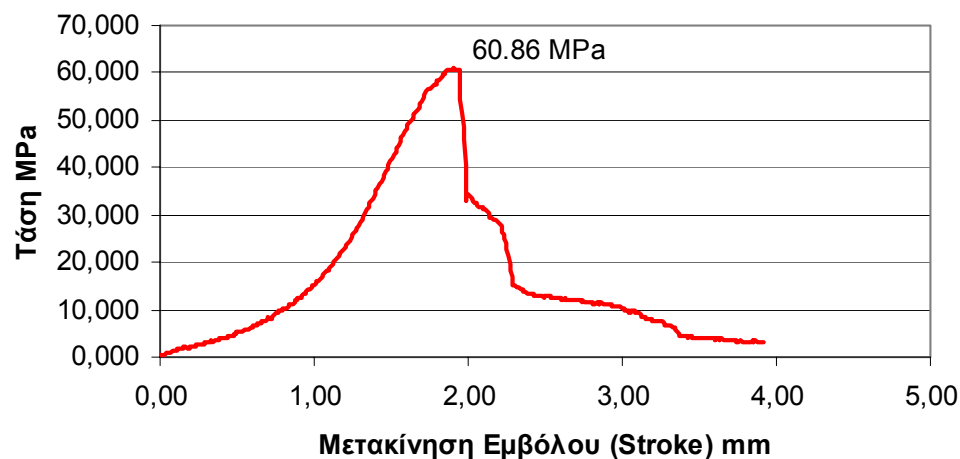
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 051



Δοκίμιο 051 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 051



Δοκίμιο 051 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

052

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 4in.
D = 2in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 10.20cm
D=5.05cm

Βάρος: 0.475 Kg

Ειδικό Βάρος: 2324.988
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 20 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

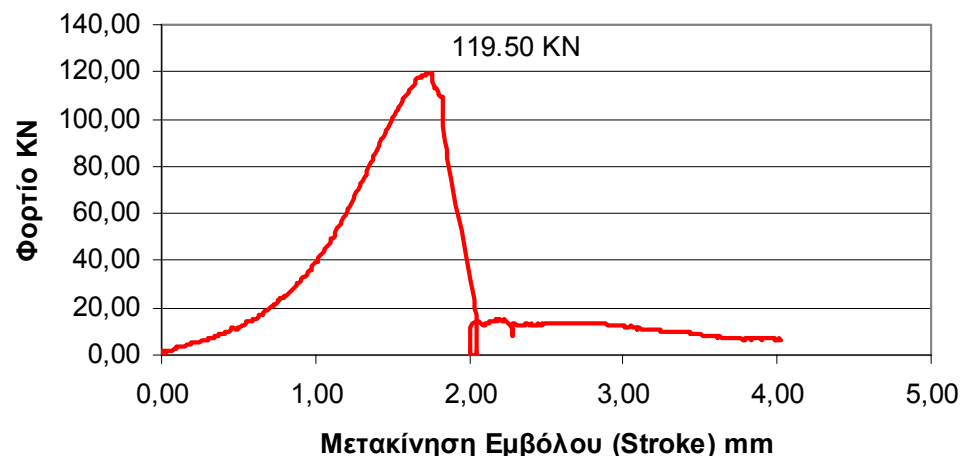
Φορτίο Αστοχίας: 119.50 KN

Αντοχή: 59.66 MPa

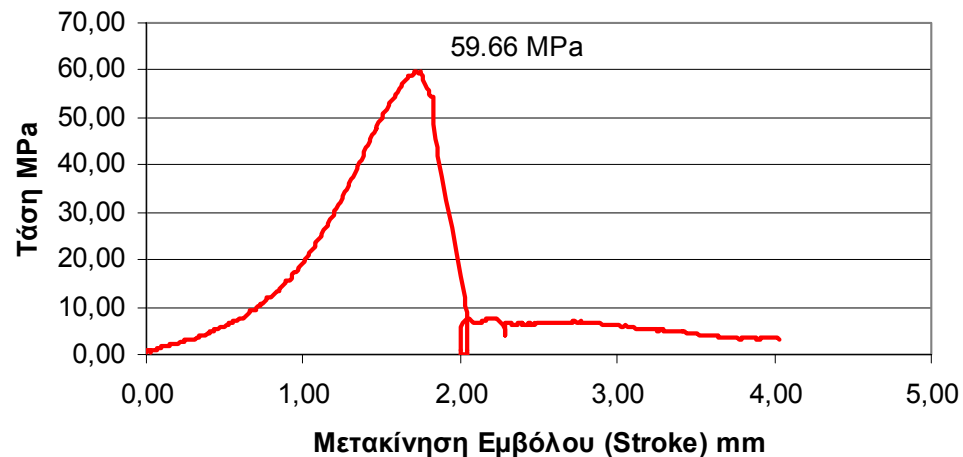
Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 108

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 052



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 052



Δοκίμιο 052 Πριν



Δοκίμιο 052 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

053

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 15.30cm
D=7.55cm

Βάρος: 1.610 Kg

Ειδικό Βάρος: 2350.448
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 4 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

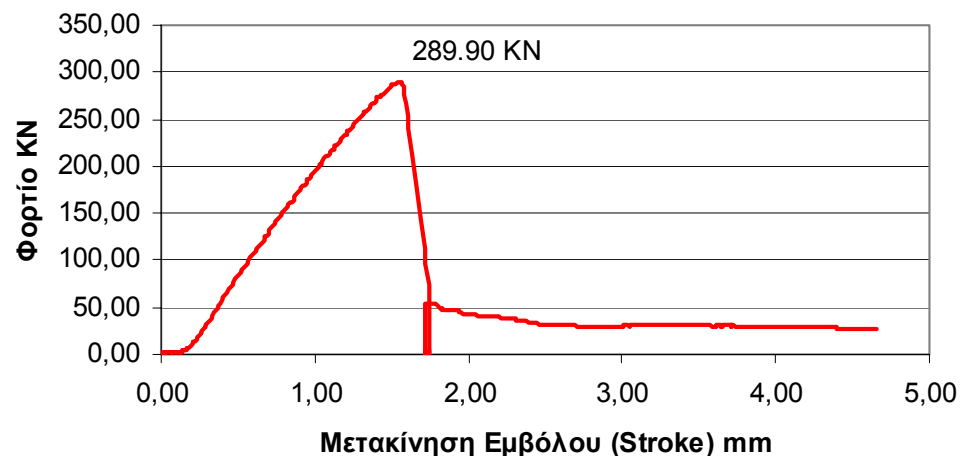
Φορτίο Αστοχίας: 289.90 KN

Αντοχή: 64.75 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: ----

Ηλικία σε Ημέρες: 92

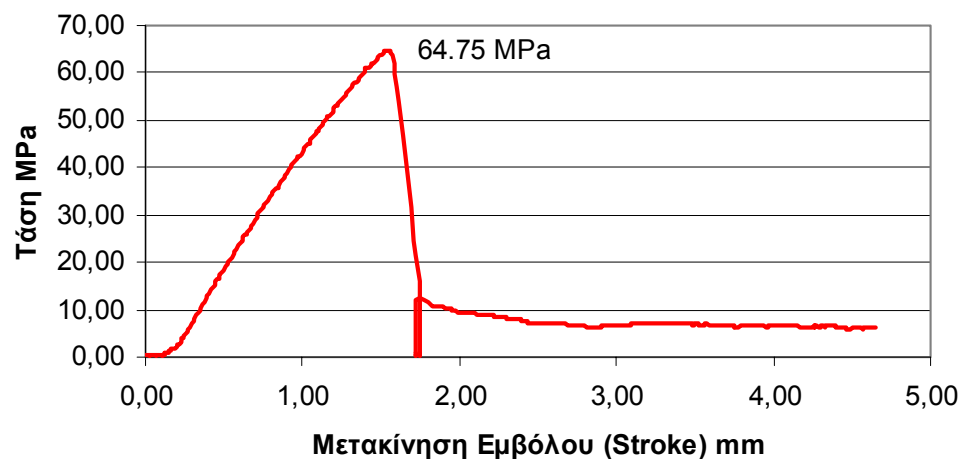
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 053



Δοκίμιο 053 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 053



Δοκίμιο 053 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου: 054

Σειράς: 2ης 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 6in.
Διαστάσεις: D = 3in.
Πραγματικές L= 15.25cm
Διαστάσεις: D=7.55cm

Βάρος: 1.600 Kg

Ειδικό Βάρος: 2343.508
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου
Εξαγωγής από 2004
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 4 Μαΐου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges: 0

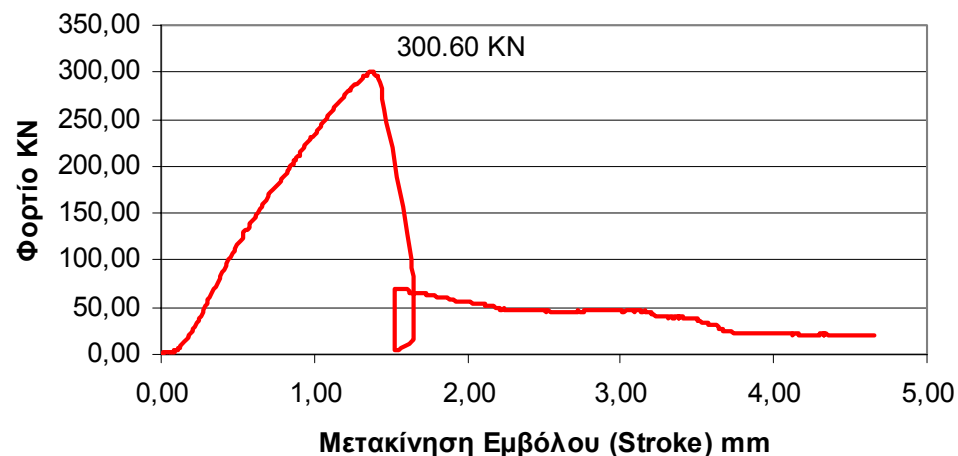
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 300.60 KN

Αντοχή: 67.14 MPa

Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 92

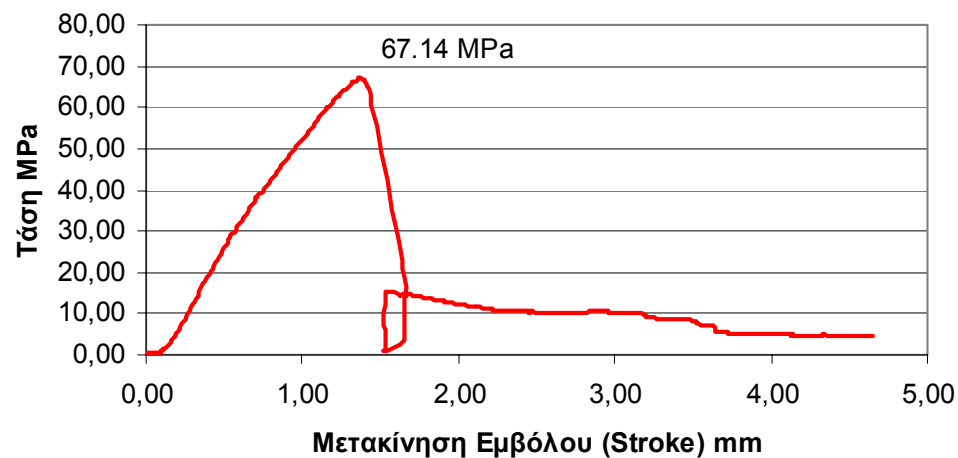
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 054



Δοκίμιο 054 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 054



Δοκίμιο 054 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

055

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L = 15.40cm
D = 7.55cm

Βάρος: 1.615 Kg

Ειδικό Βάρος: 2342.438
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 2

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

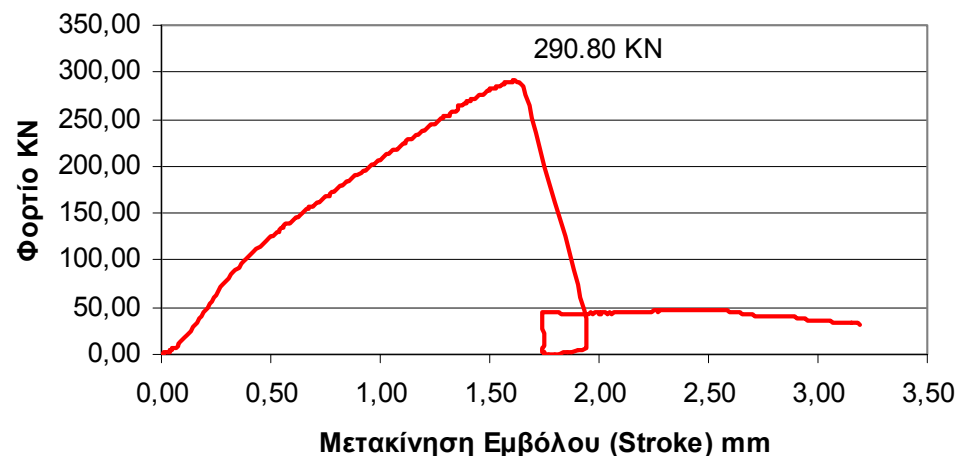
Φορτίο Αστοχίας: 290.80 KN

Αντοχή: 64.95 MPa

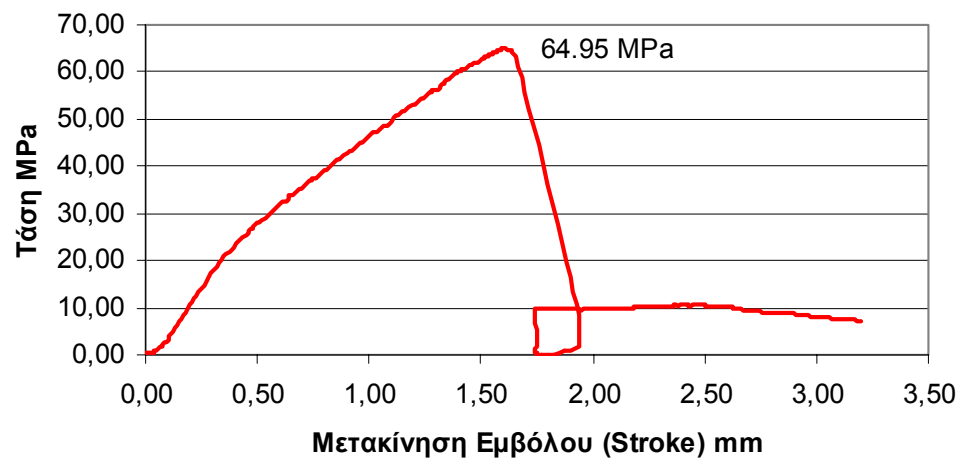
Μέτρο Ελαστικότητας E: 30.5 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 95

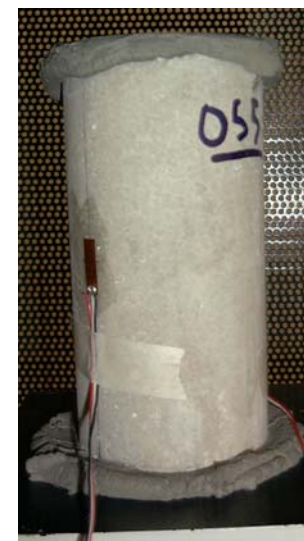
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 055



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 055



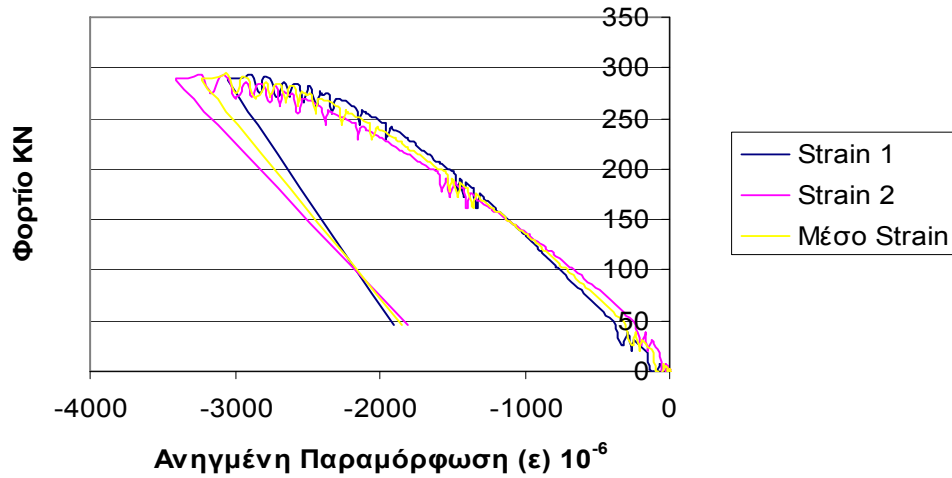
Δοκίμιο 055 Πριν



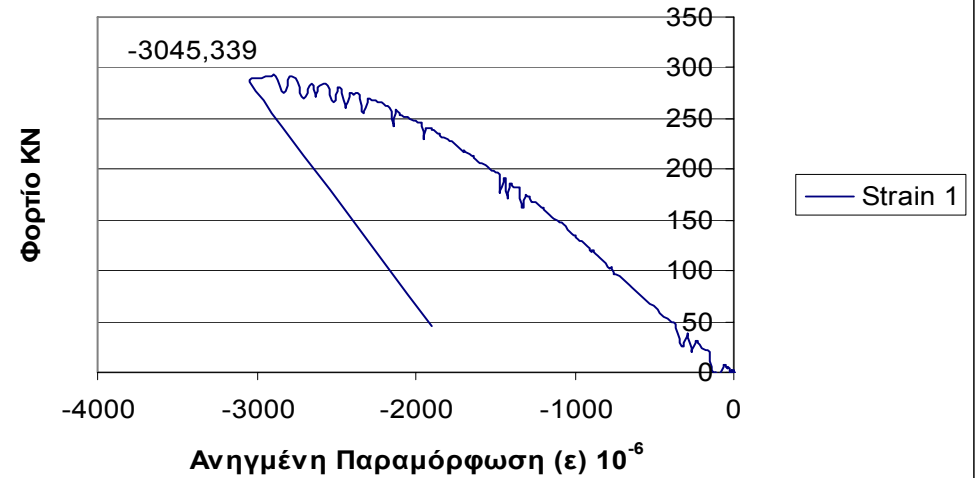
Δοκίμιο 055 Μετά



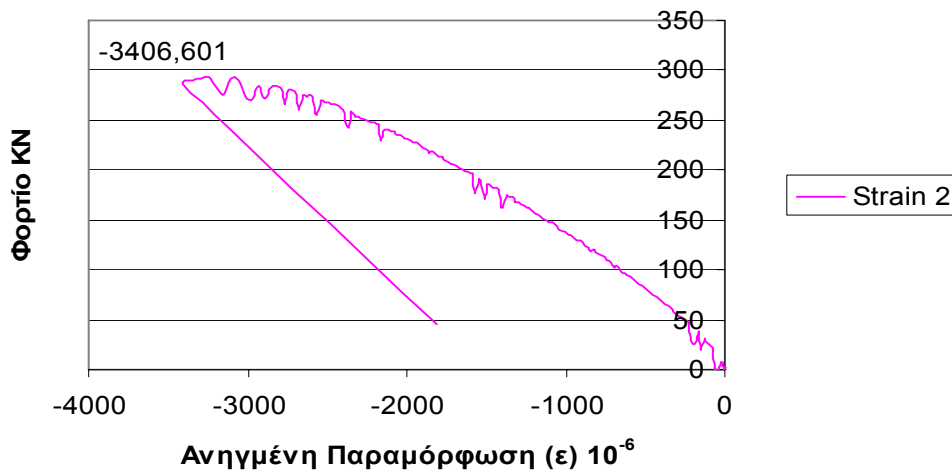
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 055



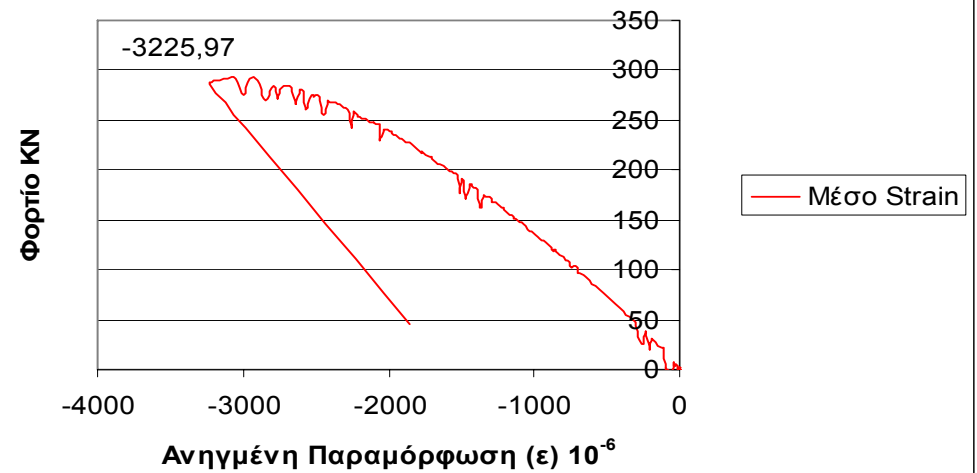
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 055

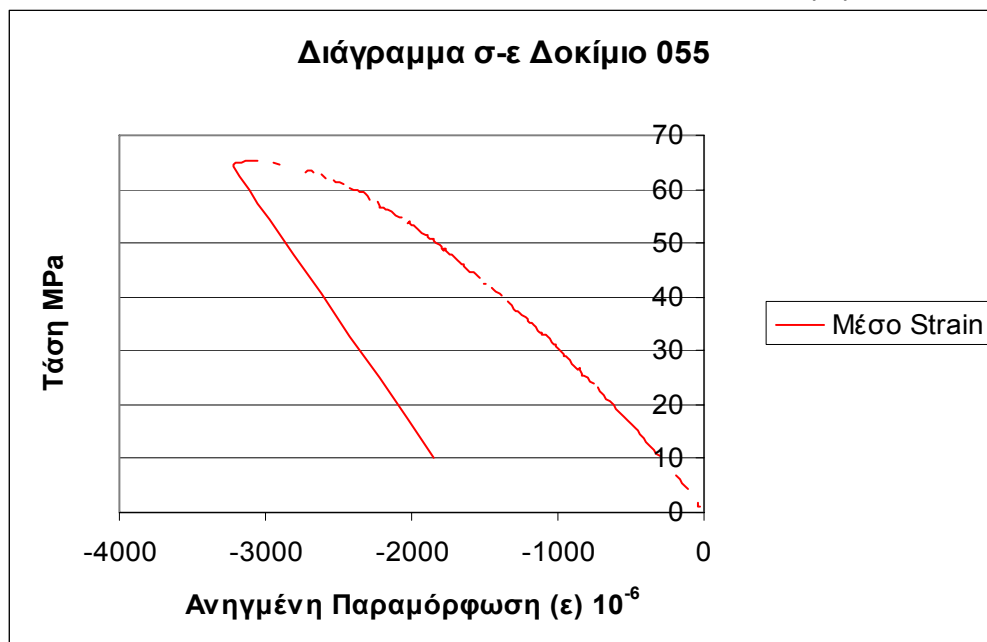


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 055



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 055





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 055 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

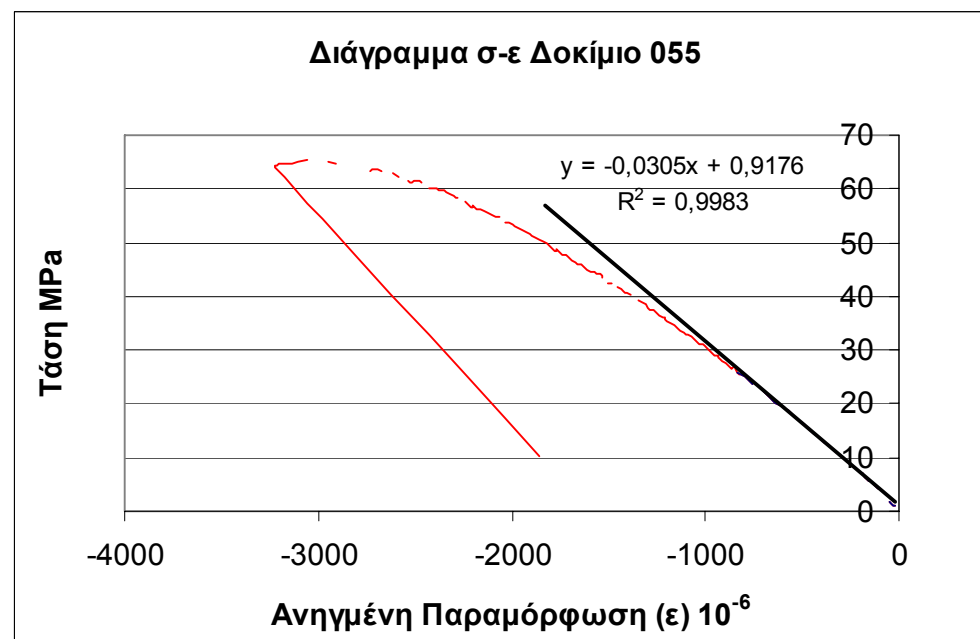
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.030 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9983$.

Επομένως:

$$E = 30.5 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:

056

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.225cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.595 Kg

Ειδικό Βάρος:

2340.020
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

4 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

270.80 KN

Αντοχή:

60.71 MPa

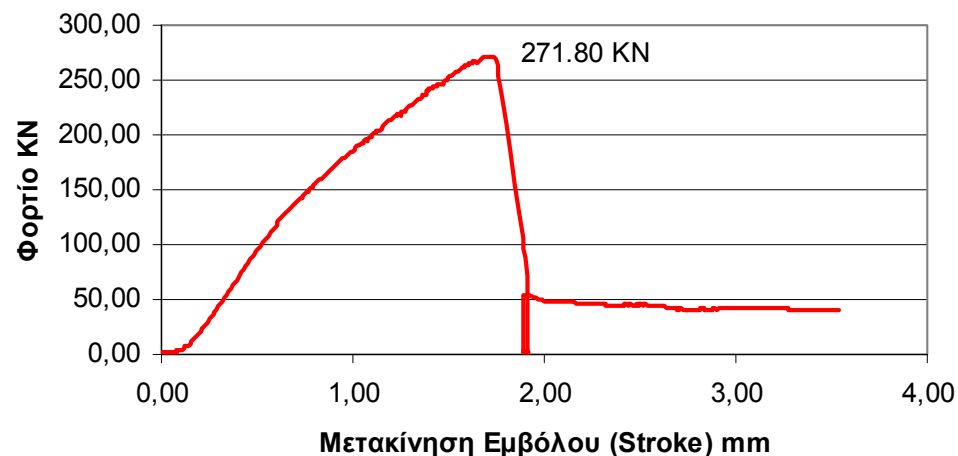
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

92

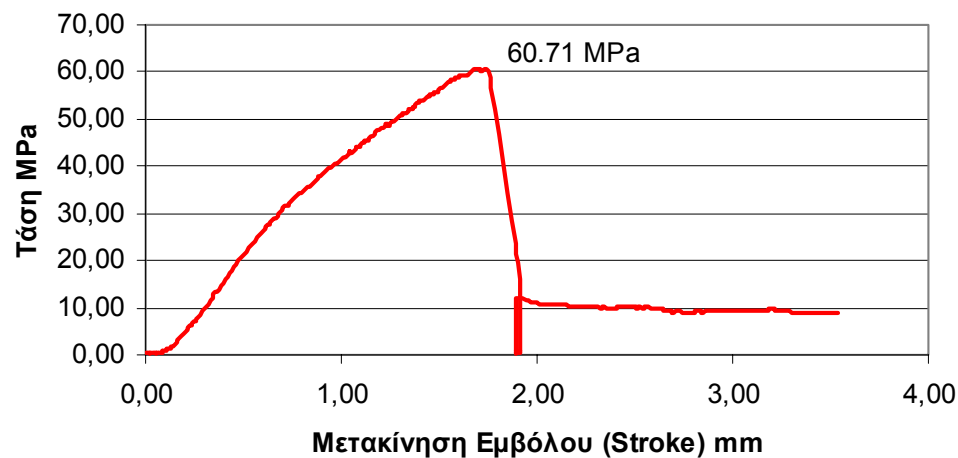
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 056



Δοκίμιο 056 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 056



Δοκίμιο 056 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

057

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.

Πραγματικές Διαστάσεις: L= 15.30cm
D=7.55cm

Βάρος: 1.605 Kg

Ειδικό Βάρος: 2343.149
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου
2004

Ημερομηνία Θραύσης: 20 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 2

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

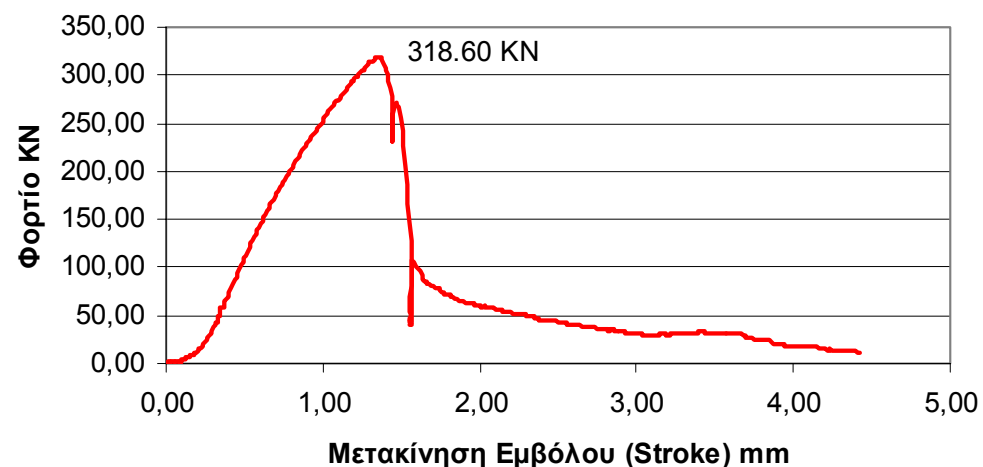
Φορτίο Αστοχίας: 318.60 KN

Αντοχή: 71.16 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 38.5 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 108

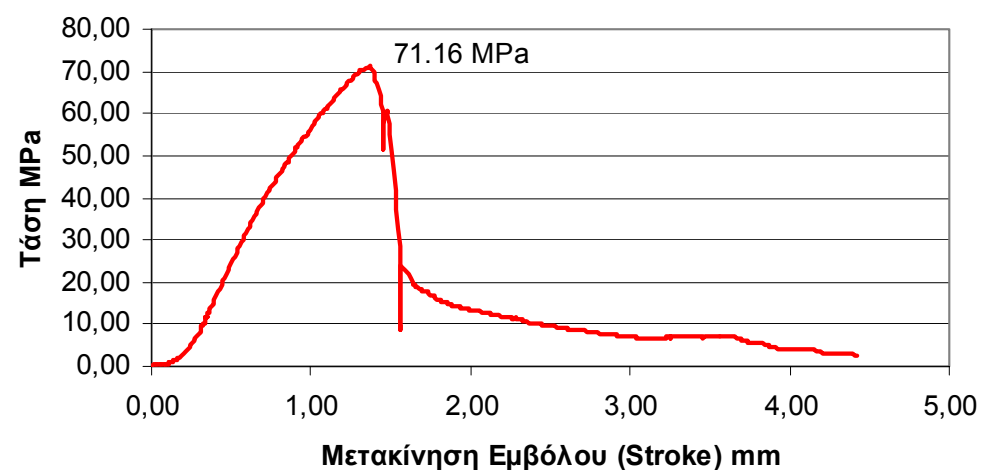
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 057



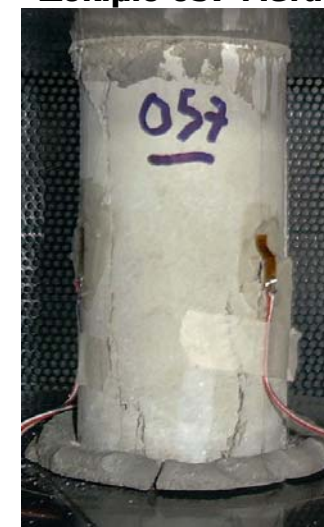
Δοκίμιο 057 Πριν



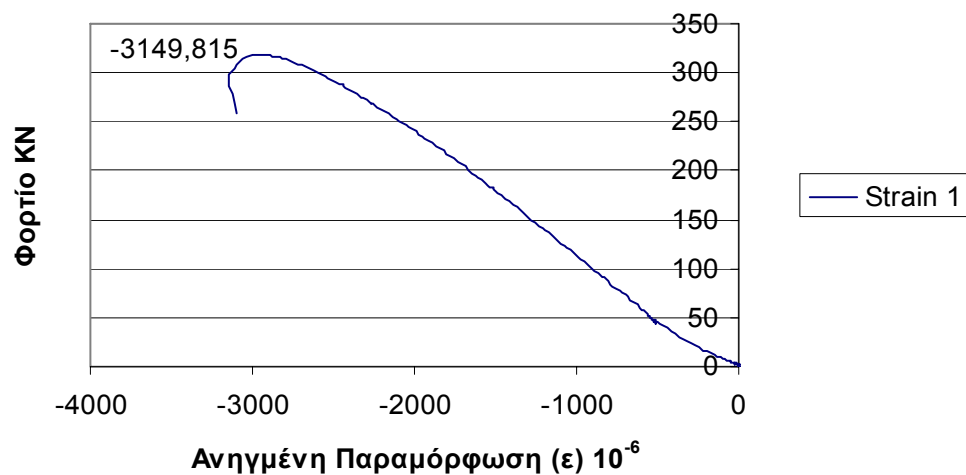
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 057



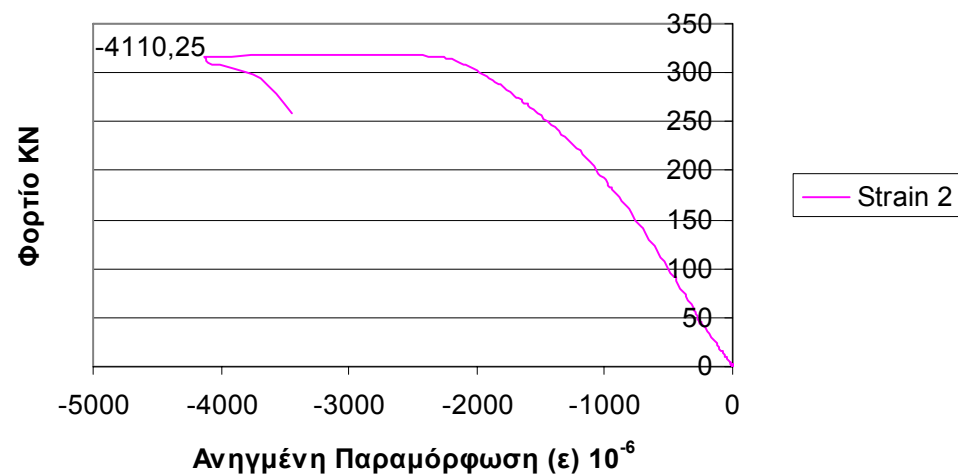
Δοκίμιο 057 Μετά



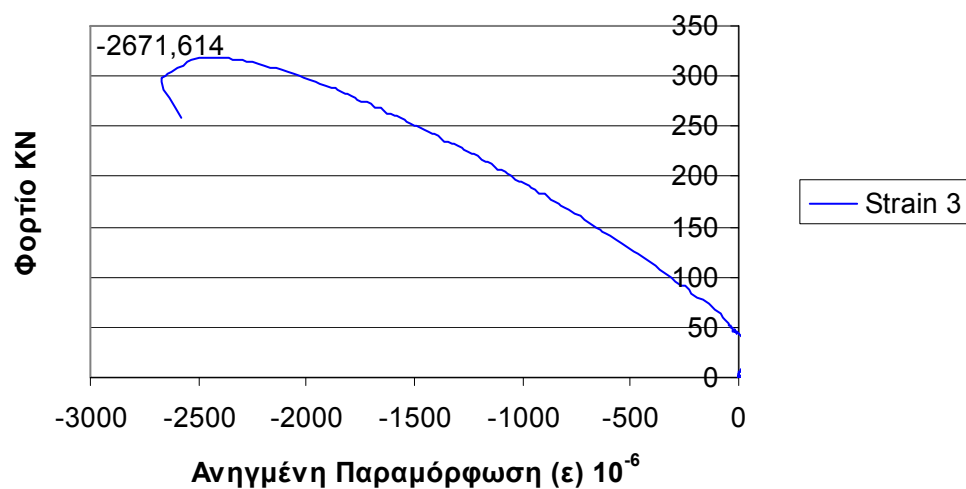
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 057



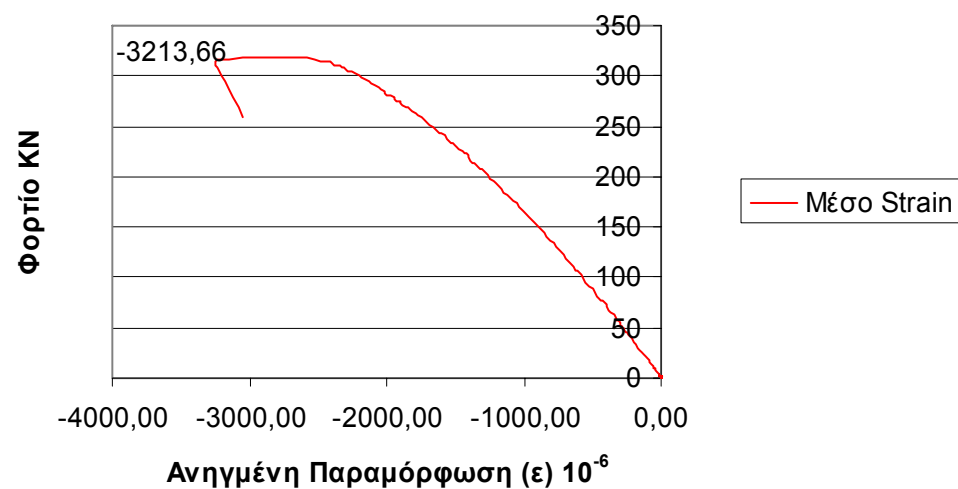
Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 057

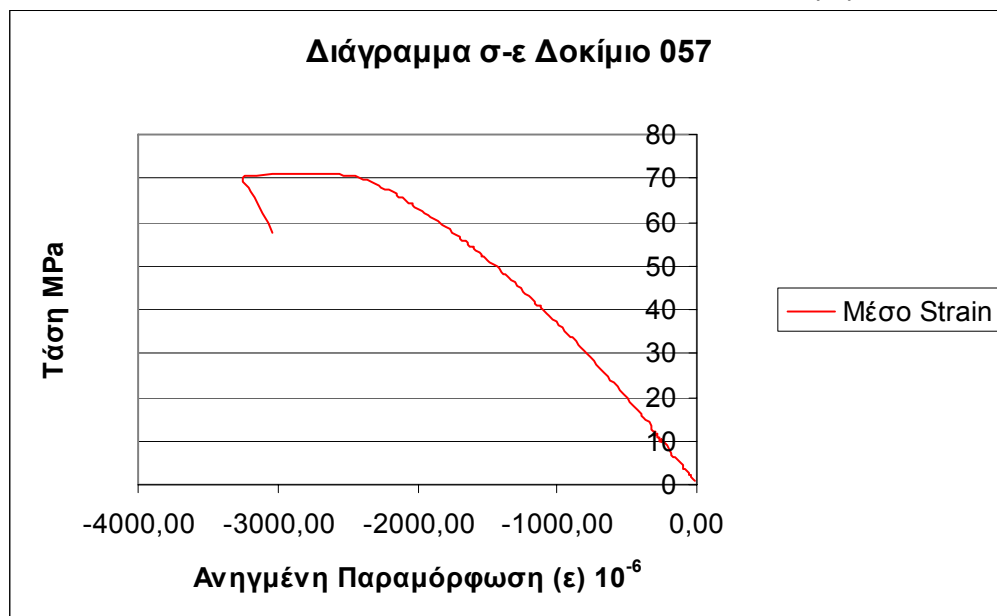


Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 057



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 057





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.038 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9991$.

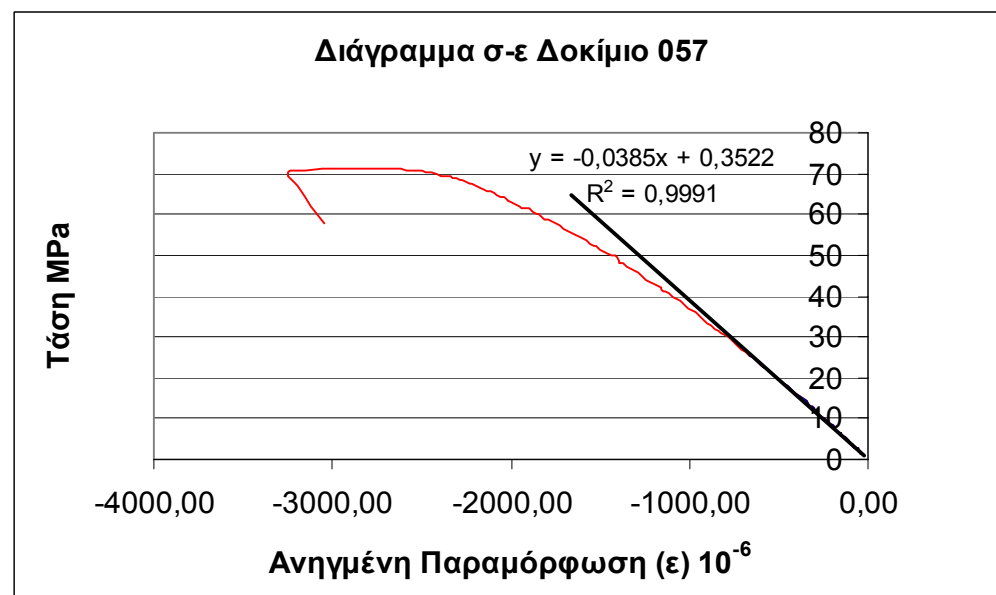
Επομένως:

$$E = 38.5 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 057 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

058

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: $L = 6\text{in.}$
Πραγματικές Διαστάσεις: $L = 15.325\text{cm}$
 $D = 7.55\text{cm}$

Βάρος: 1.600 Kg

Ειδικό Βάρος: 2332.038
 Kg/m^3

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 3

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

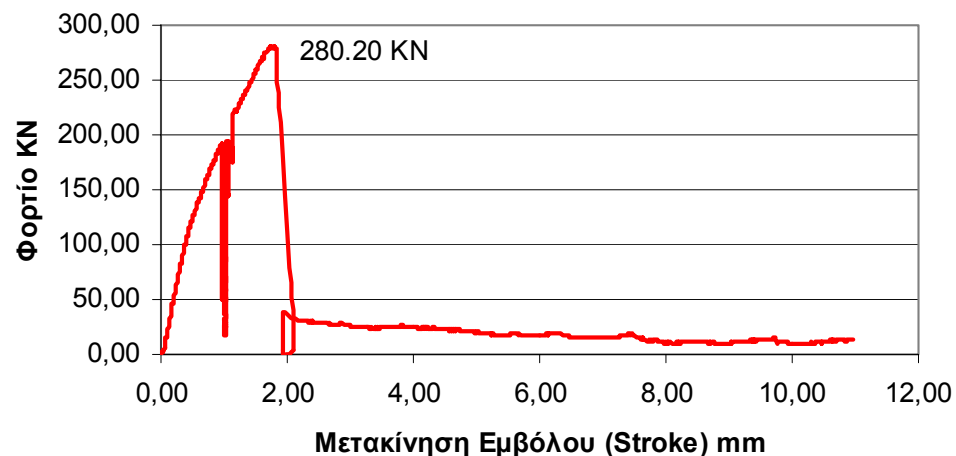
Φορτίο Αστοχίας: 280.20 KN

Αντοχή: 62.59 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 32.8 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 95

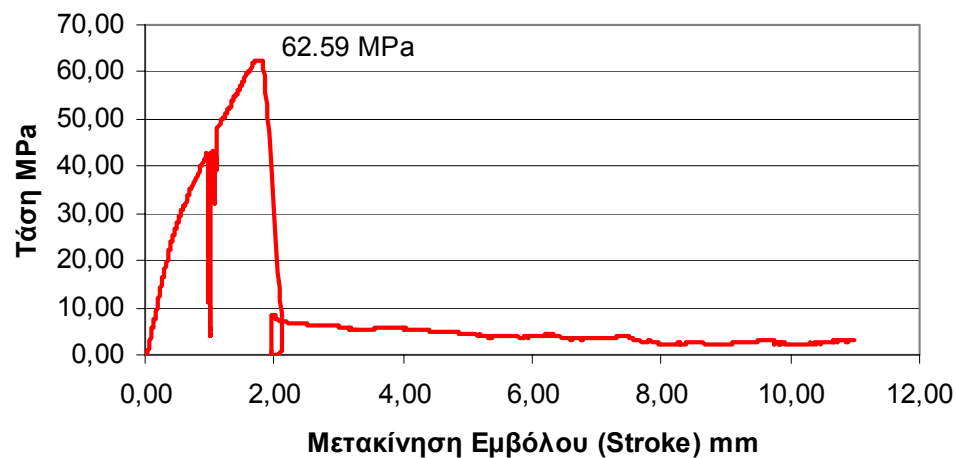
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 058



Δοκίμιο 058 Πριν



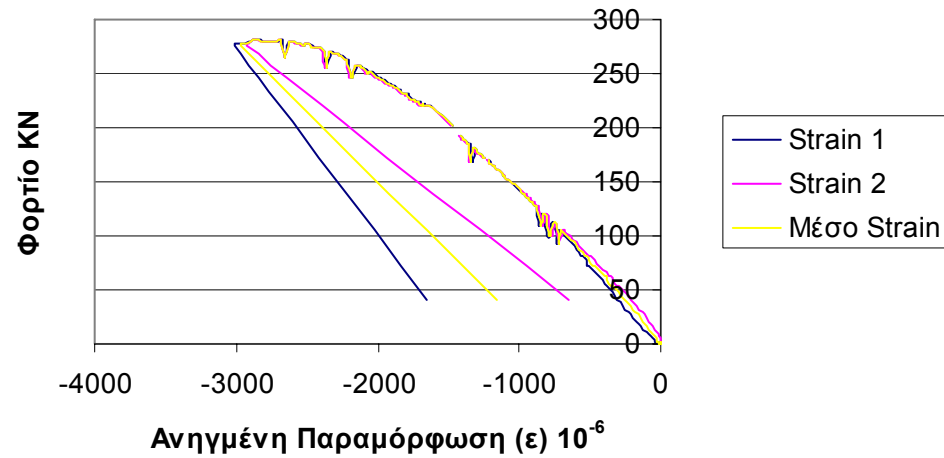
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 058



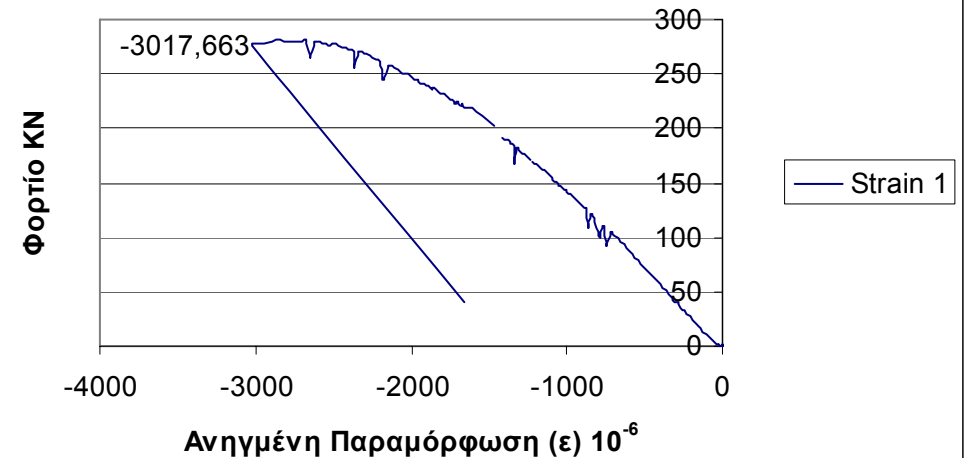
Δοκίμιο 058 Μετά



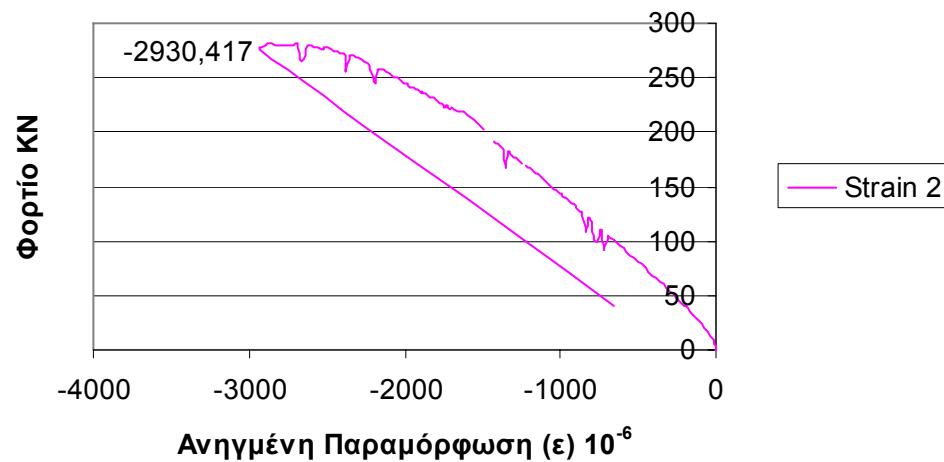
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 058



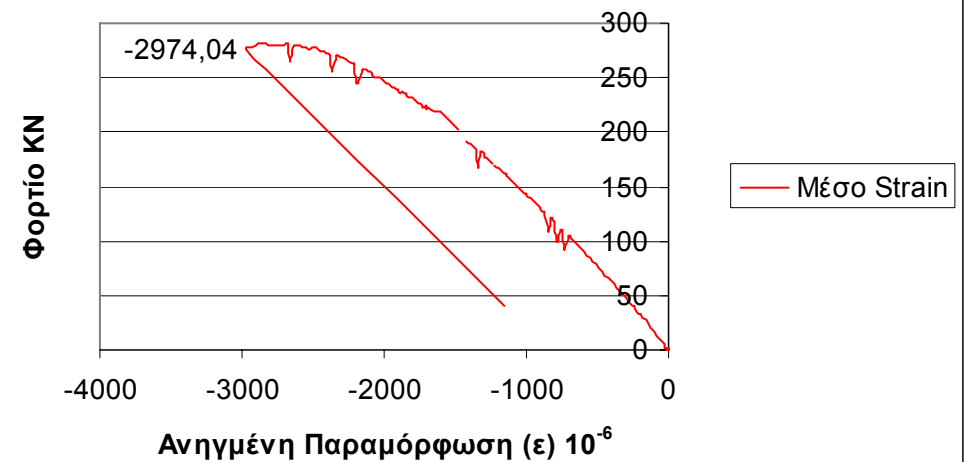
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 058

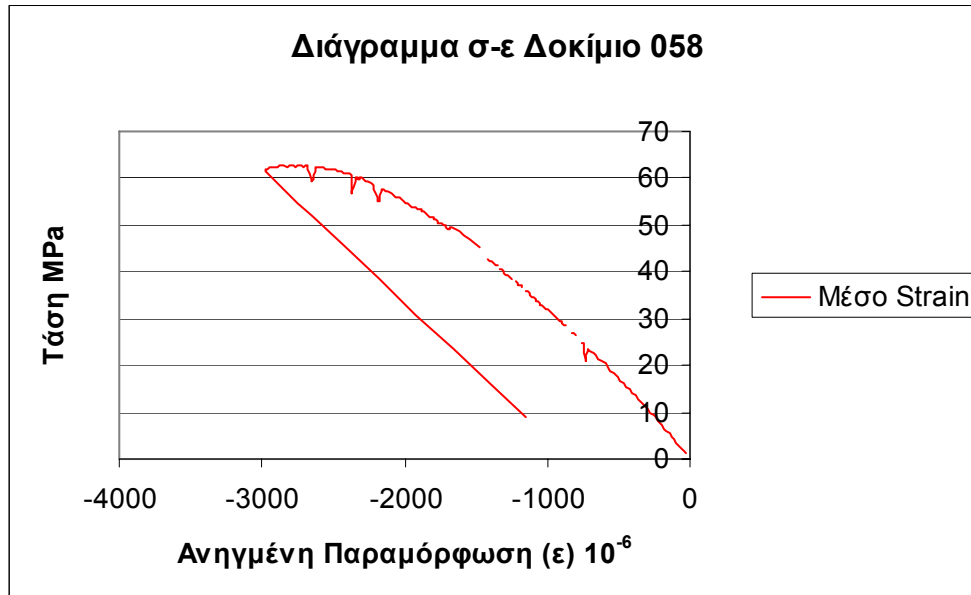


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 058



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 058





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 058 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνισιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

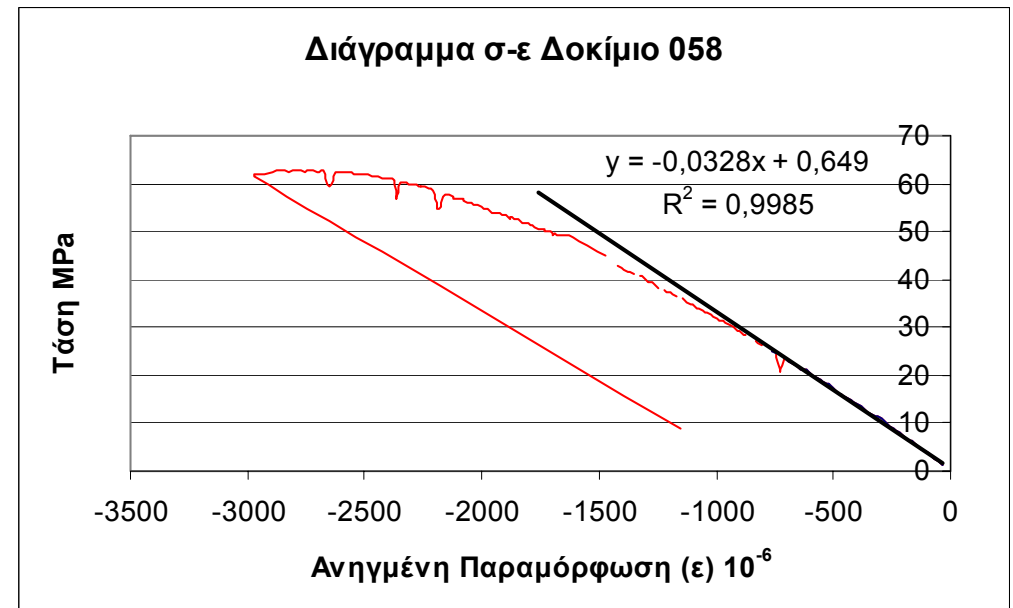
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.032 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9985$.

Επομένως:

$$E = 32.8 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:

059

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 6in.
D = 3in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 15.25cm
D=7.55cm

Βάρος: 1.595 Kg

Ειδικό Βάρος: 2336.184
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 4 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

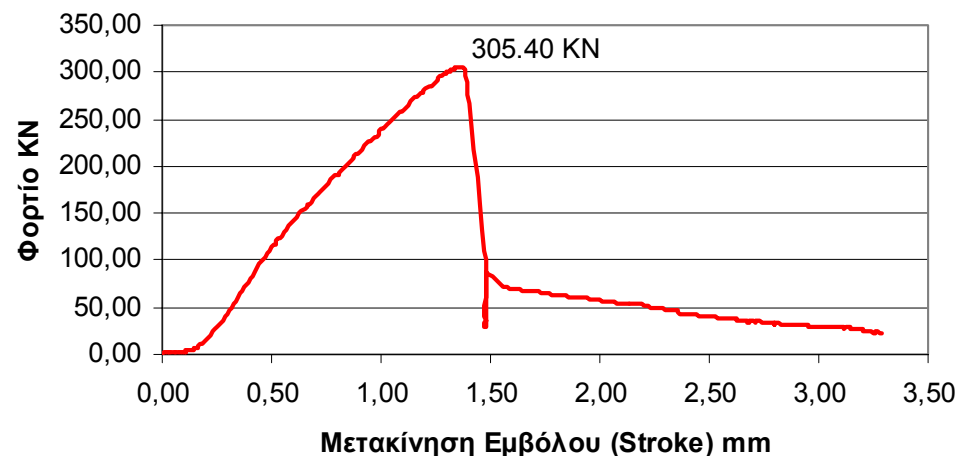
Φορτίο Αστοχίας: 305.40 KN

Αντοχή: 68.22 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: -----

Ηλικία σε Ημέρες: 92

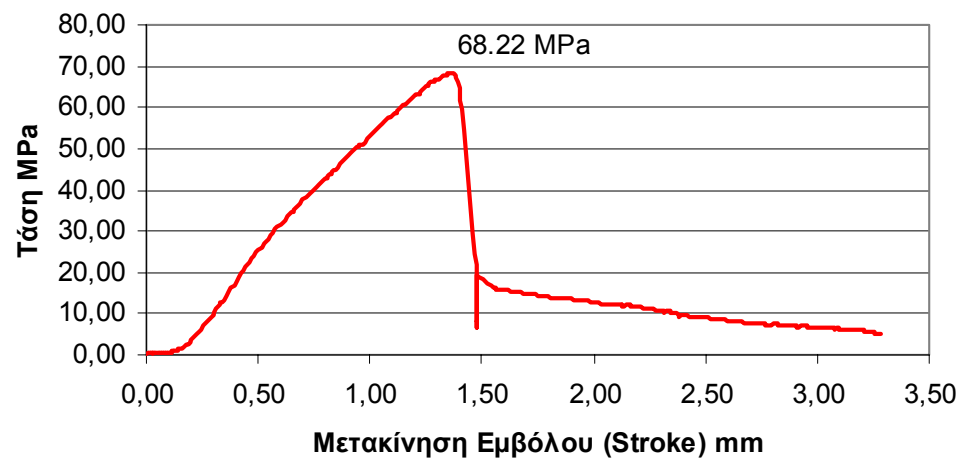
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 059



Δοκίμιο 059 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 059



Δοκίμιο 059 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

060

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.35cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.600 Kg

Ειδικό Βάρος:

232328.240
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

17 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

69.10 KN

Αντοχή:

3.80 MPa

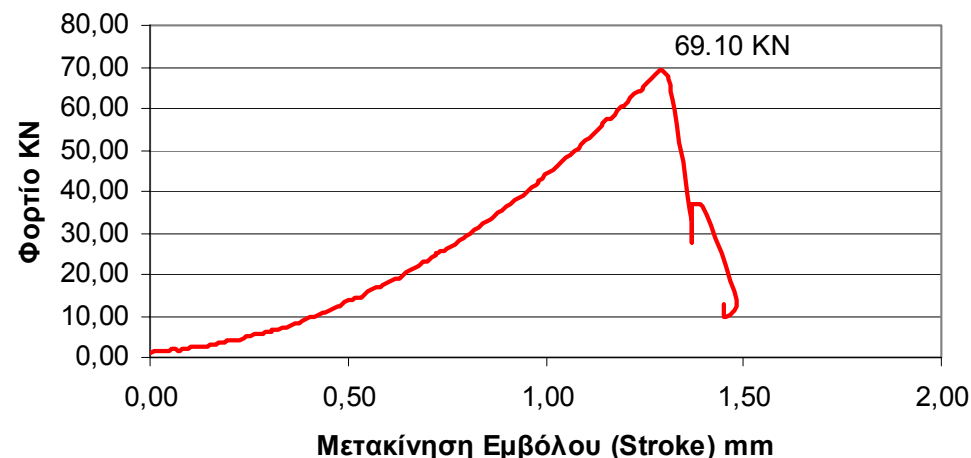
Μέτρο

Ελαστικότητας E

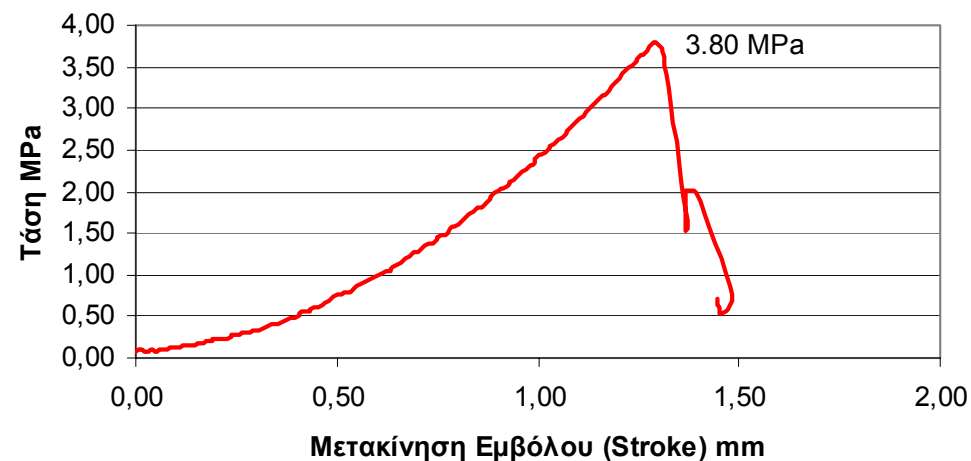
Ηλικία σε Ημέρες:

105

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 060



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 060



Δοκίμιο 060 Πριν



Δοκίμιο 060 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

061

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.275cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.600 Kg

Ειδικό Βάρος:

2339.672
Kg/m³

Ημερομηνία

2 Φεβρουαρίου

Σκυροδέτησης:

2004

Ημερομηνία

21 Απριλίου 2004

Εξαγωγής από

Δεξαμενή:

Ημερομηνία

Θραύσης:

15 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain

Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης

0.01 mm/s

εμβόλου (stroke):

Φορτίο Αστοχίας:

70.30 KN

Αντοχή:

3.88 MPa

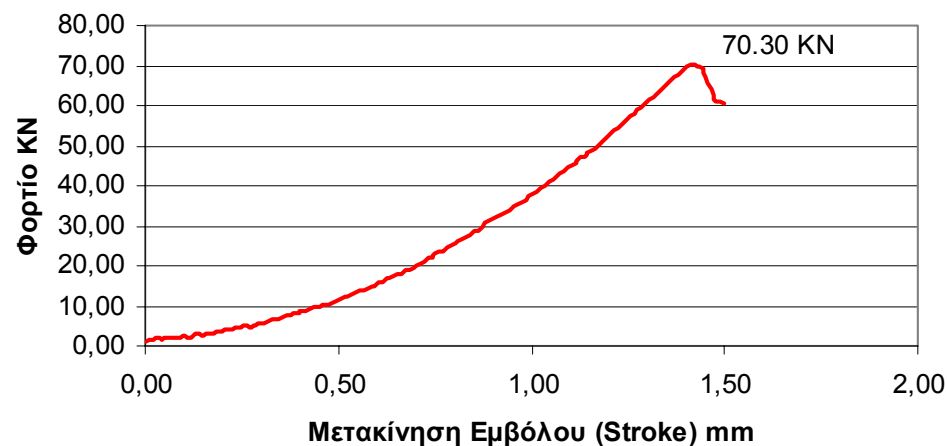
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

103

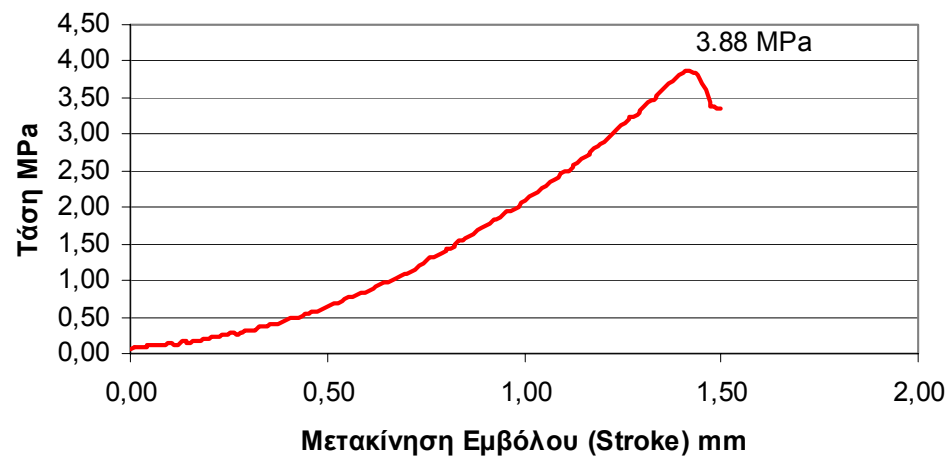
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 061



Δοκίμιο 061 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 061



Δοκίμιο 061 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

062

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.40cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.610 Kg

Ειδικό Βάρος:

2335.185
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

15 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

77.50 kN

Αντοχή:

4.24 MPa

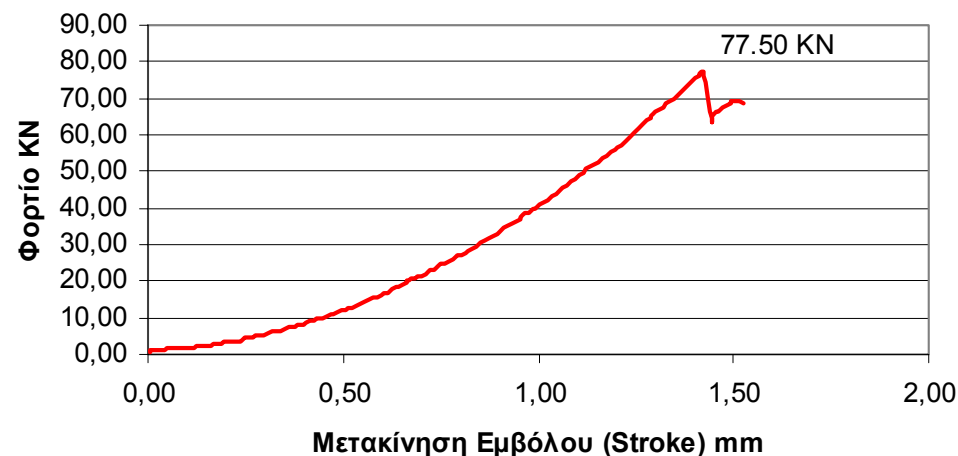
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

103

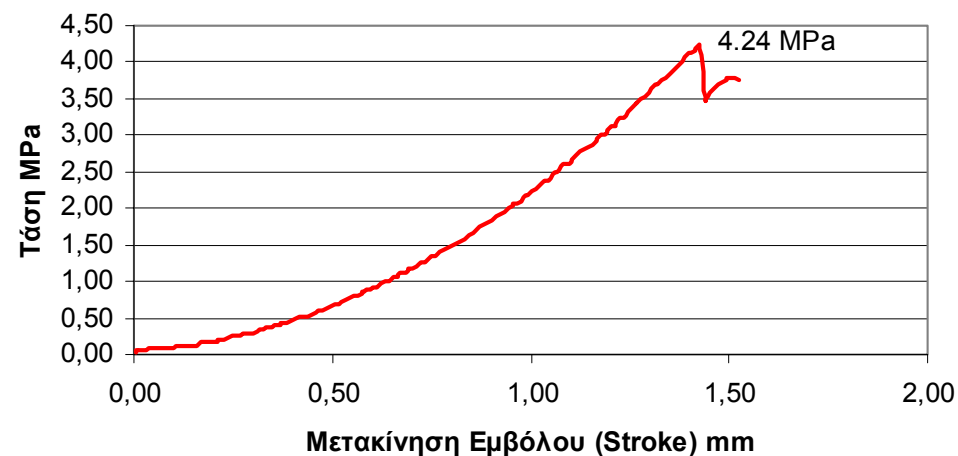
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 062



Δοκίμιο 062 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 062



Δοκίμιο 062 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

063

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 6in.

Διαστάσεις:

D = 3in.

Πραγματικές

L= 15.40cm

Διαστάσεις:

D=7.55cm

Βάρος:

1.605 Kg

Ειδικό Βάρος:

2327.933
Kg/m³

Ημερομηνία

2 Φεβρουαρίου

Σκυροδέτησης:

2004

Ημερομηνία

21 Απριλίου 2004

Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία

15 Μαΐου 2004

Θραύσης:

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain

Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης

0.01 mm/s

εμβόλου (stroke):

Φορτίο Αστοχίας:

84.80 KN

Αντοχή:

4.64 MPa

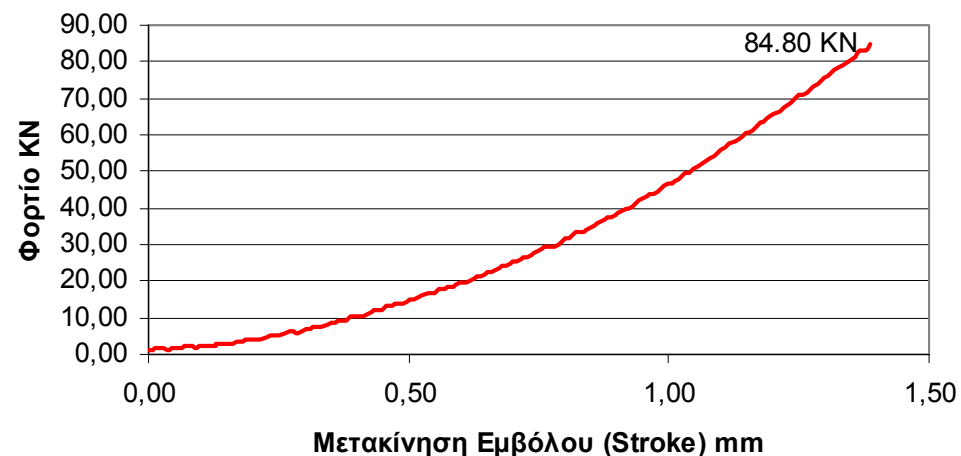
Μέτρο

Ελαστικότητας E

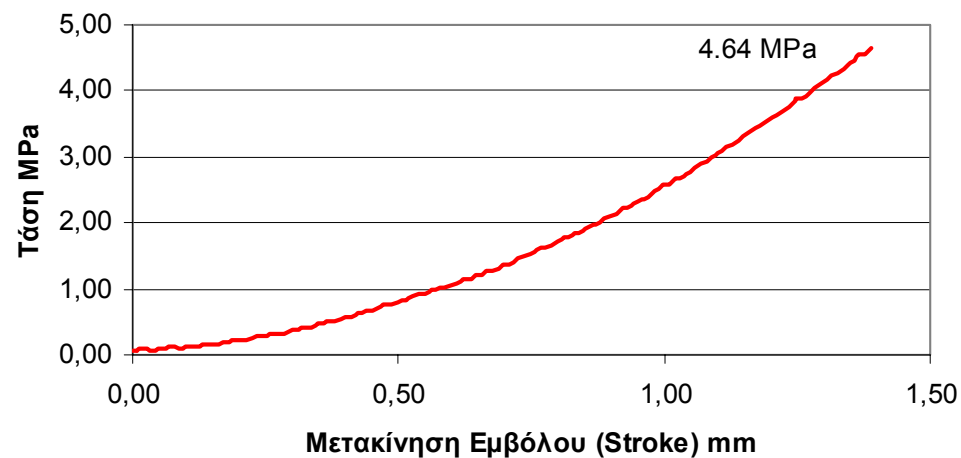
Ηλικία σε Ημέρες:

103

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 063



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 063



Δοκίμιο 063 Πριν



Δοκίμιο 063 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

066

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 8in.

Διαστάσεις:

D = 4in.

Πραγματικές

L= 20.40cm

Διαστάσεις:

D=10.10cm

Βάρος:

3.785 Kg

Ειδικό Βάρος:

2315.811
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

4 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

506.90 KN

Αντοχή:

63.27 MPa

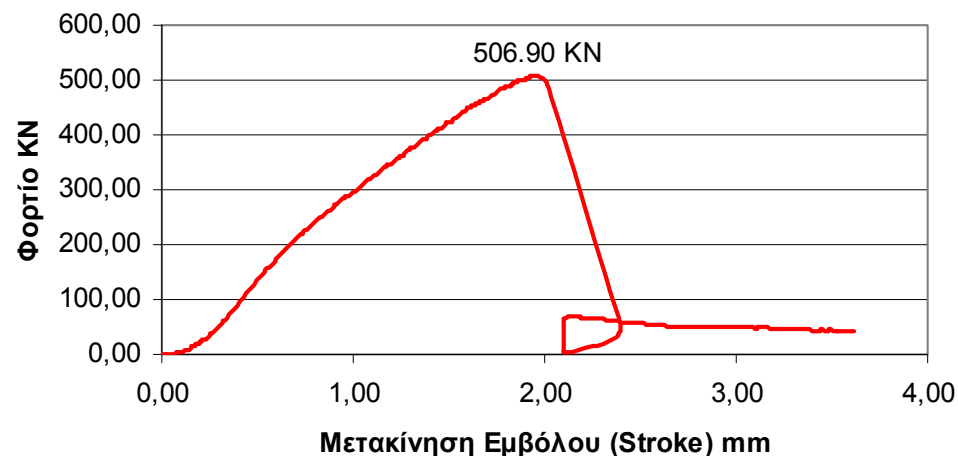
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

92

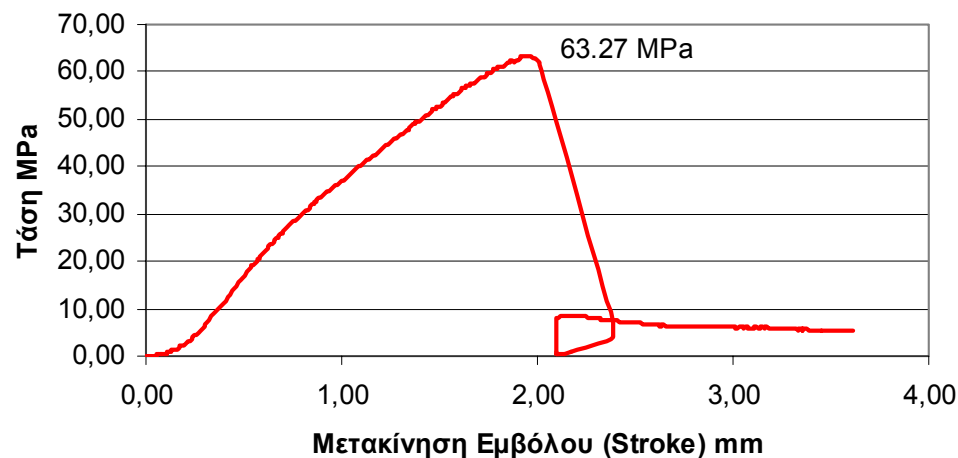
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 066



Δοκίμιο 066 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 066



Δοκίμιο 066 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

067

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 8in.

Διαστάσεις:

D = 4in.

Πραγματικές

L= 20.375cm

Διαστάσεις:

D=10.10cm

Βάρος:

3.790 Kg

Ειδικό Βάρος:

2321.715
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

480.50 KN

Αντοχή:

59.97 MPa

Μέτρο

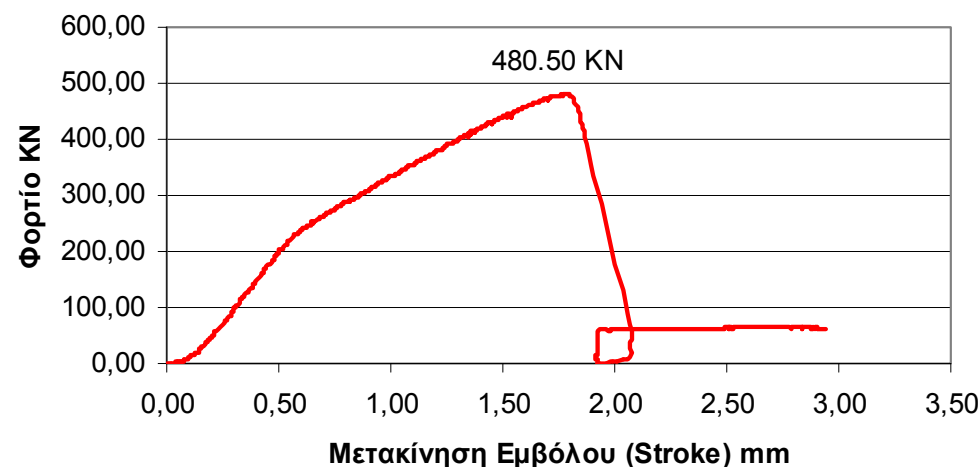
Ελαστικότητας E

30.8 GPa

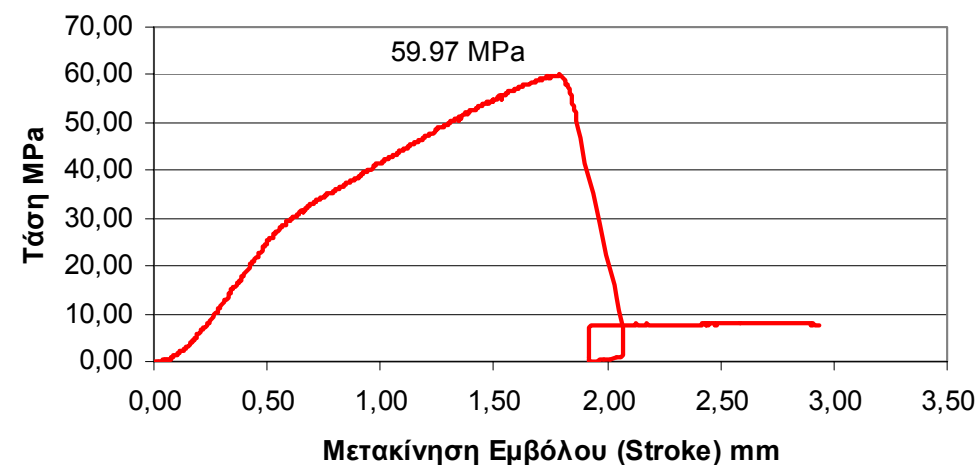
Ηλικία σε Ημέρες:

95

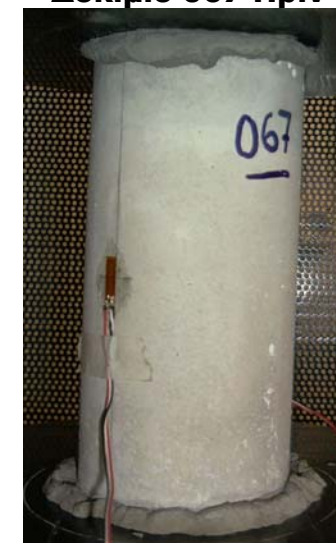
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 067



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 067



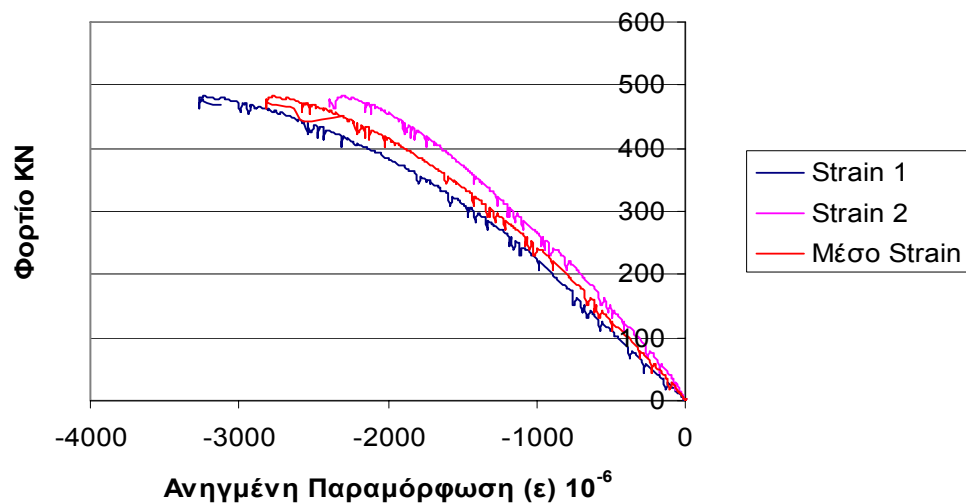
Δοκίμιο 067 Πριν



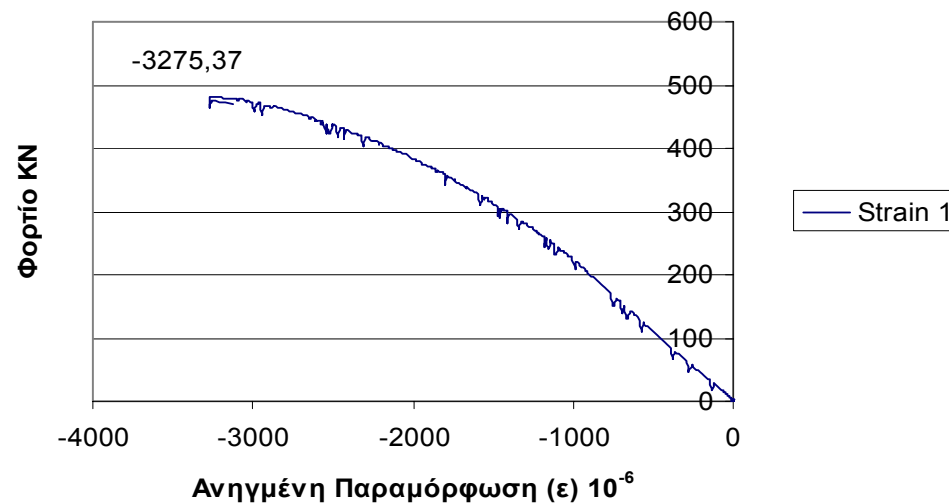
Δοκίμιο 067 Μετά



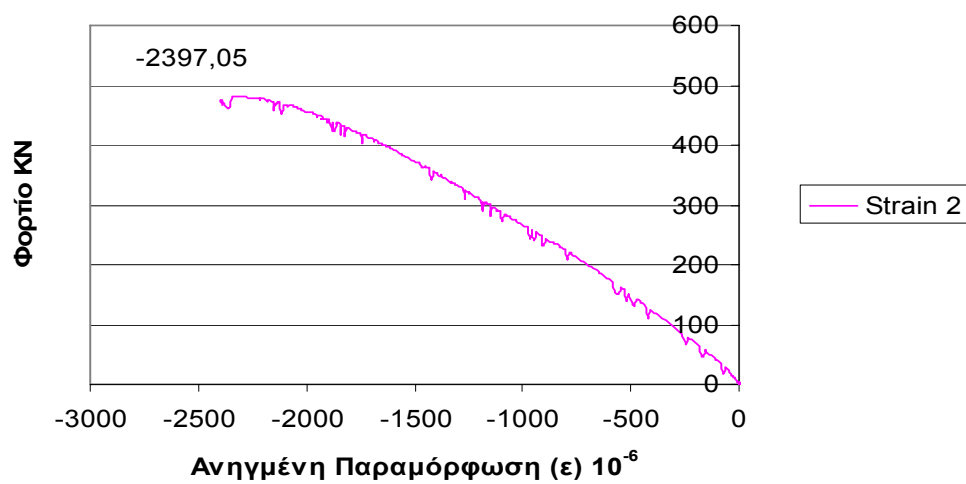
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 067



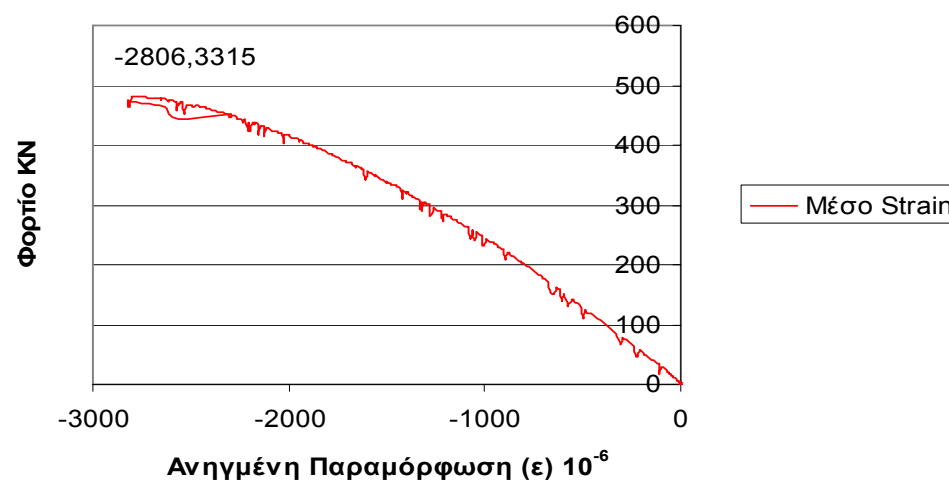
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 067

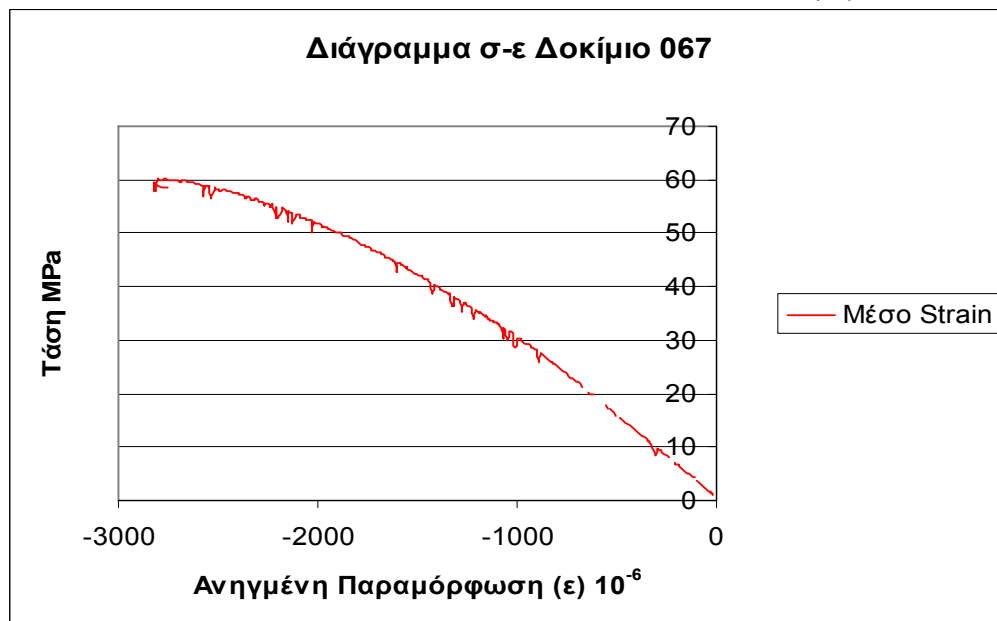


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 067



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 067





Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 067 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο

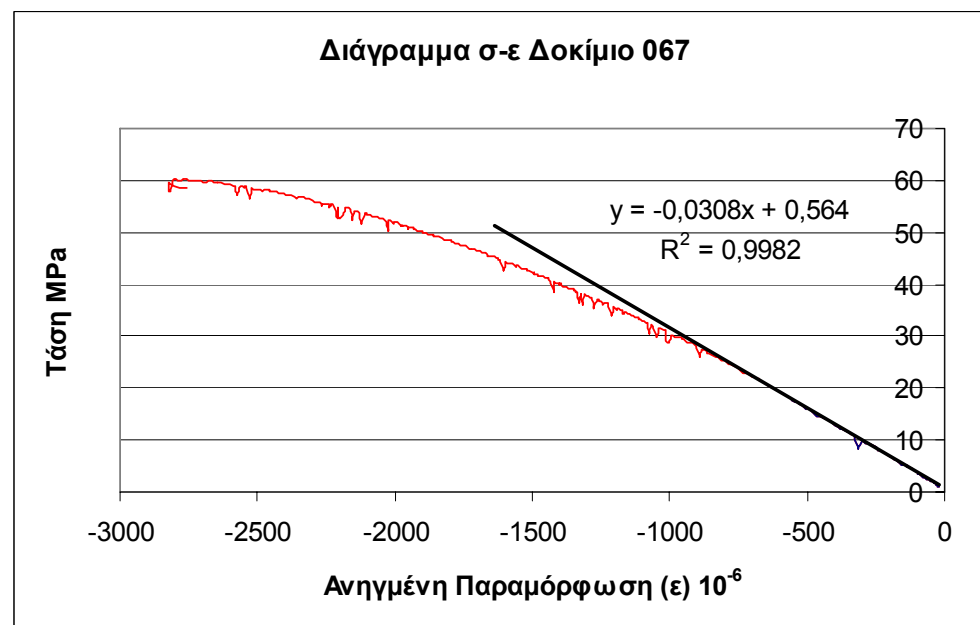
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.030 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9982$.

Επομένως:

$$E = 30.8 \text{ GPa}$$



Αριθμός Δοκιμίου:

068

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 8in.
D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 20.45cm
D=10.10cm

Βάρος: 3.800 Kg

Ειδικό Βάρος: 2319.304
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

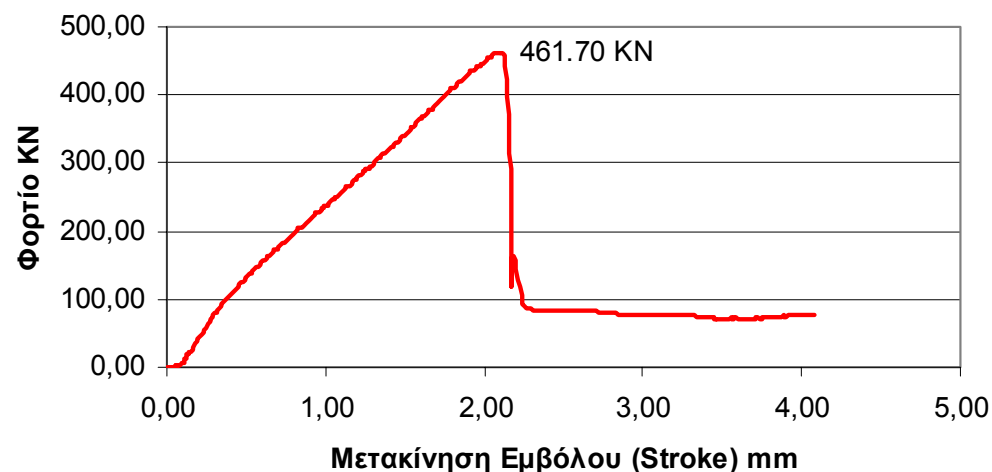
Φορτίο Αστοχίας: 461.70 KN

Αντοχή: 57.63 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 88

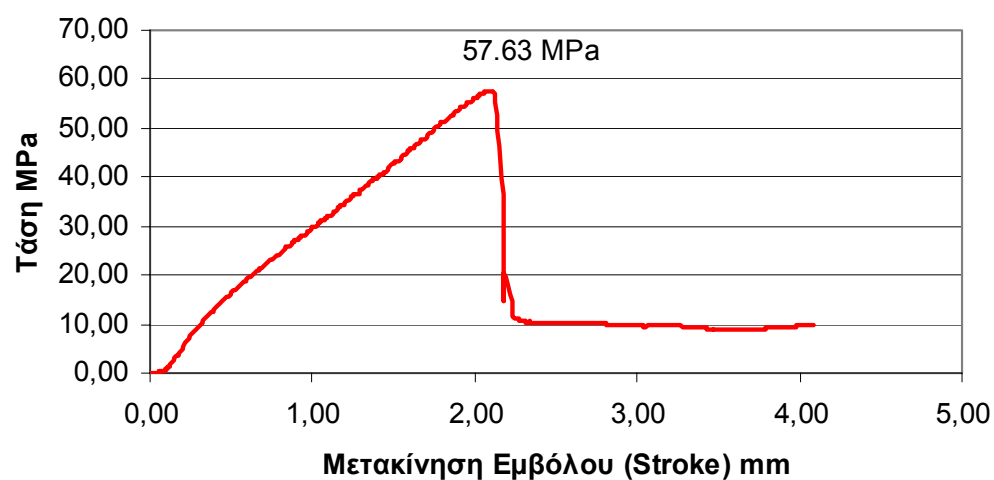
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 068



Δοκίμιο 068 Πριν



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 068



Δοκίμιο 068 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

069

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις:

L = 8in.
D = 4in.

Πραγματικές
Διαστάσεις:

L= 20.50cm
D=10.10cm

Βάρος:

3.815 Kg

Ειδικό Βάρος:

2322.780
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου
2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

3 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

492.10 KN

Αντοχή:

61.42 MPa

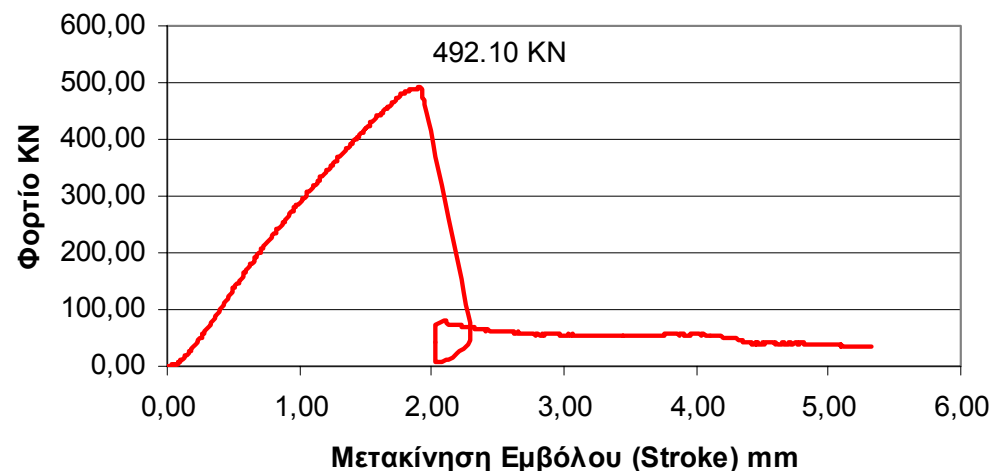
Μέτρο
Ελαστικότητας E

31.7 GPa

Ηλικία σε Ημέρες:

91

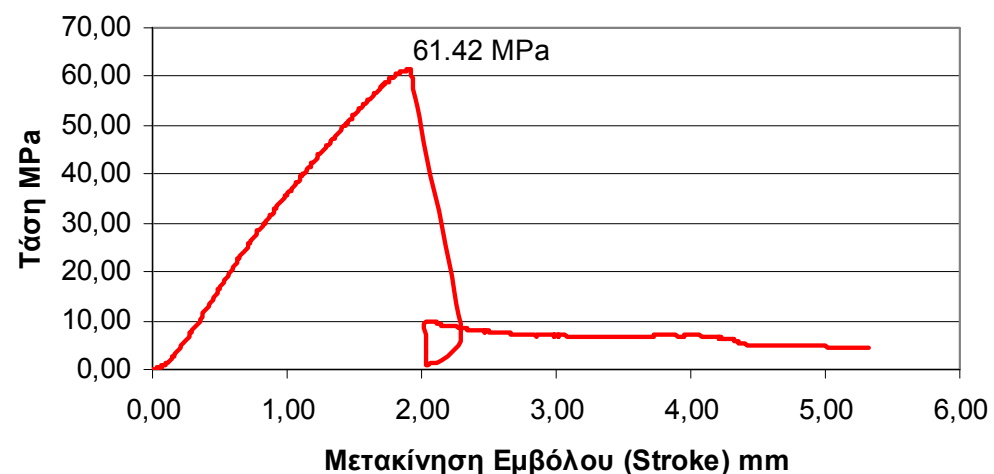
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 069



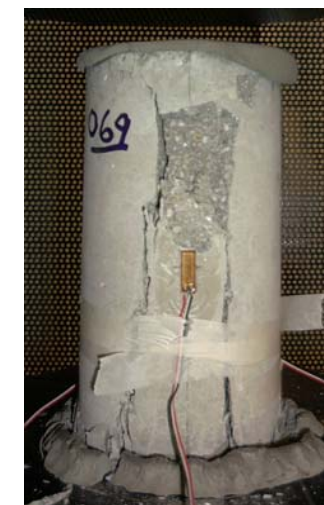
Δοκίμιο 069 Πριν

N/A

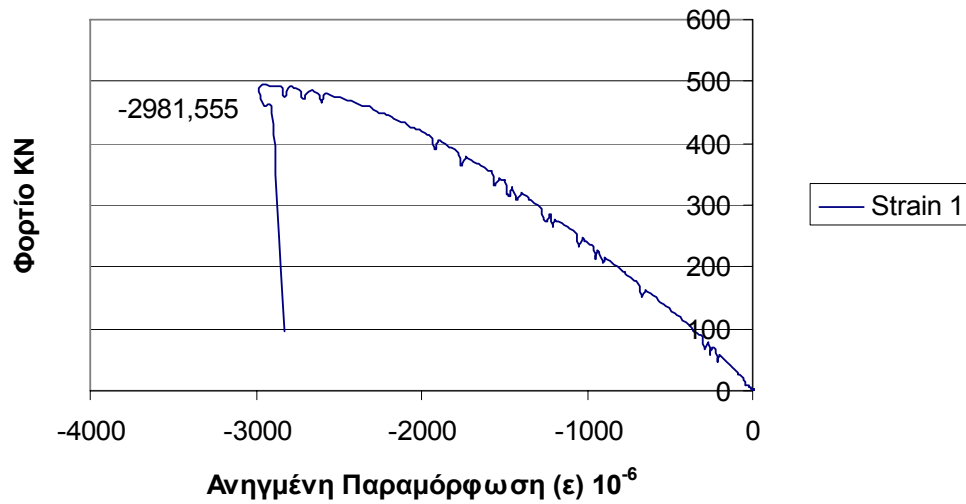
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 069



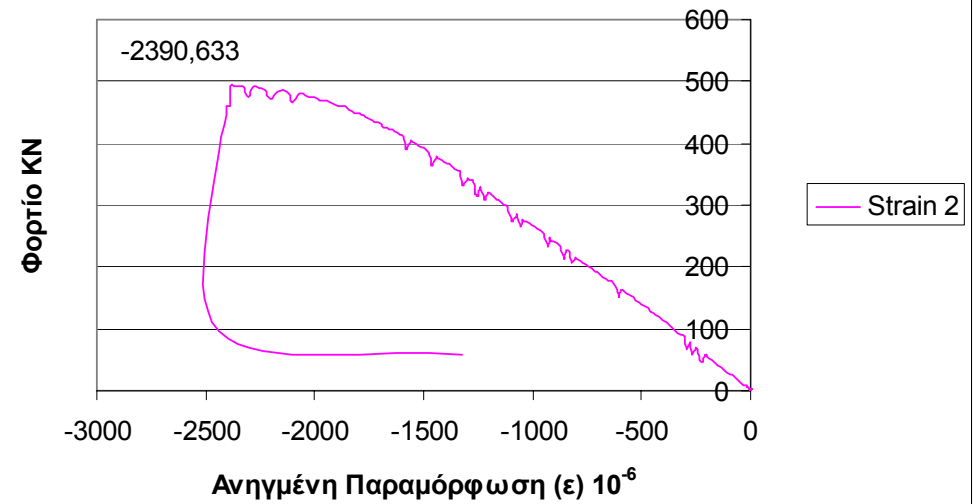
Δοκίμιο 069 Μετά



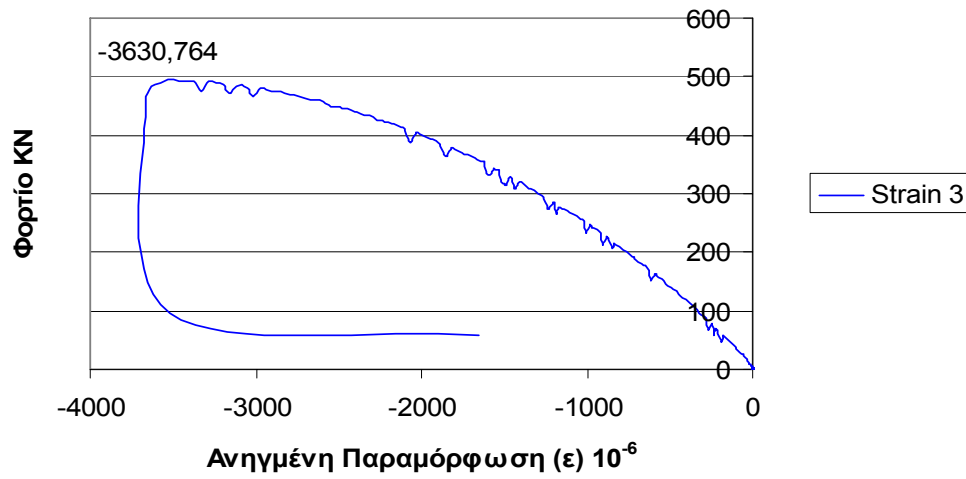
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 069



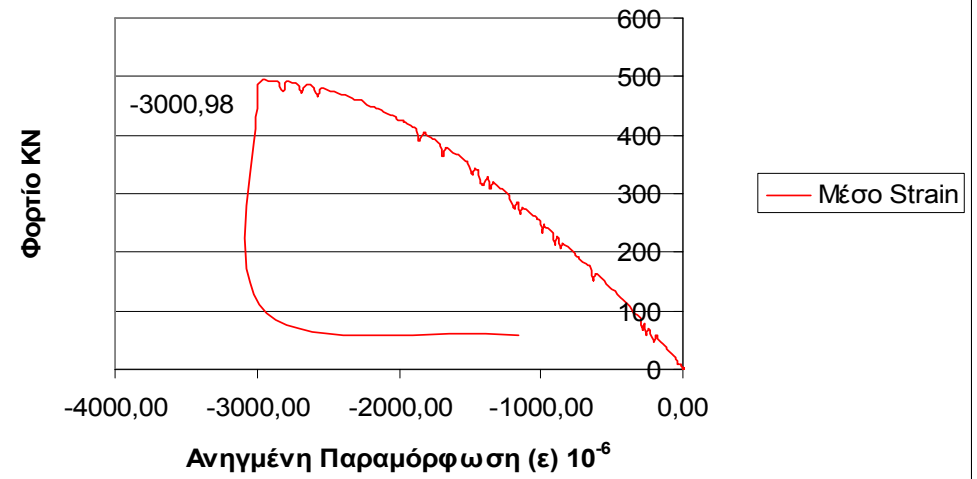
Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 069

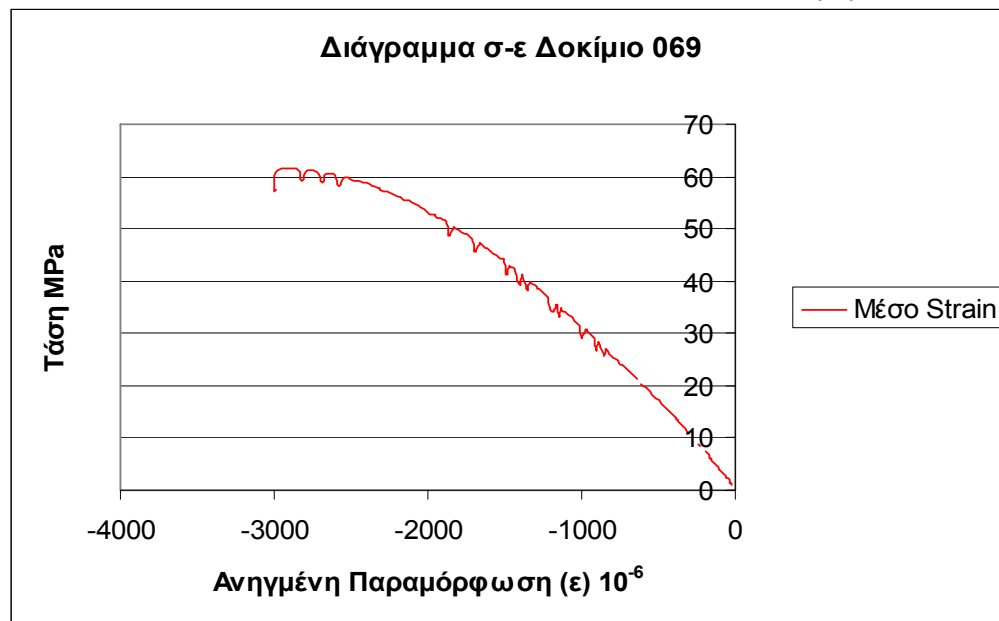


Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 069



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 069





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση 0.032 MPa/ε 10⁻⁶ και $R^2 = 0.9981$.

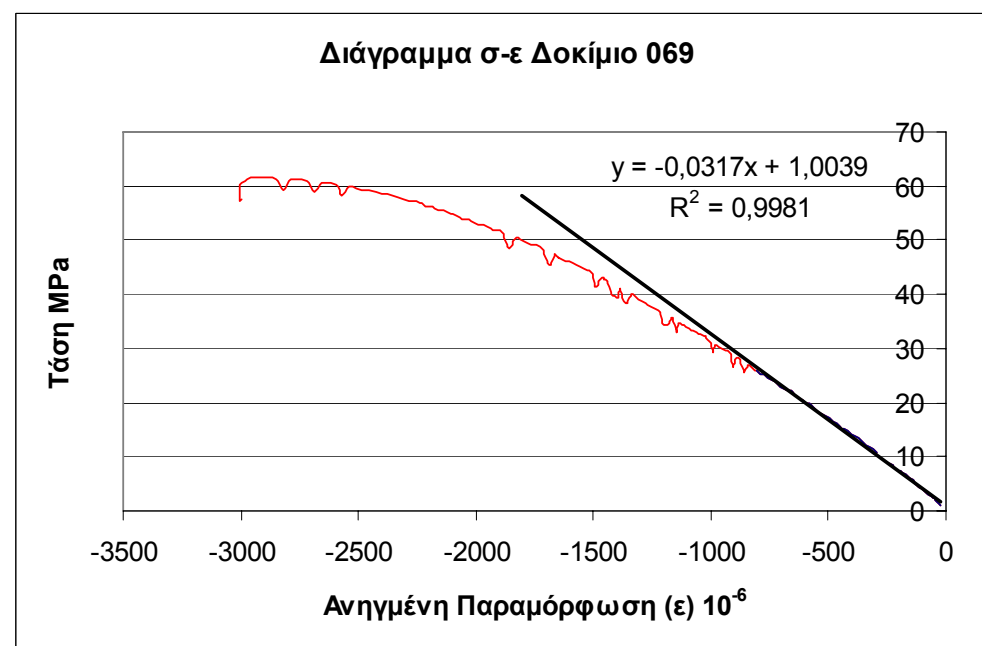
Επομένως:

$$E = 31.7 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 069 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

070

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 8in.

Διαστάσεις:

D = 4in.

Πραγματικές

L= 20.35cm

Διαστάσεις:

D=10.10cm

Βάρος:

3.795 Kg

Ειδικό Βάρος:

2327.634
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία

Θραύσης:

30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης

0.01 mm/s

εμβόλου (stroke):

Φορτίο Αστοχίας:

447.70 KN

Αντοχή:

55.88 MPa

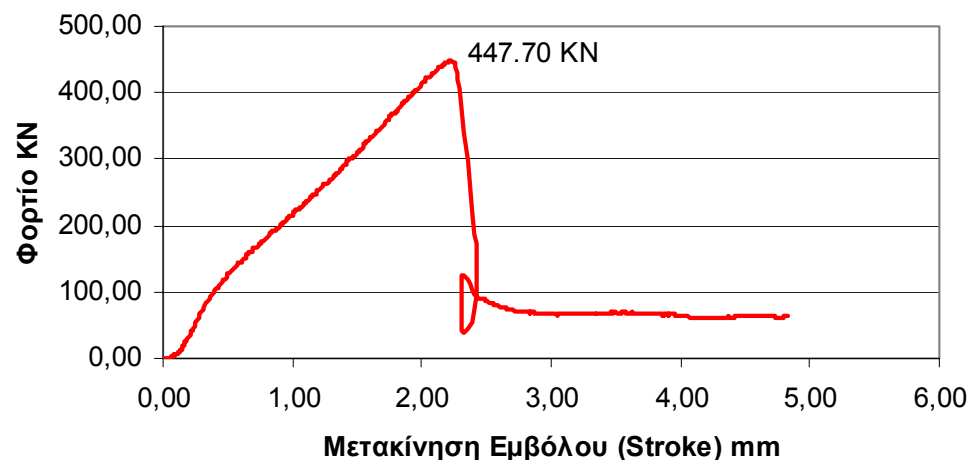
Μέτρο

Ελαστικότητας E

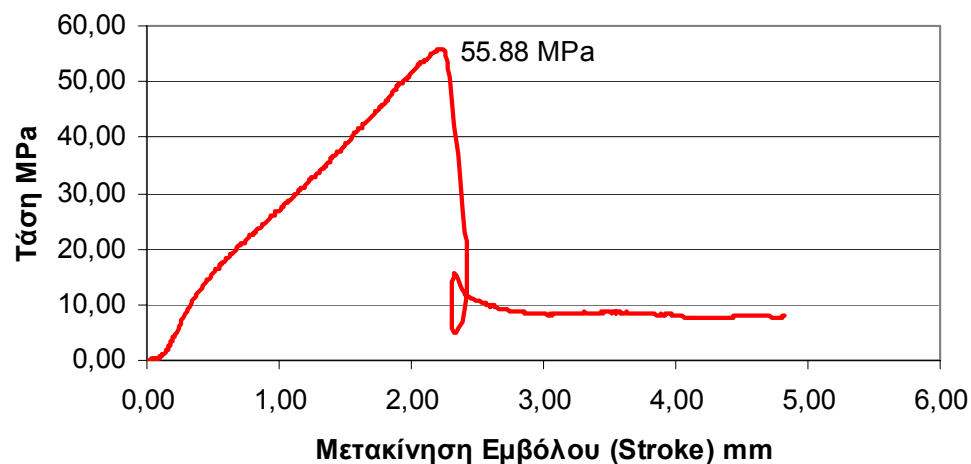
Ηλικία σε Ημέρες:

88

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 070



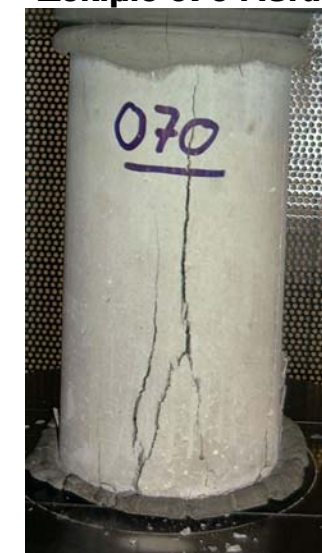
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 070



Δοκίμιο 070 Πριν



Δοκίμιο 070 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

071

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 8in.
Διαστάσεις: D = 4in.
Πραγματικές L= 20.35cm
Διαστάσεις: D=10.10cm

Βάρος: 3.780 Kg

Ειδικό Βάρος: 2318.434
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 7 Μαΐου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges: 0

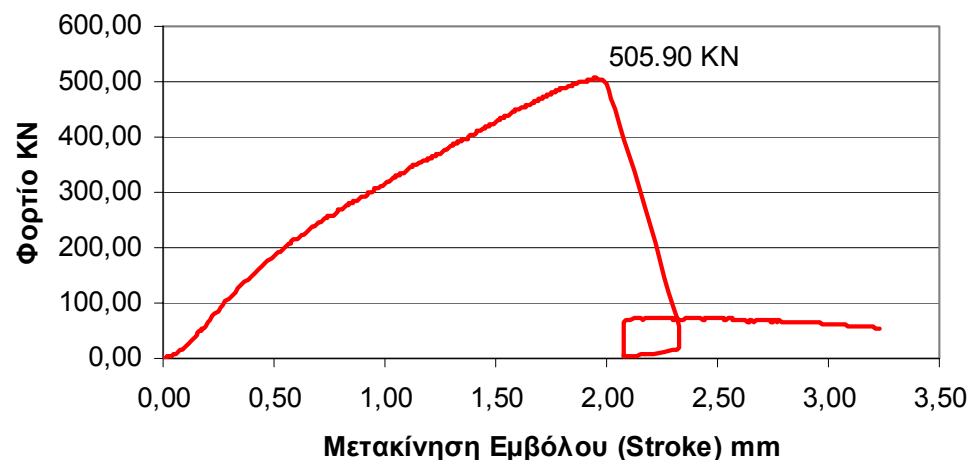
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 505.90 KN

Αντοχή: 63.14 MPa

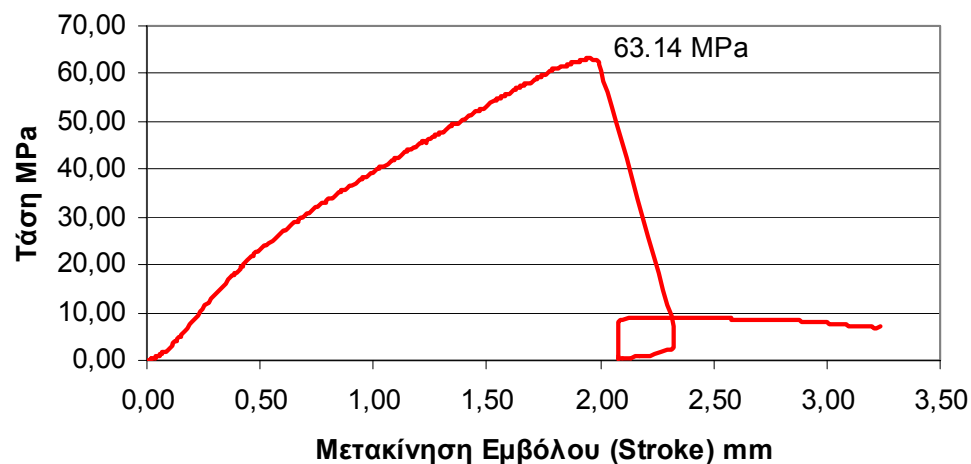
Μέτρο 32 GPa
Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες: 95

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 071



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 071



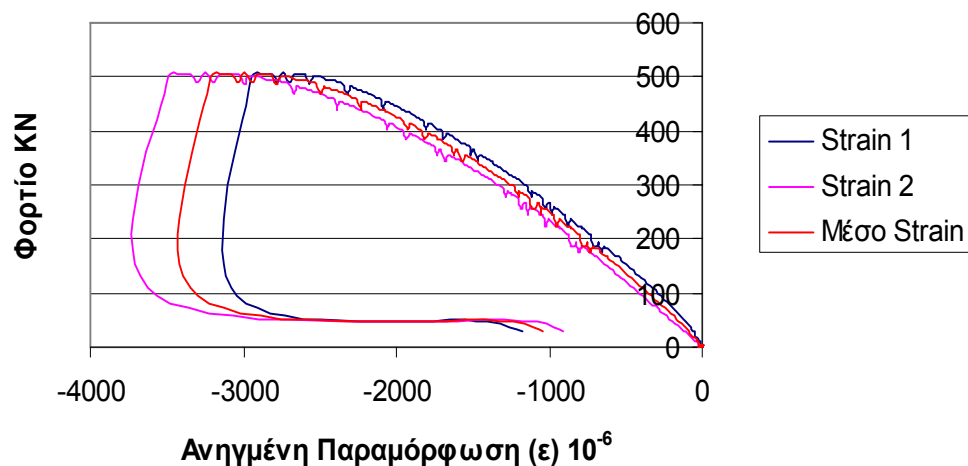
Δοκίμιο 071 Πριν



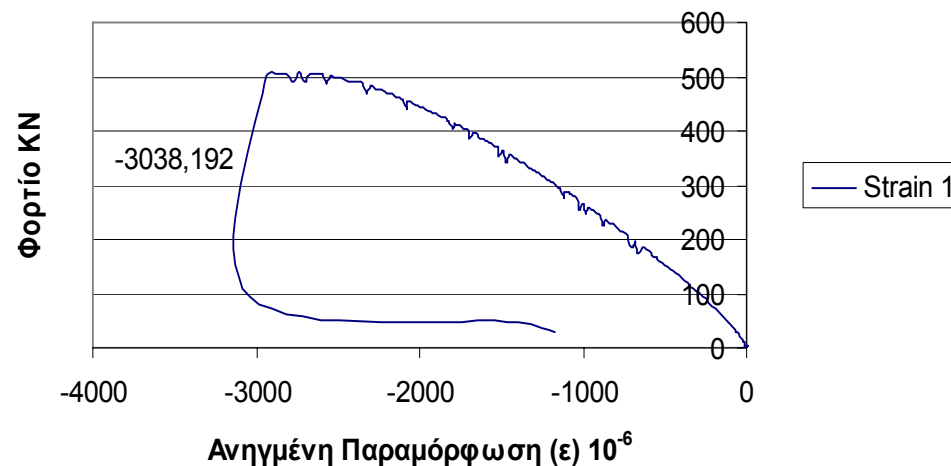
Δοκίμιο 071 Μετά



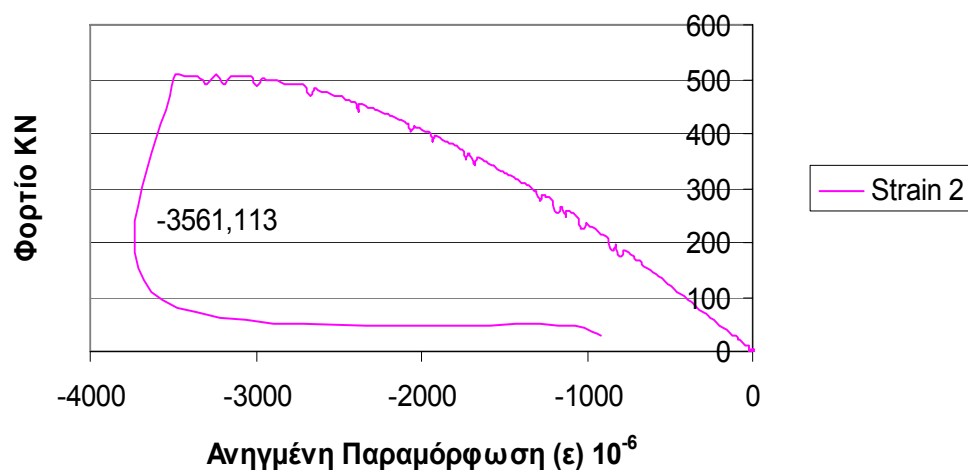
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 071



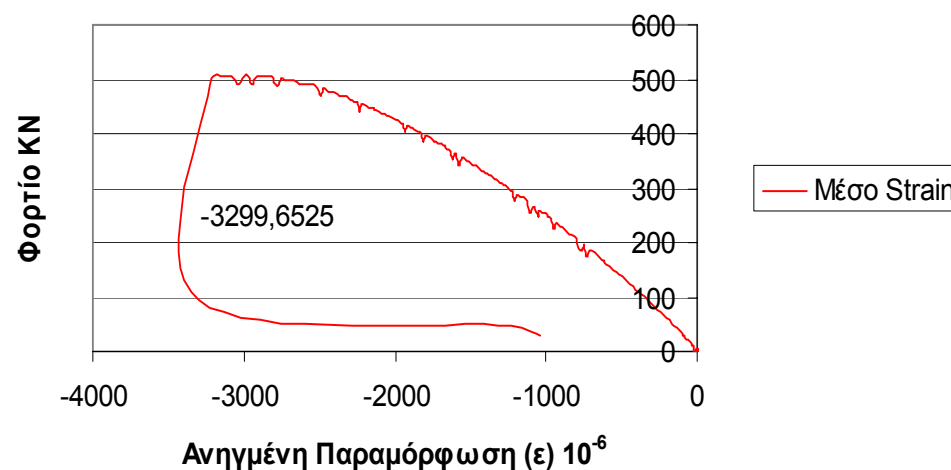
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 071

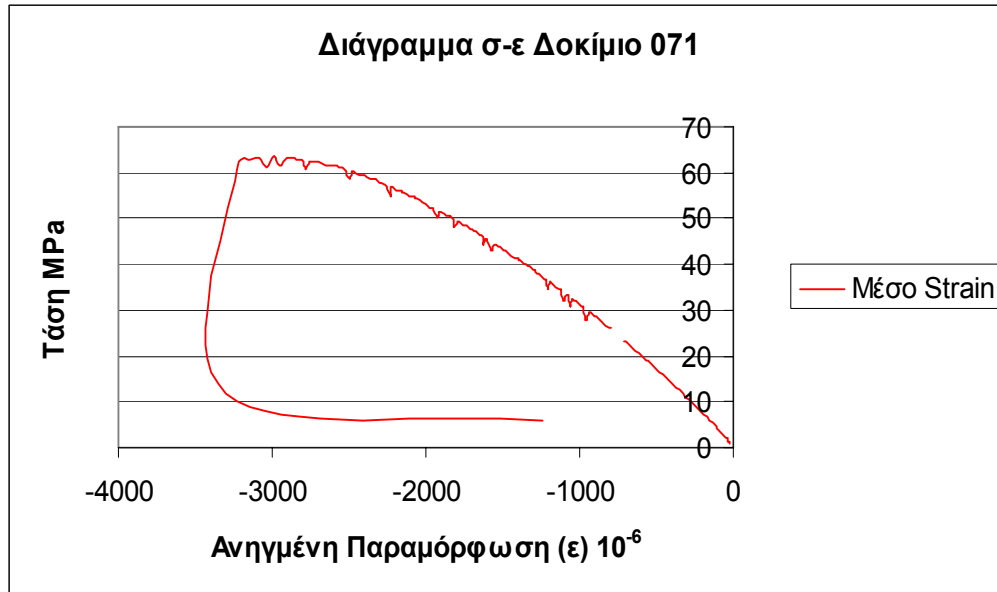


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 071



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 071





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.032 \text{ MPa}/\epsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9986$.

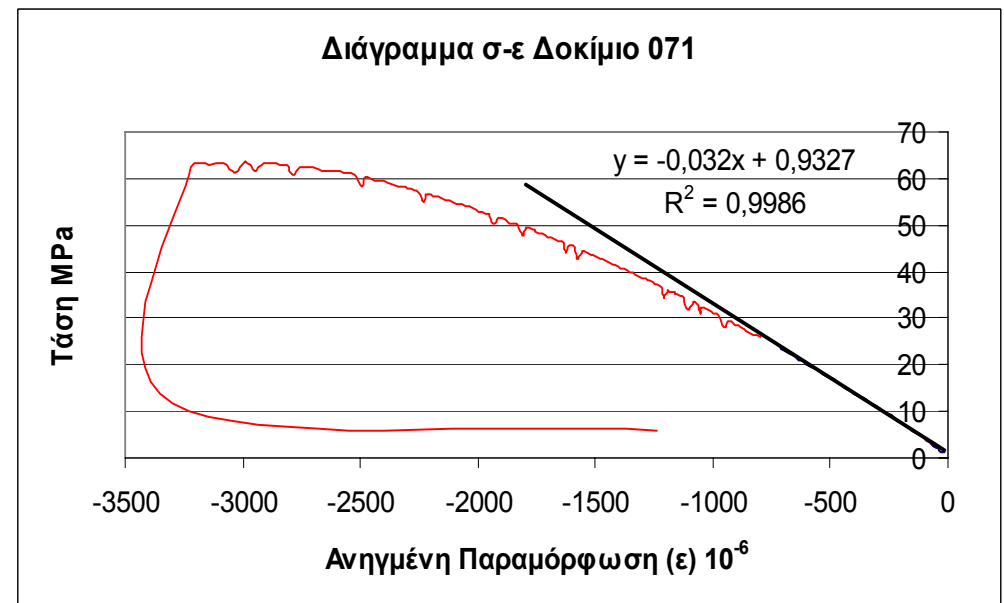
Επομένως:

$$E = 32.0 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\epsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 071 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

072

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 8in.
D = 4in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 20.475cm
D=10.10cm

Βάρος: 3.800 Kg

Ειδικό Βάρος: 2316.472
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

456.50 KN

Αντοχή:

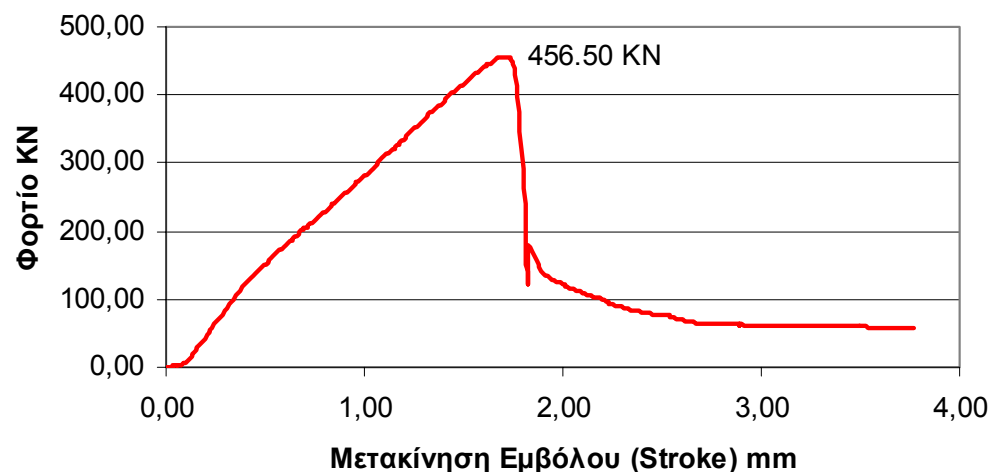
56.98 MPa

Μέτρο
Ελαστικότητας E

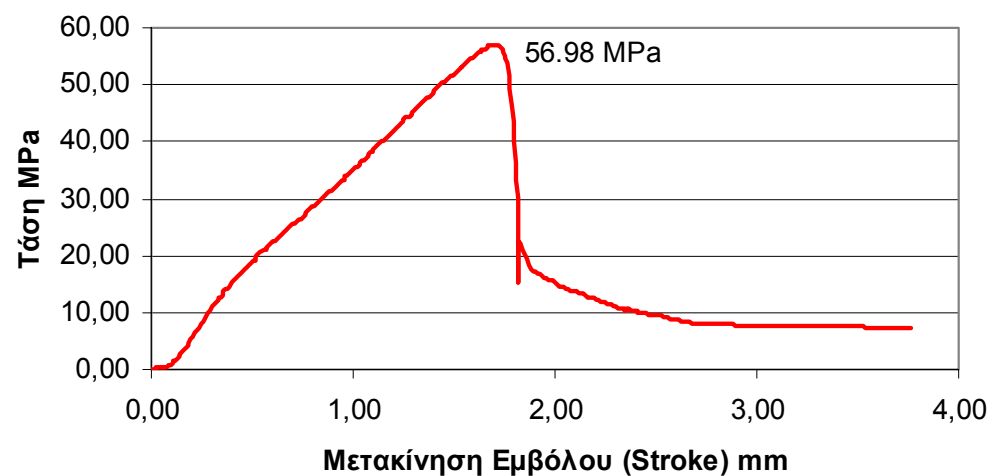
Ηλικία σε Ημέρες:

88

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 072



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 072



Δοκίμιο 072 Πριν



Δοκίμιο 072 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

074

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 8in.
Διαστάσεις: D = 4in.
Πραγματικές L= 20.50cm
Διαστάσεις: D=10.10cm

Βάρος: 3.800 Kg

Ειδικό Βάρος: 2313.64
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 18 Μαΐου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

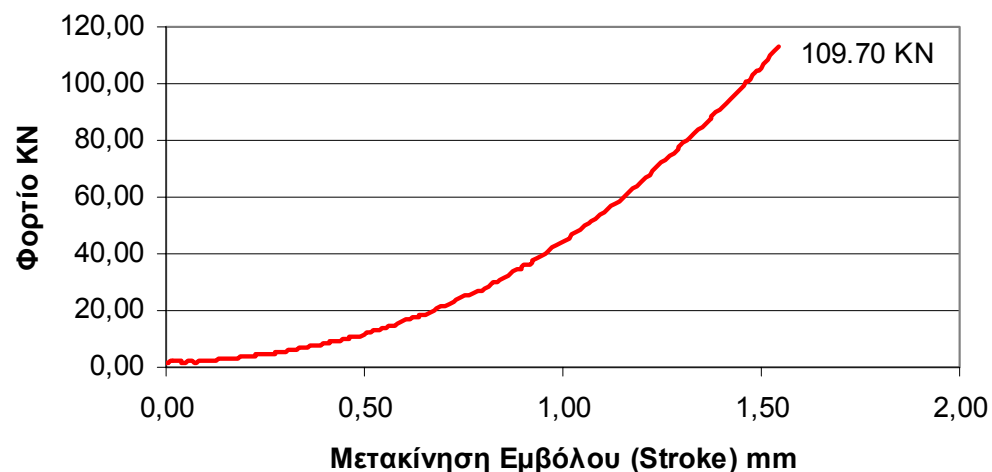
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 109.70 KN

Αντοχή: 3.37 MPa

Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

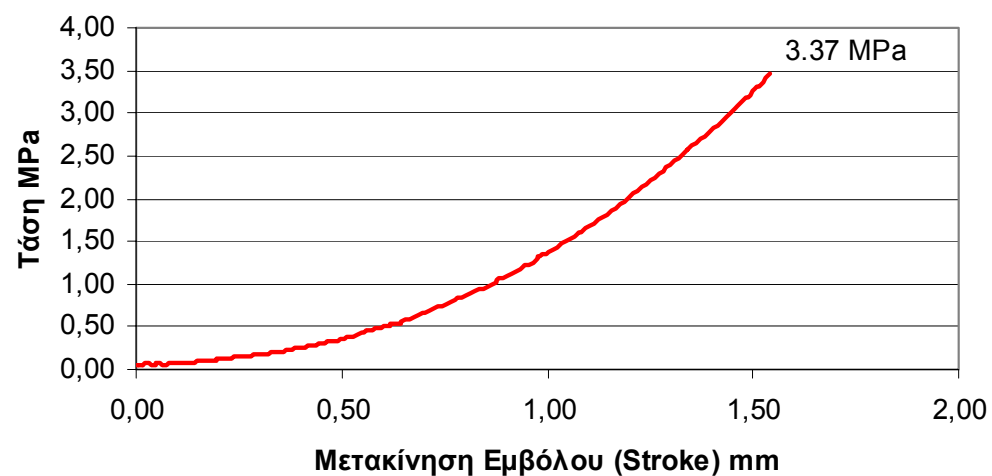
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 074



Δοκίμιο 074 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 074



Δοκίμιο 074 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

075

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 8in.

Διαστάσεις:

D = 4in.

Πραγματικές

L= 20.45cm

Διαστάσεις:

D=10.10cm

Βάρος:

3.810 Kg

Ειδικό Βάρος:

2325.407
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία

Θραύσης:

18 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

135.80 KN

Αντοχή:

4.19 MPa

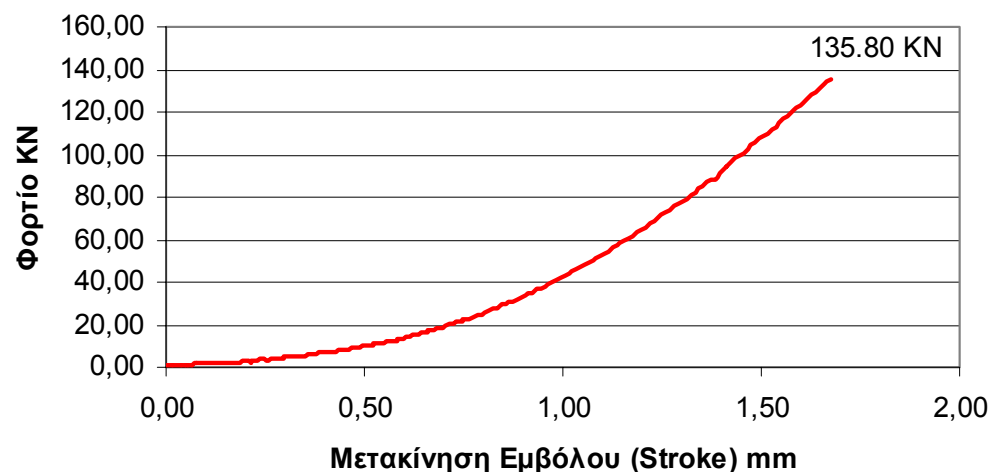
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

106

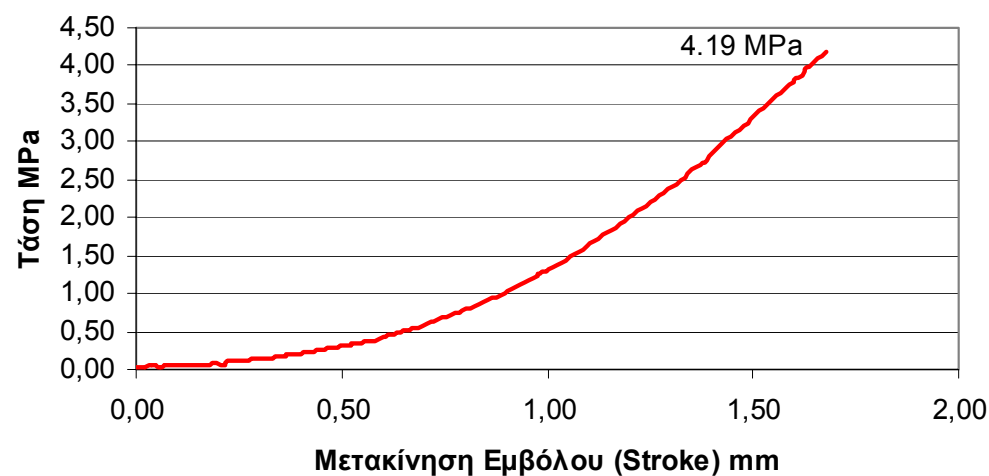
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 075



Δοκίμιο 075 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 075



Δοκίμιο 075 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

076

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 8in.
Διαστάσεις: D = 4in.
Πραγματικές L= 20.375cm
Διαστάσεις: D=10.10cm

Βάρος: 3.790 Kg

Ειδικό Βάρος: 2321.715
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 18 Μαΐου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

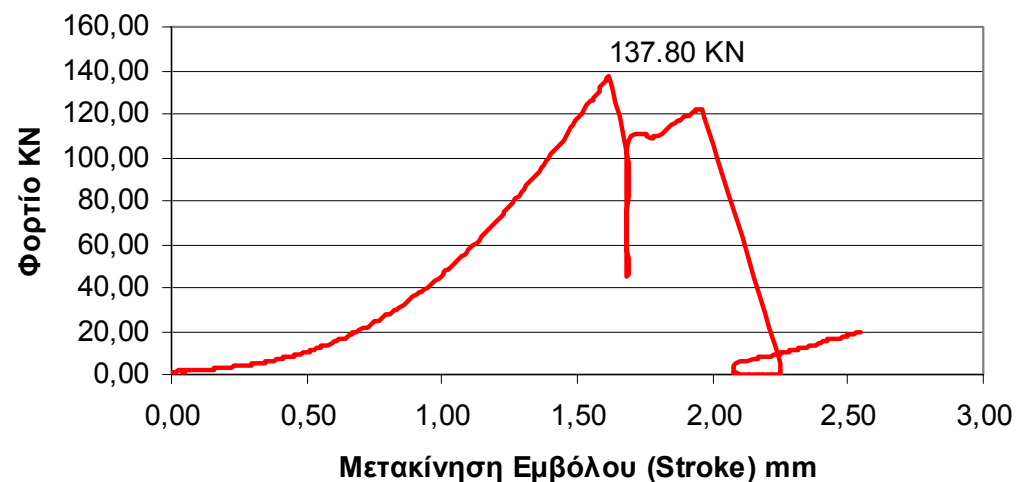
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 137.80 KN

Αντοχή: 4.26 MPa

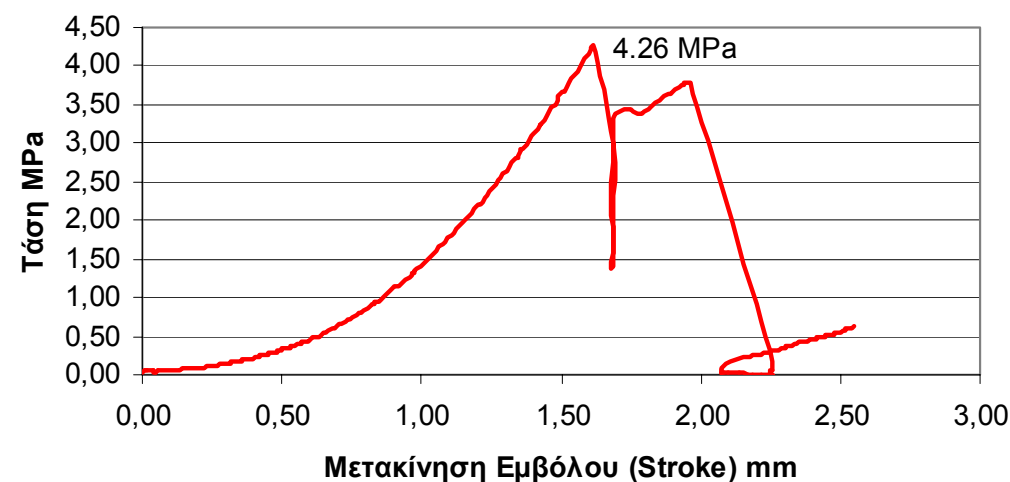
Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

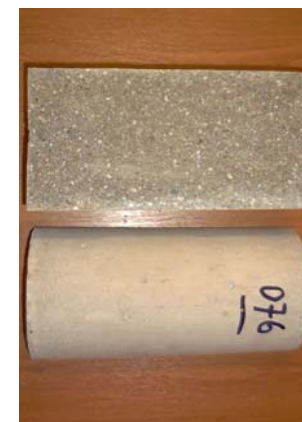
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 076



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 076



Δοκίμιο 076 Μετά



Δοκίμιο 076 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

077

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 8in.
Διαστάσεις: D = 4in.
Πραγματικές L= 20.40cm
Διαστάσεις: D=10.10cm

Βάρος: 3.780 Kg

Ειδικό Βάρος: 2312.752
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 18 Μαΐου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

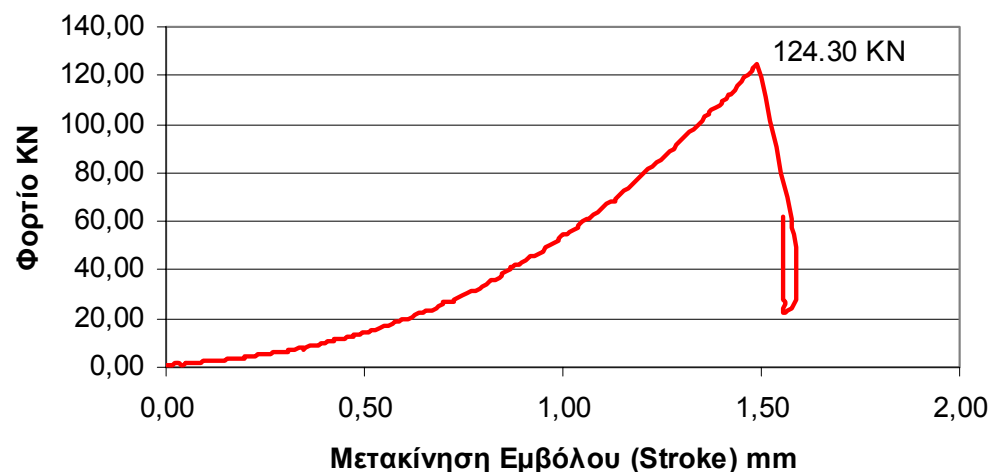
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 124.30 KN

Αντοχή: 3.84 MPa

Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 106

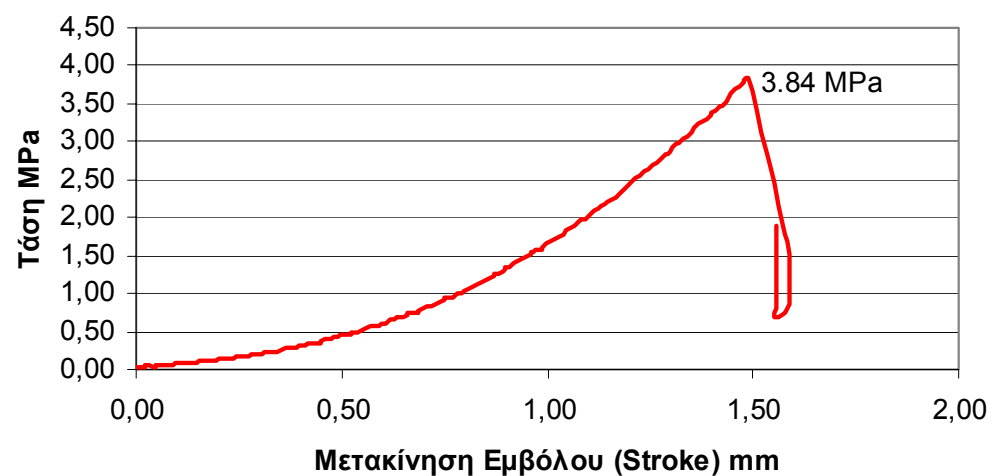
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 077



Δοκίμιο 077 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 077



Δοκίμιο 077 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

079

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: $L = 12\text{in.}$
Πραγματικές Διαστάσεις: $D = 6\text{in.}$
 $L = 30.625\text{cm}$
 $D = 15.15\text{cm}$

Βάρος: 12.650 Kg

Ειδικό Βάρος: 2291.391
 Kg/m^3

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

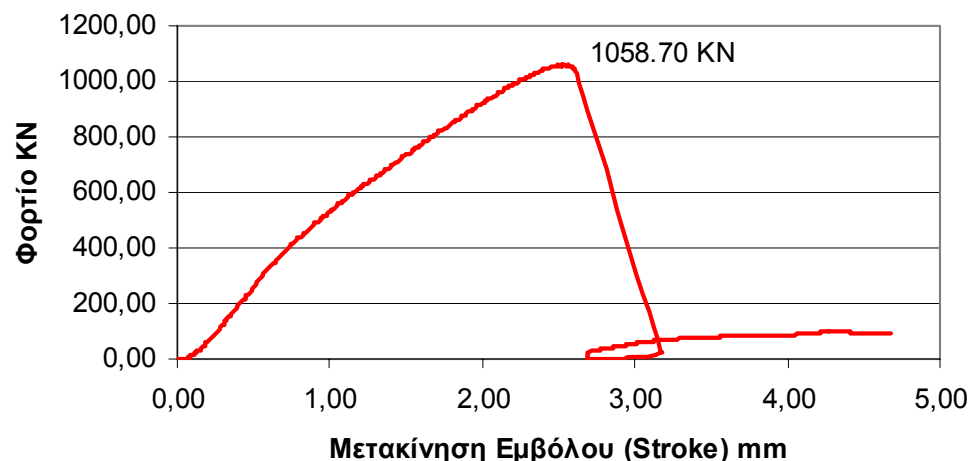
Φορτίο Αστοχίας: 1058.70 KN

Αντοχή: 58.73 MPa

Μέτρο Ελαστικότητας E: 33.2 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 95

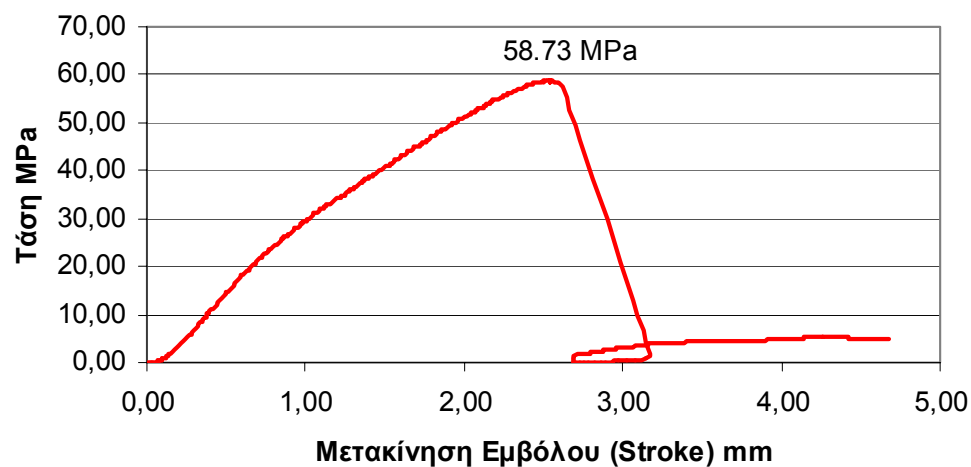
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 079



Δοκίμιο 079 Πριν



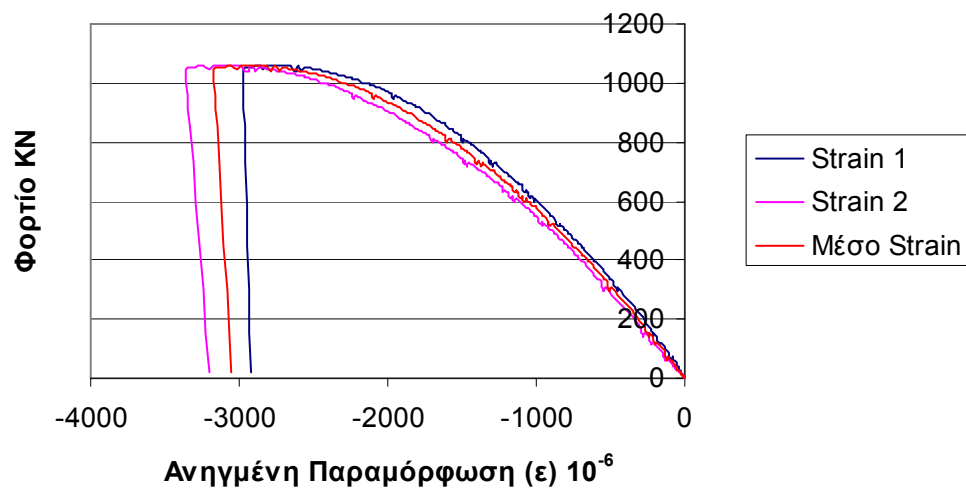
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 079



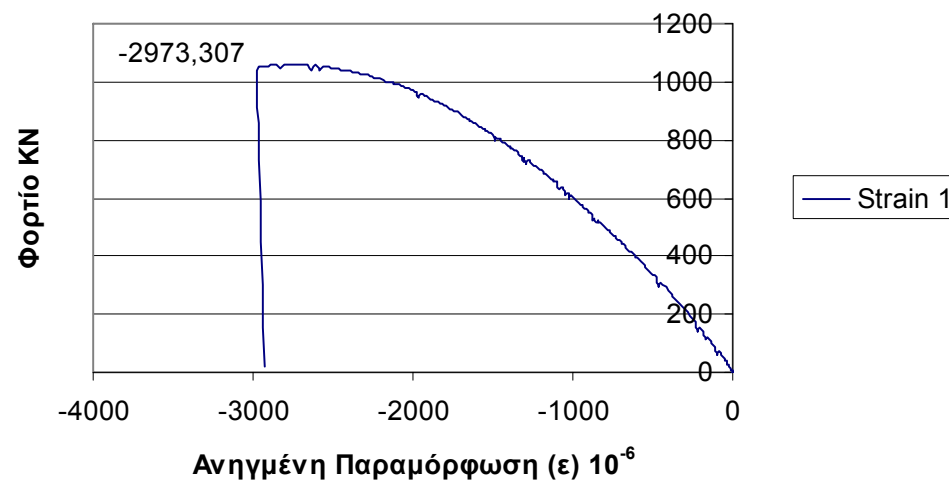
Δοκίμιο 079 Μετά



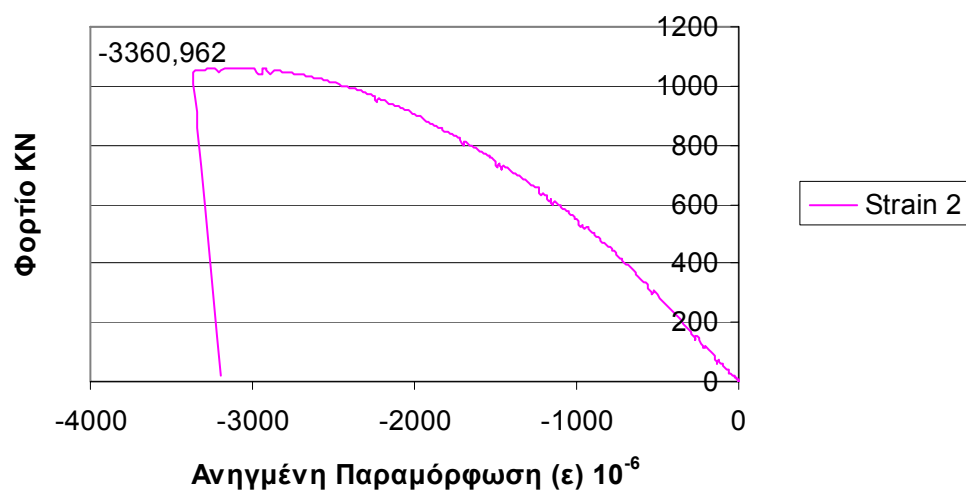
Ενδείξεις Strain Gauges Δοκίμιο 079



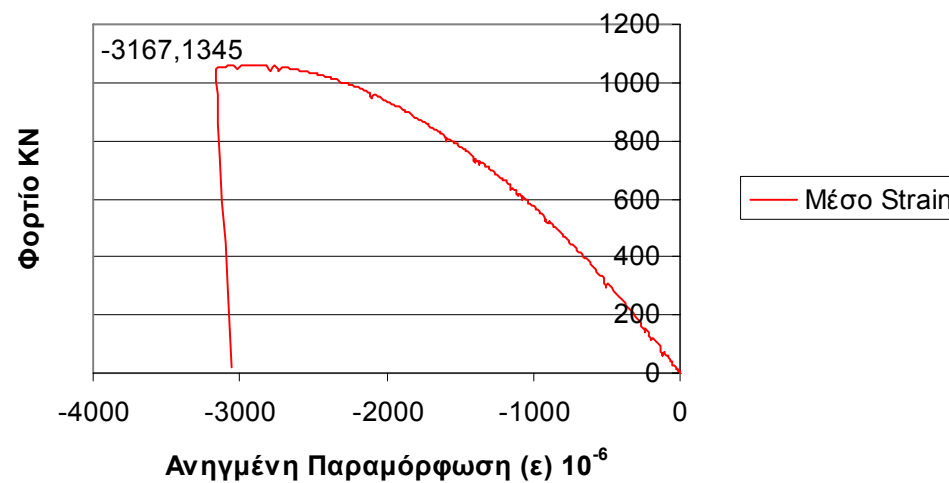
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 079

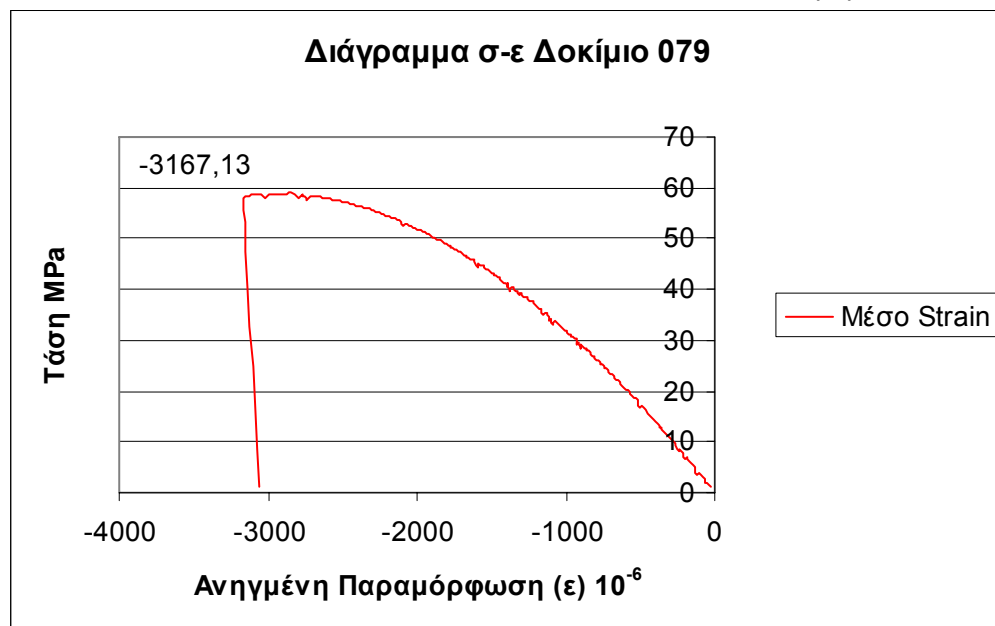


Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 079



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 079





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.033 \text{ MPa}/\varepsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9988$.

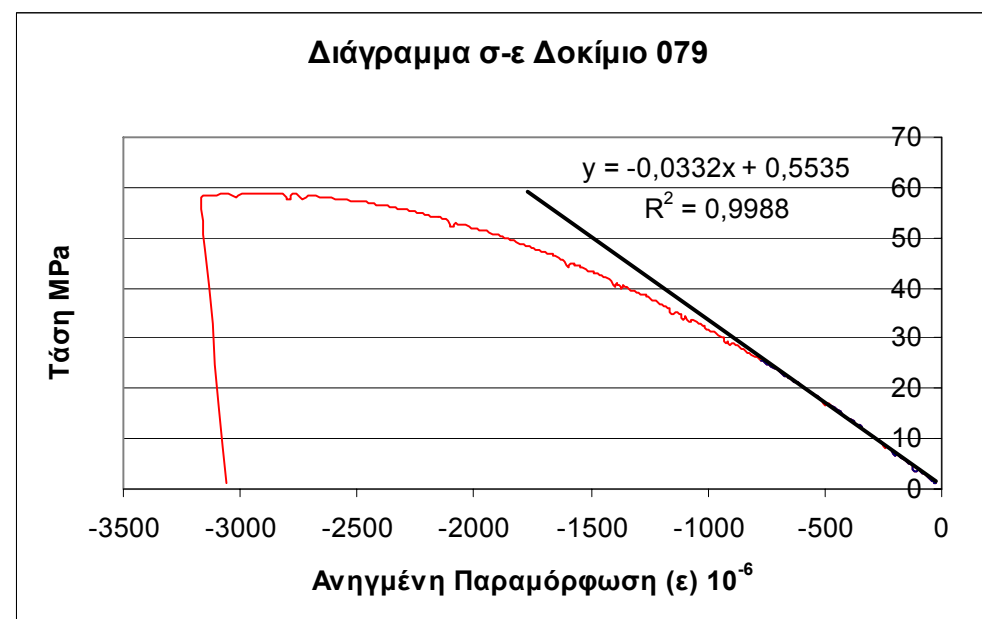
Επομένως:

$$E = 33.2 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\varepsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 079 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου:

080

Σειρά:

2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές

L = 12in.

Διαστάσεις:

D = 6in.

Πραγματικές

L= 30.55cm

Διαστάσεις:

D=15.10cm

Βάρος:

12.690 Kg

Ειδικό Βάρος:

2319.565
Kg/m³

Ημερομηνία
Σκυροδέτησης:

2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία
Θραύσης:

4 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου:

Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges:

0

Ρυθμός

Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας:

0.01 mm/s

1090.00 KN

Αντοχή:

60.87 MPa

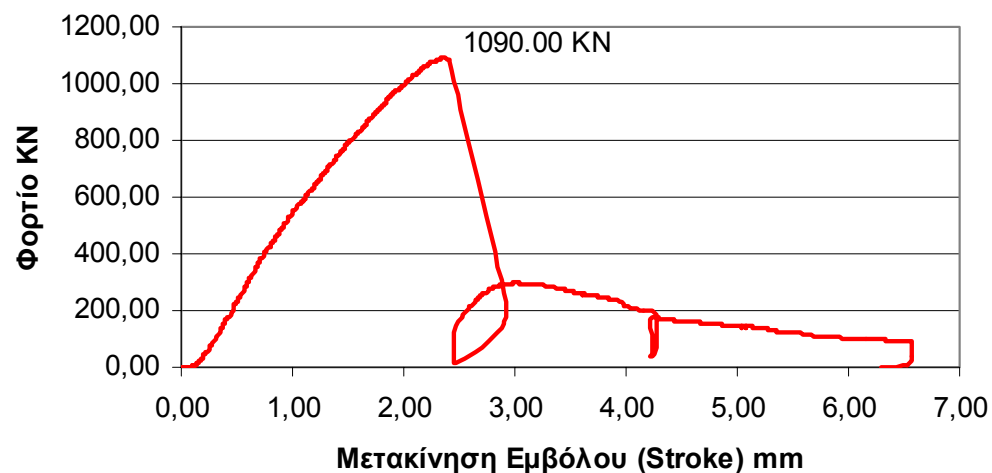
Μέτρο

Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες:

92

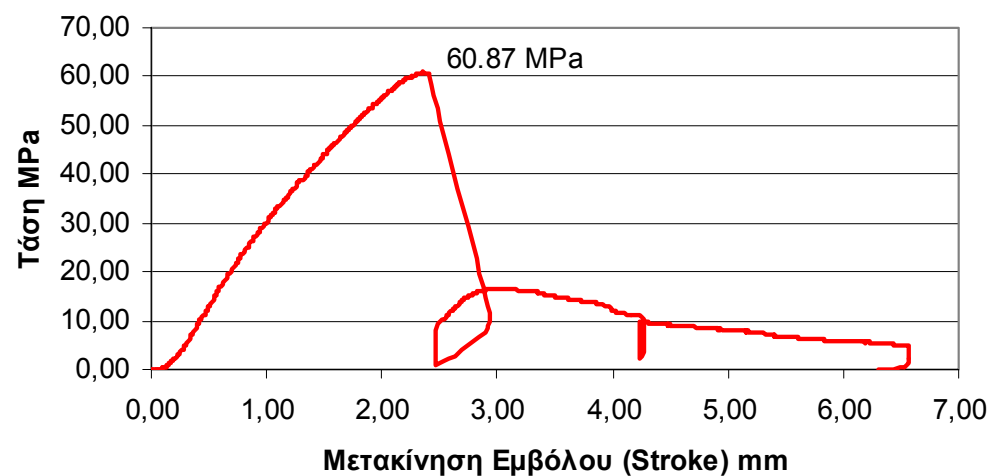
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 080



Δοκίμιο 080 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 080



Δοκίμιο 080 Μετά

N/A

Αριθμός Δοκιμίου:

081

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: $L = 12\text{in.}$
Πραγματικές Διαστάσεις: $L = 30.45\text{cm}$
 $D = 15.15\text{cm}$

Βάρος: 12.570 Kg

Ειδικό Βάρος: 2289.986
 Kg/m^3

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

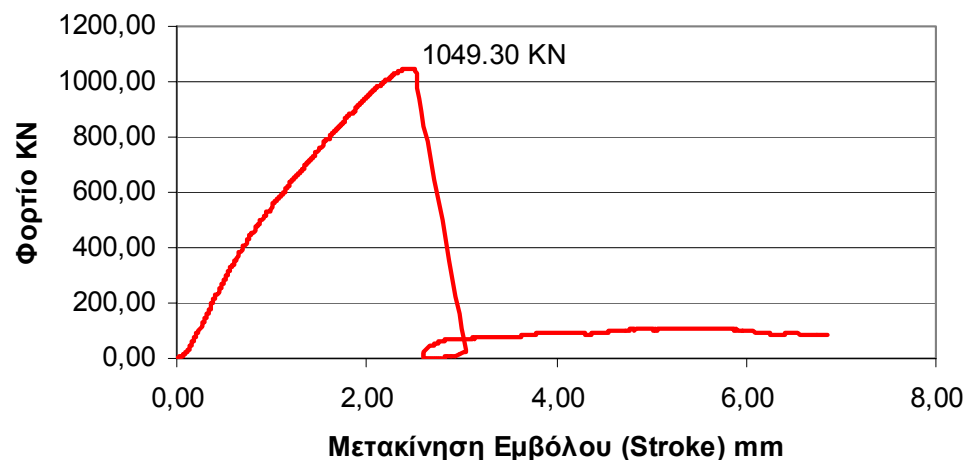
Φορτίο Αστοχίας: 1049.30 KN

Αντοχή: 58.21 MPa

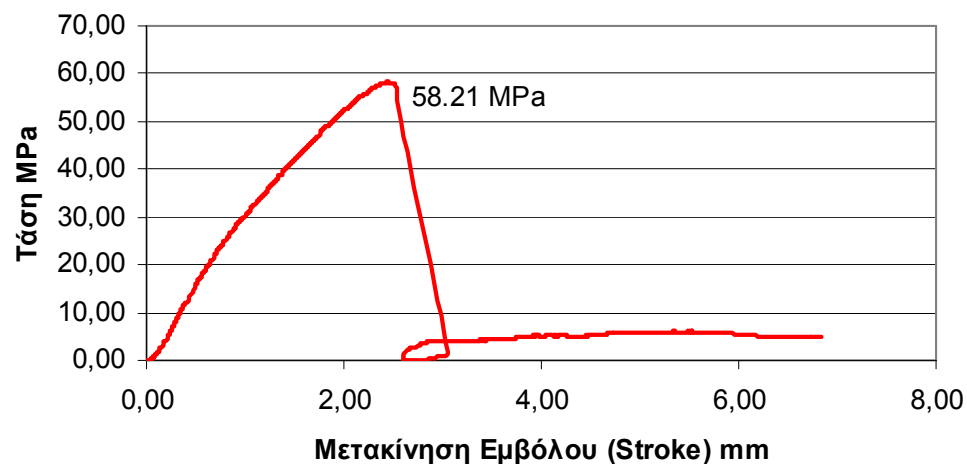
Μέτρο Ελαστικότητας E: 28.7 GPa

Ηλικία σε Ημέρες: 95

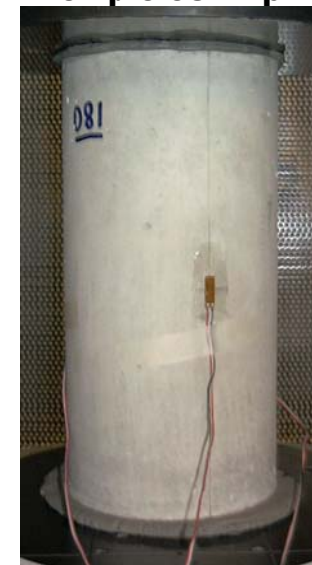
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 081



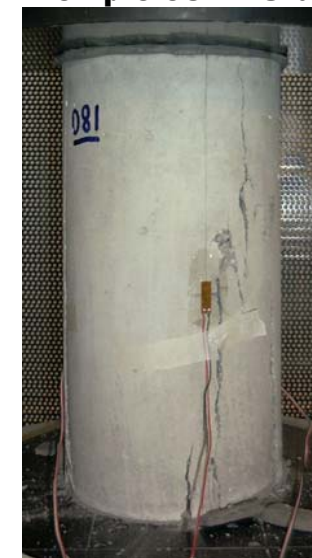
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 081



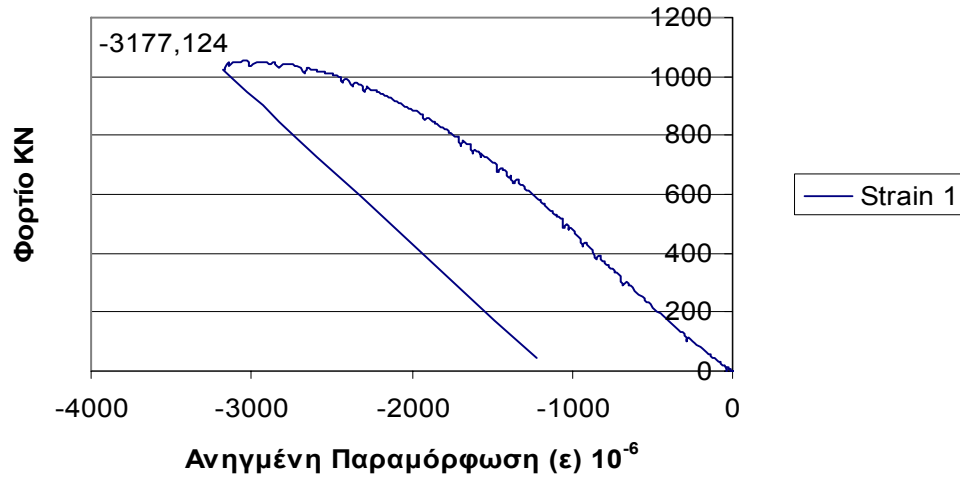
Δοκίμιο 081 Πριν



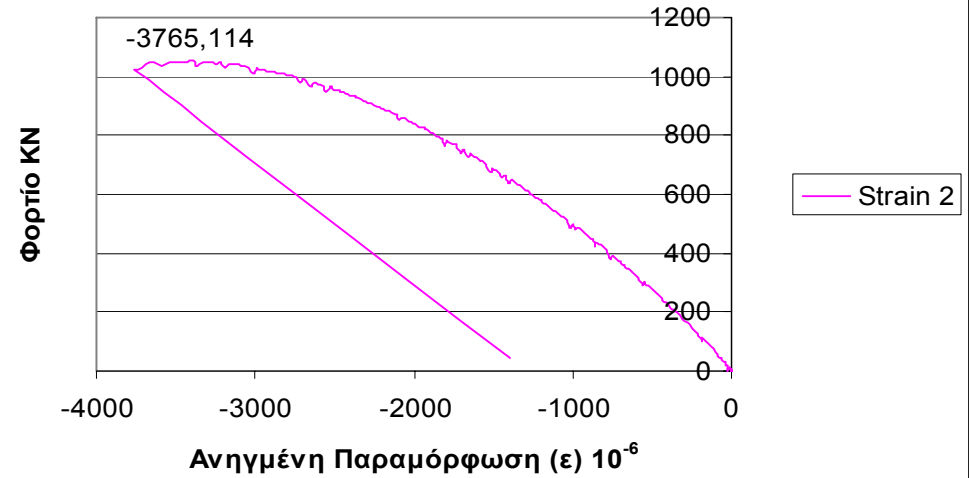
Δοκίμιο 081 Μετά



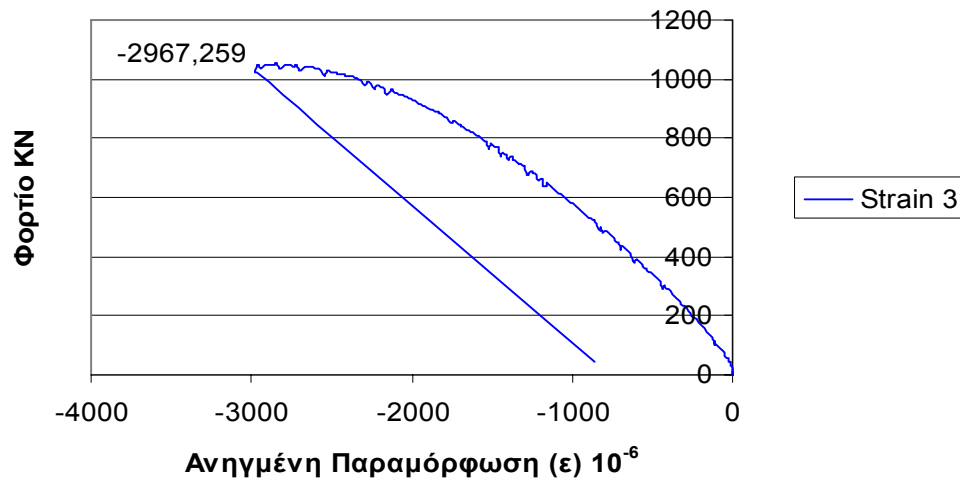
Ένδειξη Strain Gauge 1 Δοκίμιο 081



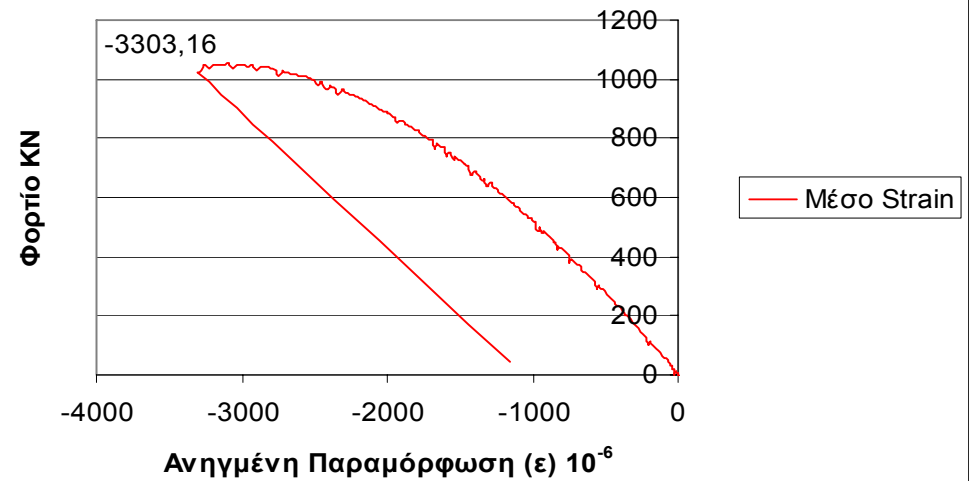
Ένδειξη Strain Gauge 2 Δοκίμιο 081

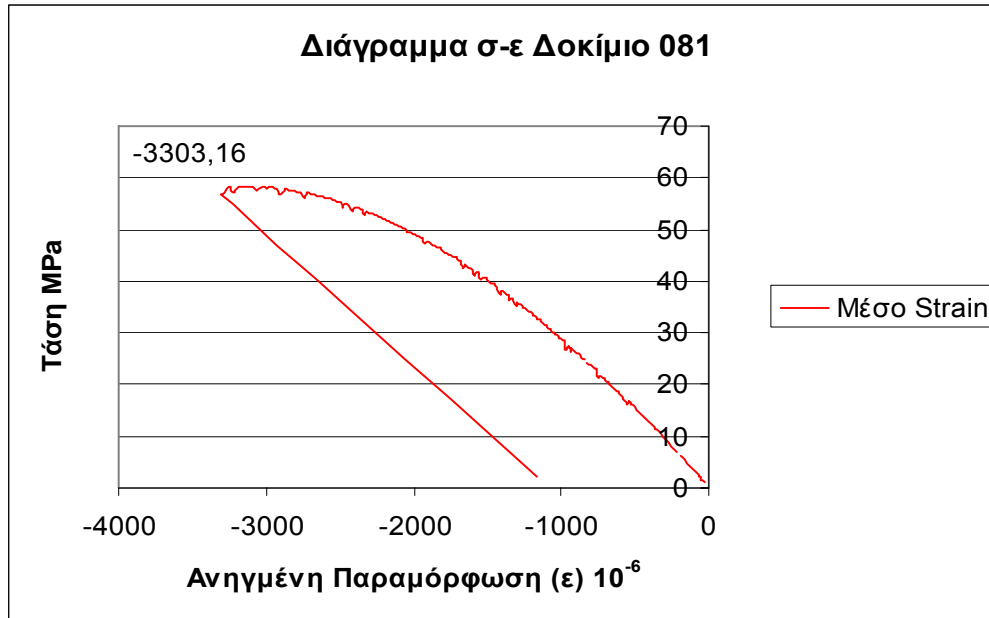


Ένδειξη Strain Gauge 3 Δοκίμιο 081



Ένδειξη Μέσο Strain Δοκίμιο 081





Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας από το παραπάνω διάγραμμα πρέπει να βρεθεί η κλίση της ευθείας που προσεγγίζει την αρχική ευθυγραμμία. Συνήθως η ευθυγραμμία αυτή για το σκυρόδεμα υπάρχει μέχρι το 40% περίπου της μέγιστης τάσης.

Η ακρίβεια της προσέγγισης εκφράζεται μέσα από το δείκτη R^2 . Όσο ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την μονάδα τόσο πιο ακριβής είναι και η προσέγγιση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ευθυγραμμία αυτή προσεγγίστηκε με ευθεία με κλίση $0.029 \text{ MPa}/\epsilon \cdot 10^{-6}$ και $R^2 = 0.9988$.

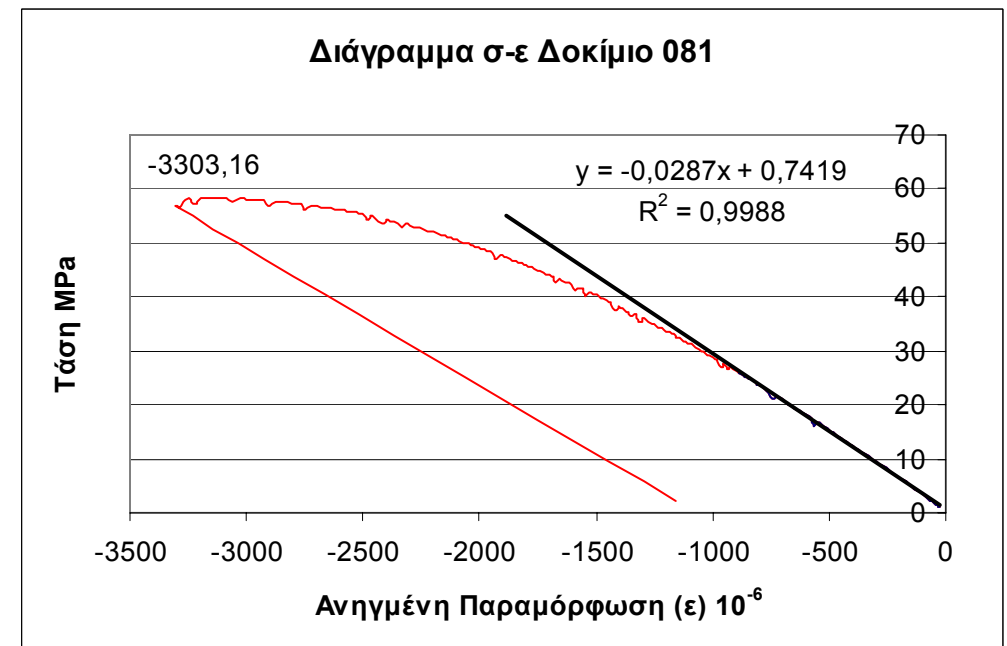
Επομένως:

$$E = 28.7 \text{ GPa}$$

Σύμφωνα με τον τύπο:

$$E\epsilon = \sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Το μέτρο ελαστικότητας E του δοκιμίου 081 είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη μέση καμπύλη των ηλεκτρομυκηνσιομέτρων. Ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης είναι το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης αυτής δεν αντιστοιχεί στο μέτρο δυστένειας του δοκιμίου. Η κλίση της καμπύλης ως μέτρο δυστένειας εκφράζει όχι μόνο το δοκίμιο αλλά και την πρέσα καθώς και άλλους παράγοντες. Ανάλυση αυτού γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο



Αριθμός Δοκιμίου: 082

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 12in.
Διαστάσεις: D = 6in.
Πραγματικές L= 30.50cm
Διαστάσεις: D=15.15cm

Βάρος: 12.590 Kg

Ειδικό Βάρος: 2289.870
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s

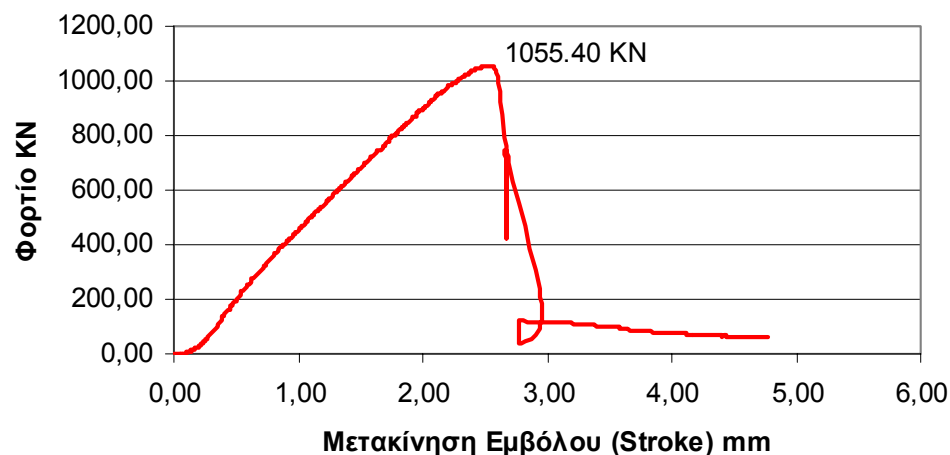
Φορτίο Αστοχίας: 1055.40 KN

Αντοχή: 58.55 MPa

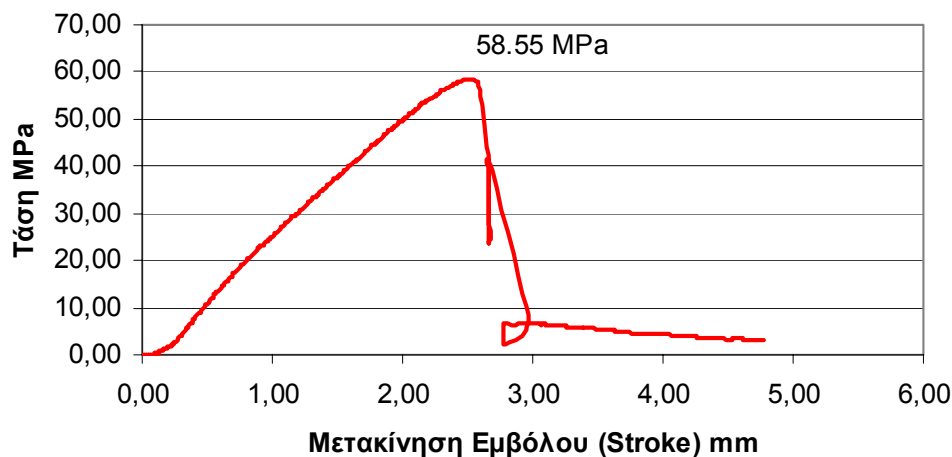
Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 88

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 082



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 082



Δοκίμιο 082 Πριν



Δοκίμιο 082 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

083

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.55cm
D=15.15cm

Βάρος: 12.745 Kg

Ειδικό Βάρος: 2314.267
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 30 Απριλίου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

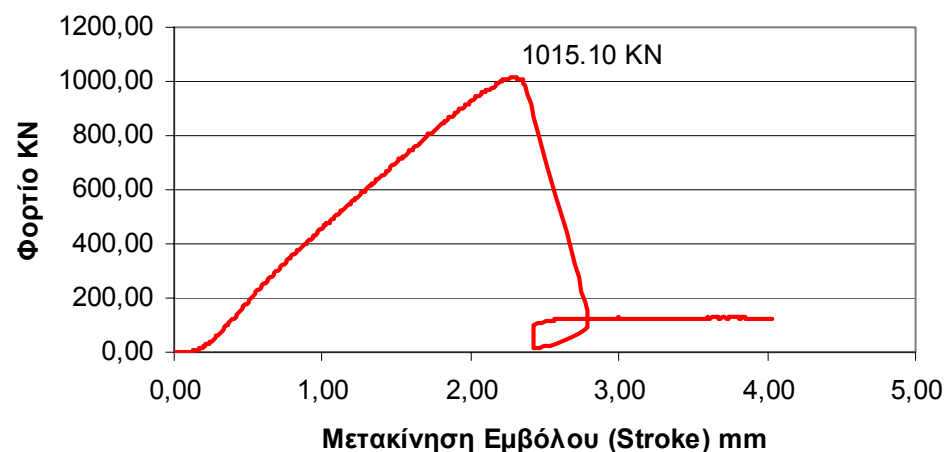
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 1015.10 KN

Αντοχή: 56.31 MPa

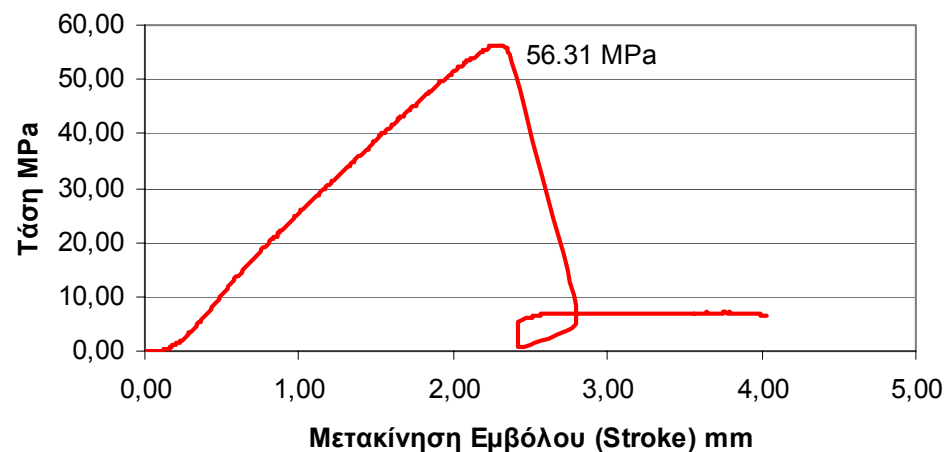
Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 88

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 083



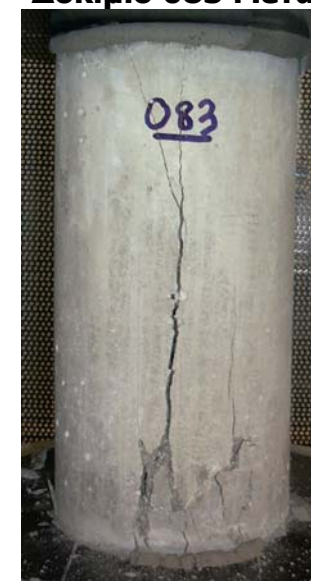
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 083



Δοκίμιο 083 Πριν



Δοκίμιο 083 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

084

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 12in.
Διαστάσεις: D = 6in.
Πραγματικές L= 30.40cm
Διαστάσεις: D=15.10cm

Βάρος: 12.555 Kg

Ειδικό Βάρος: 2306.213
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 7 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain Gauges: 0

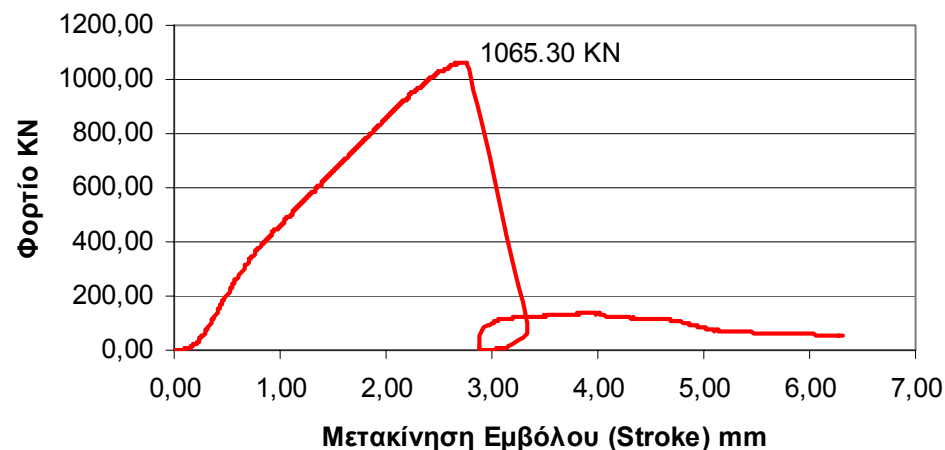
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 1065.30 KN

Αντοχή: 59.49 MPa

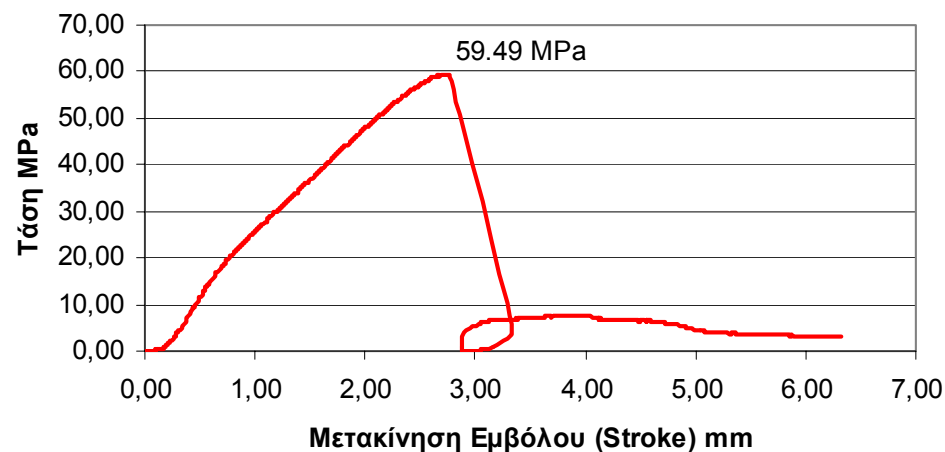
Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 95

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 084



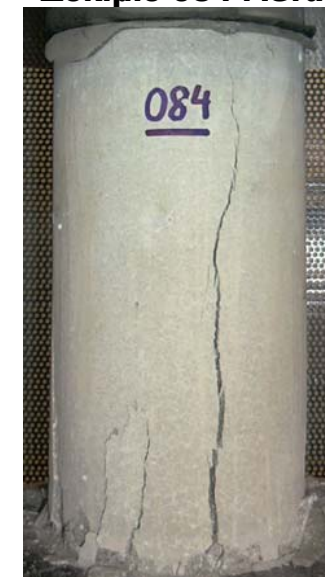
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 084



Δοκίμιο 084 Πριν

N/A

Δοκίμιο 084 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

085

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 12in.
Διαστάσεις: D = 6in.
Πραγματικές L= 30.40cm
Διαστάσεις: D=15.15cm

Βάρος: 12.595 Kg

Ειδικό Βάρος: 2298.314
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 30 Απριλίου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Θλίψη
Compression

Αριθμός Strain
Gauges: 0

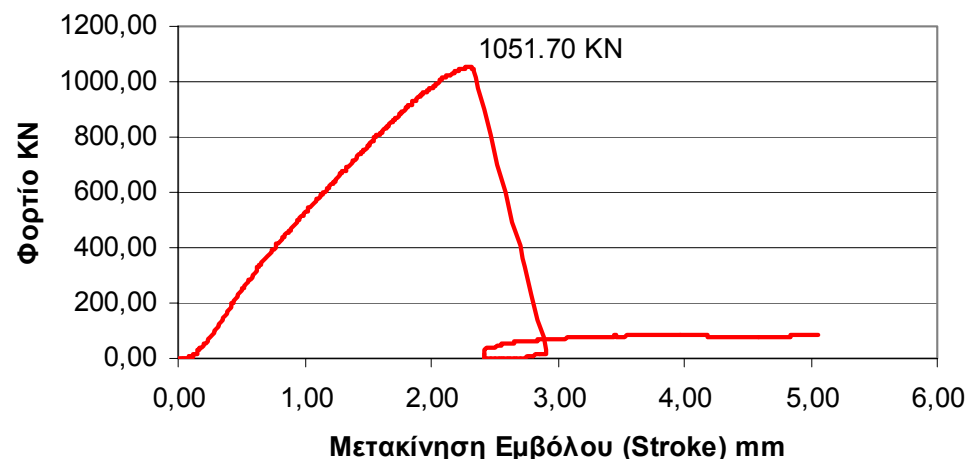
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 1051.70 KN

Αντοχή: 58.34 MPa

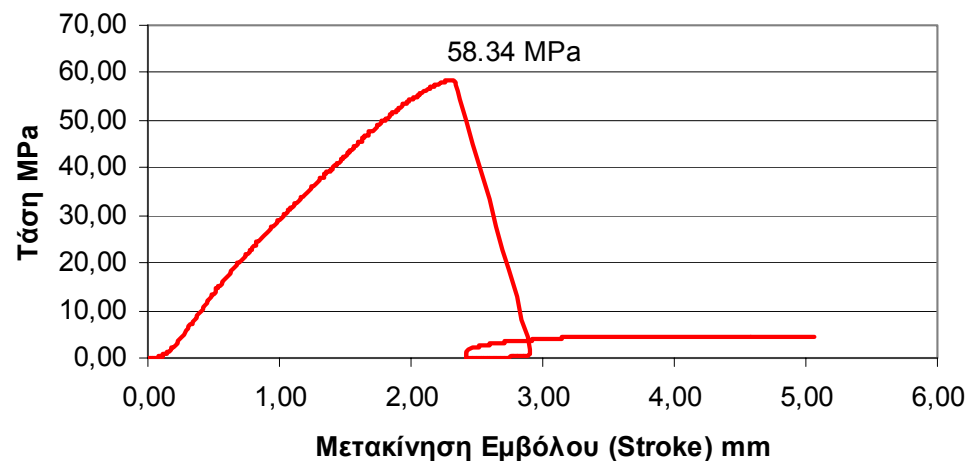
Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 88

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 085



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 085



Δοκίμιο 085 Πριν



Δοκίμιο 085 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

086

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.80cm
D=15.10cm

Βάρος: 12.685 Kg

Ειδικό Βάρος: 2299.831
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου 2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 19 Μαΐου 2004
Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

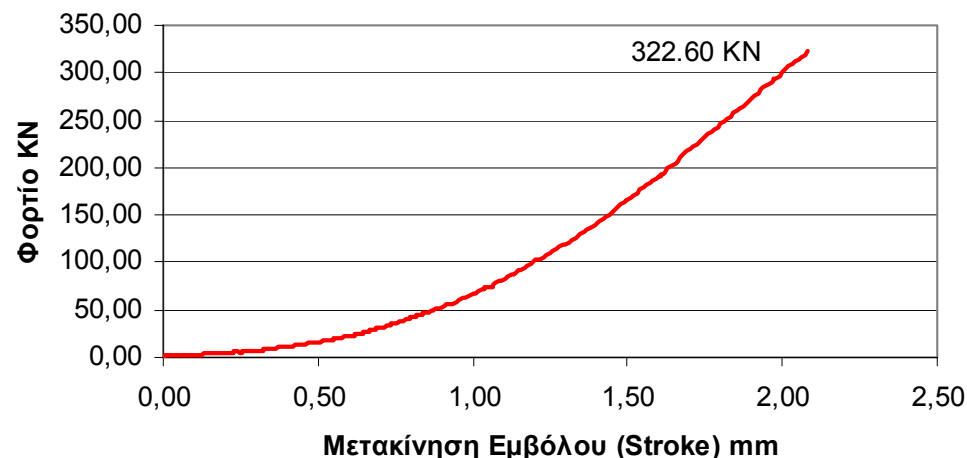
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 322.60 KN

Αντοχή: 4.42 MPa

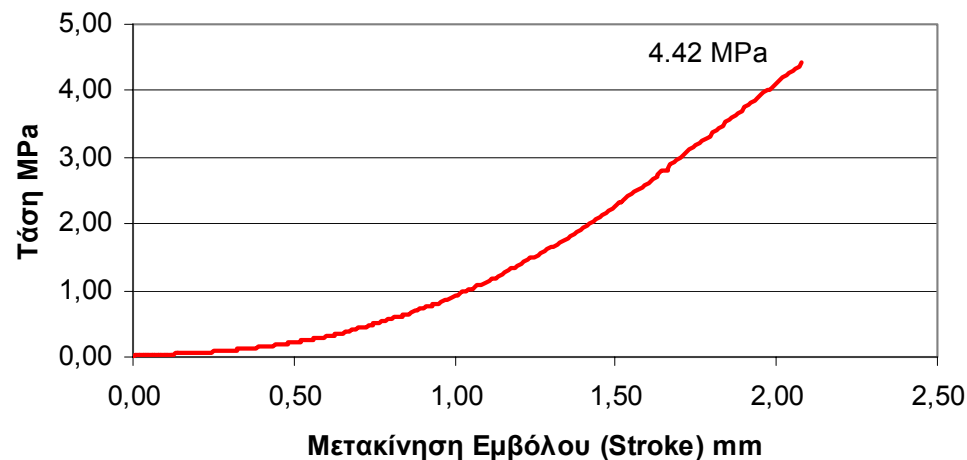
Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 107

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 086



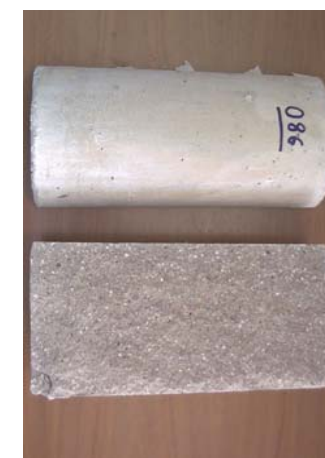
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 086



Δοκίμιο 086 Πριν

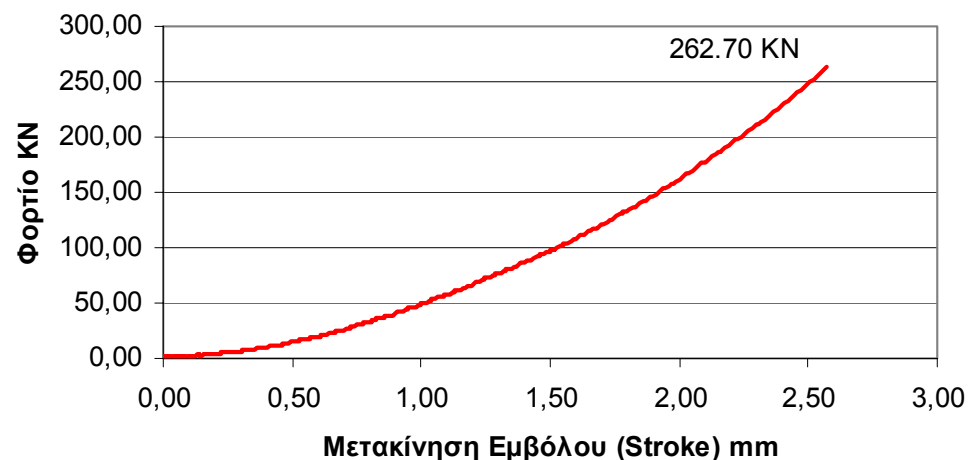


Δοκίμιο 086 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:	087
Σειρά:	2η 5mm Max Κόκκος
Τυπικές Διαστάσεις:	L = 12in. D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις:	L= 30.50cm D=15.15cm
Βάρος:	12.575 Kg
Ειδικό Βάρος:	2287.141 Kg/m ³
Ημερομηνία Σκυροδέτησης:	2 Φεβρουαρίου 2004
Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή:	21 Απριλίου 2004
Ημερομηνία Θραύσης:	19 Μαΐου 2004
Είδος Φορτίου:	Εφελκυσμός Tension
Αριθμός Strain Gauges:	0
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke):	0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας:	262.70 KN
Αντοχή:	3.62 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας E	-----
Ηλικία σε Ημέρες:	107

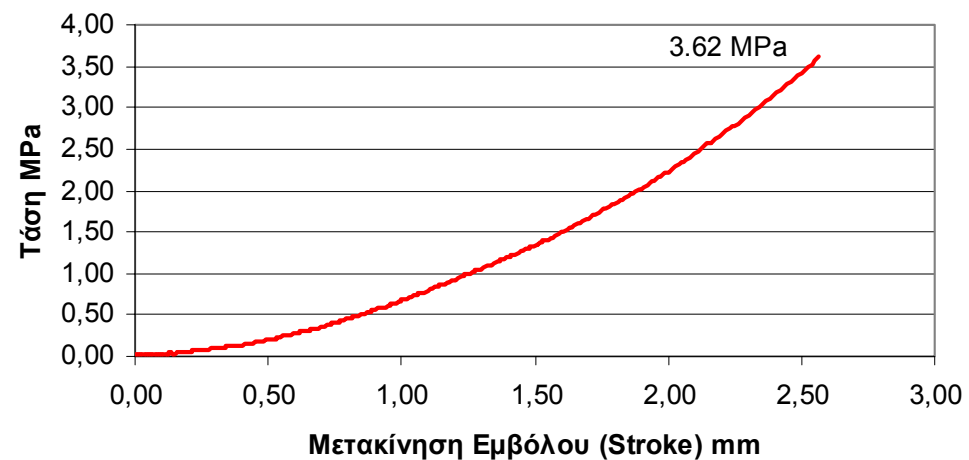
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 087



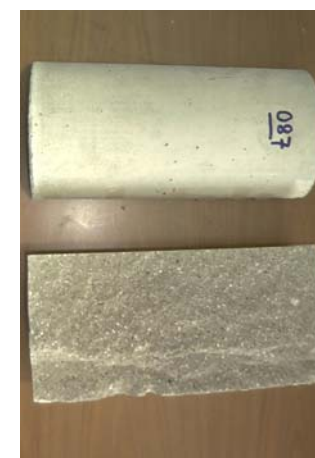
Δοκίμιο 087 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 087



Δοκίμιο 087 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

088

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 12in.
Διαστάσεις: D = 6in.
Πραγματικές L= 30.80cm
Διαστάσεις: D=15.10cm

Βάρος: 12,720 Kg

Ειδικό Βάρος: 2306.177
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 19 Μαΐου 2004
Θραύσης:

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

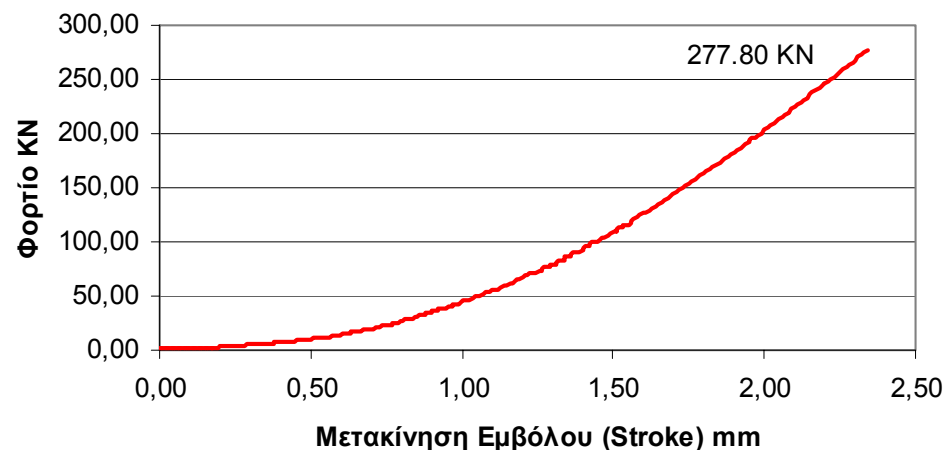
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 277.80 KN

Αντοχή: 3.80 MPa

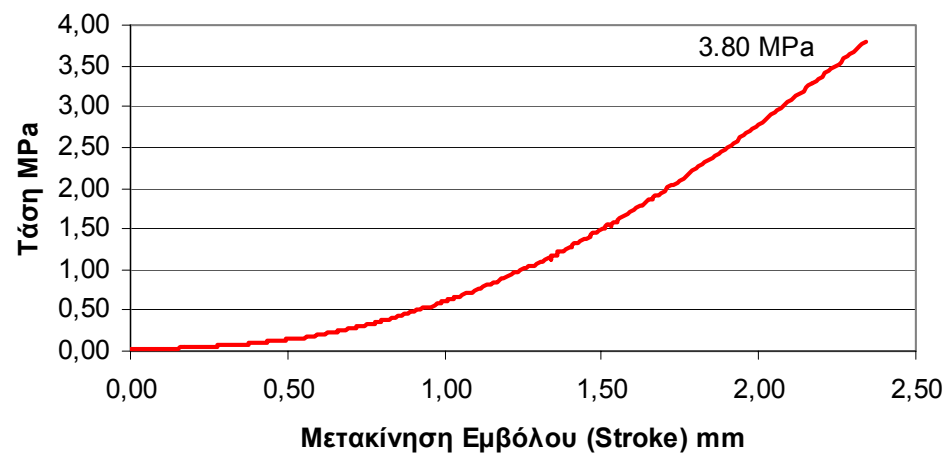
Μέτρο
Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 107

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 088



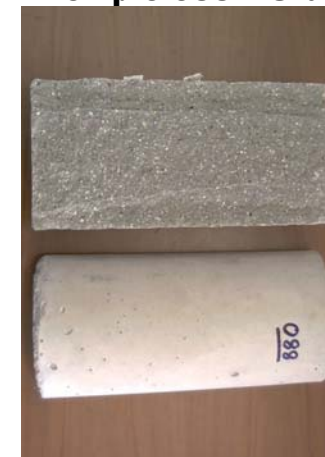
Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 088



Δοκίμιο 088 Μετά



Δοκίμιο 088 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

089

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές L = 12in.
Διαστάσεις: D = 6in.
Πραγματικές L= 30.75cm
Διαστάσεις: D=15.15cm

Βάρος: 12,645 Kg

Ειδικό Βάρος: 2281.175
Kg/m³

Ημερομηνία 2 Φεβρουαρίου
Σκυροδέτησης: 2004

Ημερομηνία 21 Απριλίου 2004
Εξαγωγής από
Δεξαμενή:

Ημερομηνία 19 Μαΐου 2004
Θραύσης:
Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain
Gauges: 0

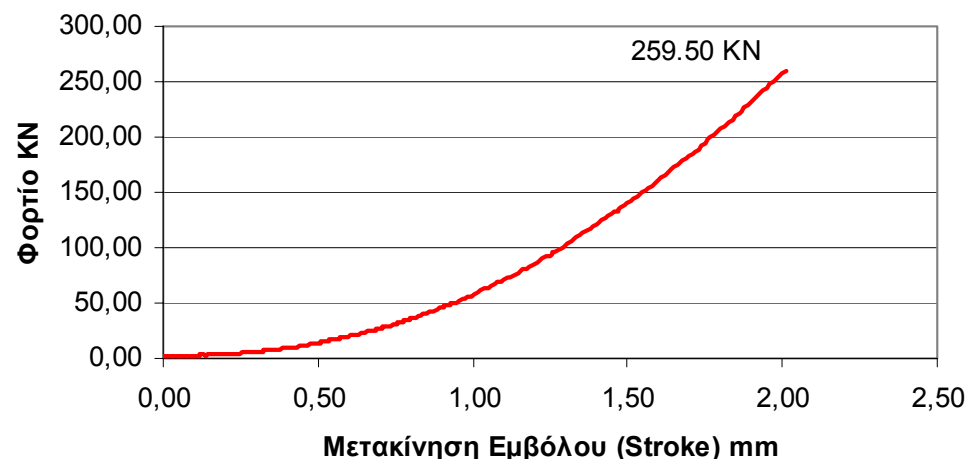
Ρυθμός 0.01 mm/s
Μετακίνησης
εμβόλου (stroke):
Φορτίο Αστοχίας: 259.50 KN

Αντοχή: 3.55 MPa

Μέτρο -----
Ελαστικότητας E

Ηλικία σε Ημέρες: 107

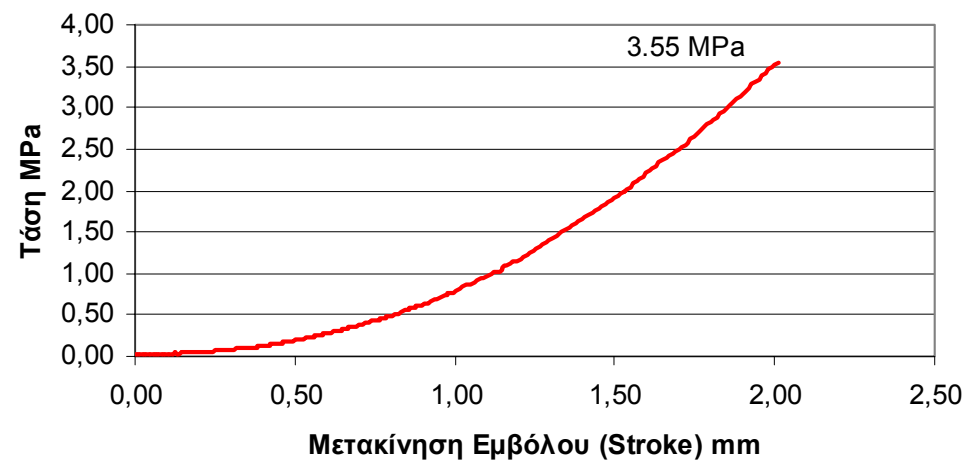
Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 089



Δοκίμιο 089 Πριν

N/A

Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 089



Δοκίμιο 089 Μετά



Αριθμός Δοκιμίου:

090

Σειρά: 2η 5mm Max
Κόκκος

Τυπικές Διαστάσεις: L = 12in.
D = 6in.
Πραγματικές Διαστάσεις: L= 30.65cm
D=15.10cm

Βάρος: 12,630 Kg

Ειδικό Βάρος: 2301.066
Kg/m³

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 2 Φεβρουαρίου
2004

Ημερομηνία Εξαγωγής από Δεξαμενή: 21 Απριλίου 2004

Ημερομηνία Θραύσης: 19 Μαΐου 2004

Είδος Φορτίου: Εφελκυσμός
Tension

Αριθμός Strain Gauges: 0

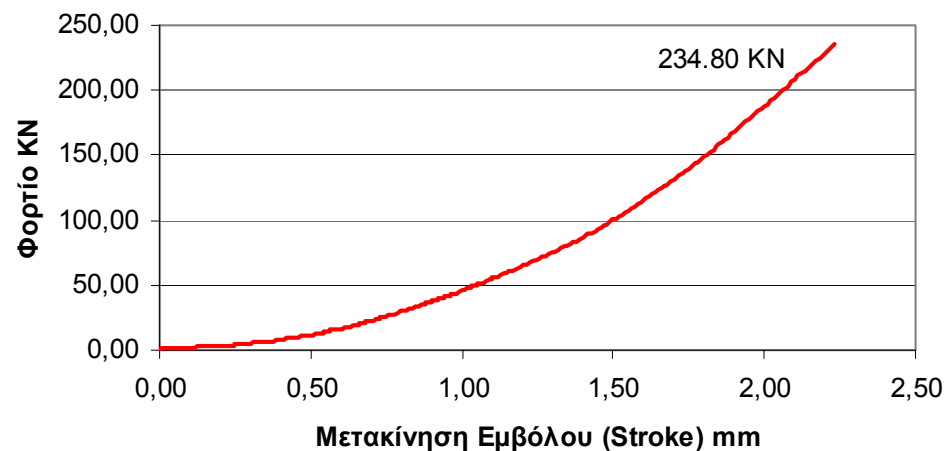
Ρυθμός Μετακίνησης εμβόλου (stroke): 0.01 mm/s
Φορτίο Αστοχίας: 234.80 KN

Αντοχή: 3.23 MPa

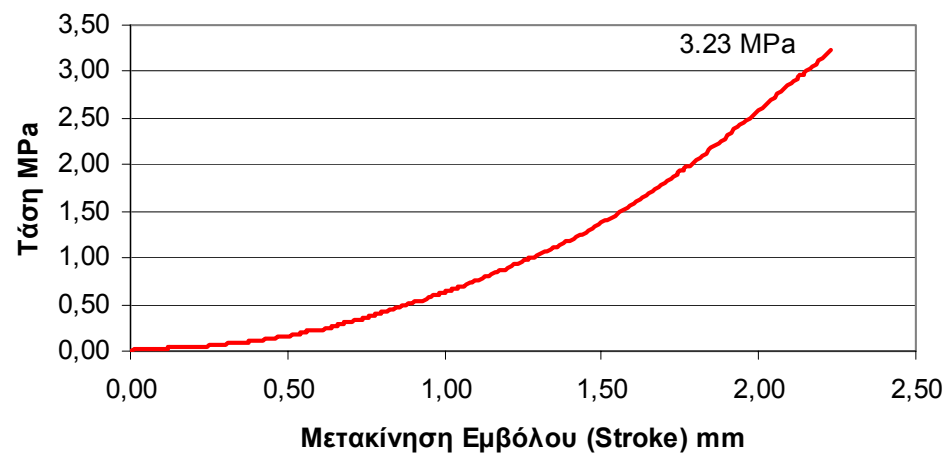
Μέτρο Ελαστικότητας E -----

Ηλικία σε Ημέρες: 107

Διάγραμμα Φορτίου Μετακίνησης Δοκίμιο 090



Διάγραμμα Τάση Μετακίνησης Δοκίμιο 090



Δοκίμιο 090 Μετά

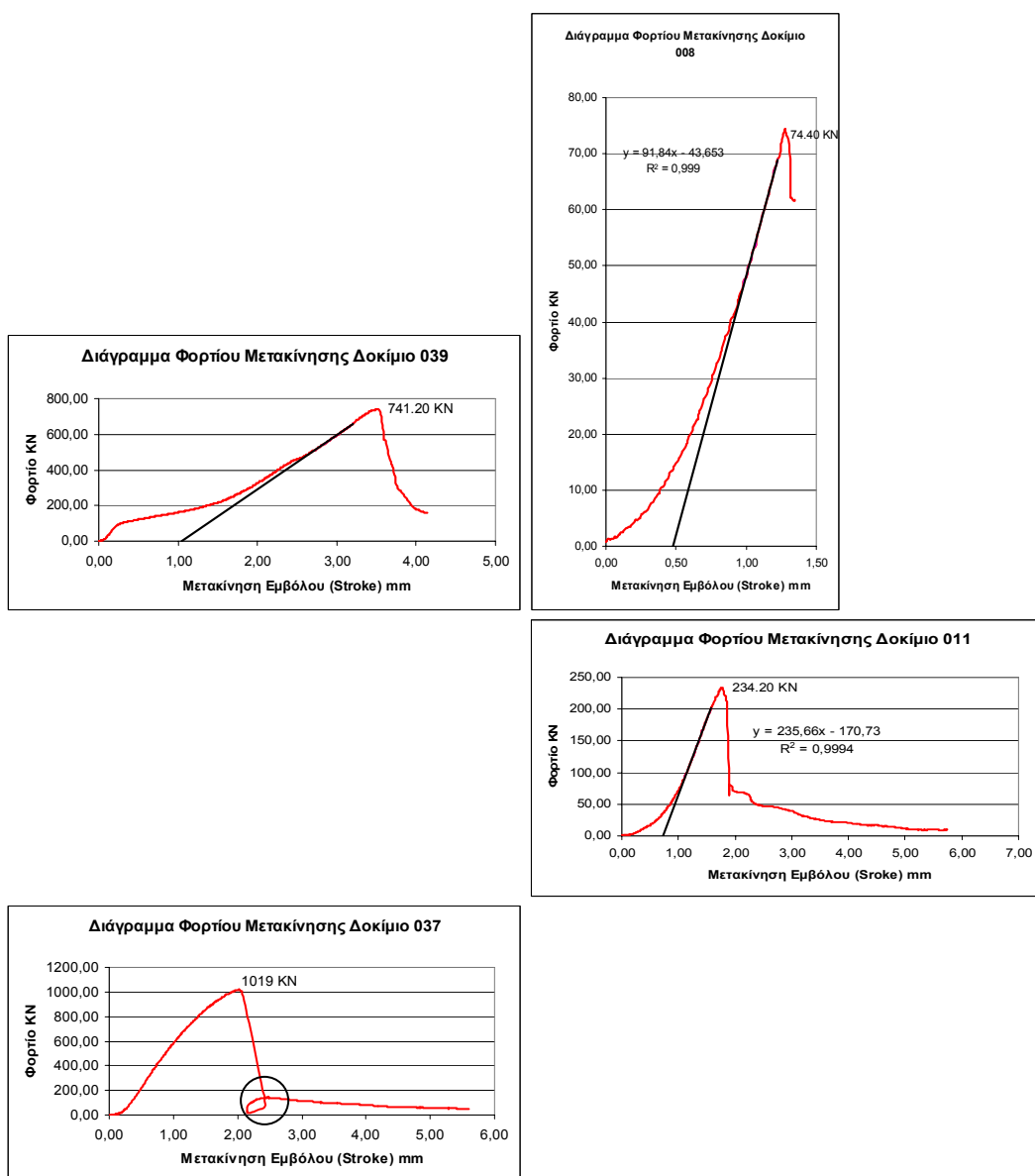


Δοκίμιο 090 Μετά



Κεφάλαιο 6

Επεξεργασία διαγραμμάτων φορτίου - μετακίνησης εμβόλου πρέσας



Στο κεφάλαιο αυτό διορθώνονται οι αποκλίσεις στο σχήμα και στην κλίση των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνηση εμβόλου (Stroke) και σχολιάζονται οι αιτίες που τις προκάλεσαν.

6.1 Εισαγωγή

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο προήλθαν από τα ανεπεξέργαστα πειραματικά δεδομένα, όπως προέκυψαν από τα πειράματα. Το μέγιστο φορτίο και η μέγιστη αντοχή που εμφανίζονται στα διαγράμματα είναι ορθά και δεν επηρεάστηκαν από εξωτερικούς παράγοντες. Η μορφή όμως των διαγραμμάτων επηρεάστηκε από τρεις παράγοντες με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν τα διαγράμματα που θα περίμενε κανείς να δει. Οι τρεις αυτοί παράγοντες ήταν:

- Το “καπέλωμα” και οι λωρίδες φόρτισης προκάλεσαν παρεμβολές στο σχήμα και στην κλίση των διαγραμμάτων.
- Η πρέσα επηρέασε την κλίση των διαγραμμάτων εξαιτίας της δυστένιάς της.
- Η ψαθυρή συμπεριφορά των δοκιμίων εξαιτίας της υψηλής αντοχής του υλικού προκάλεσε εκρηκτικές αστοχίες ή αστάθεια των οποίων αποτυπώθηκε και στα διαγράμματα.

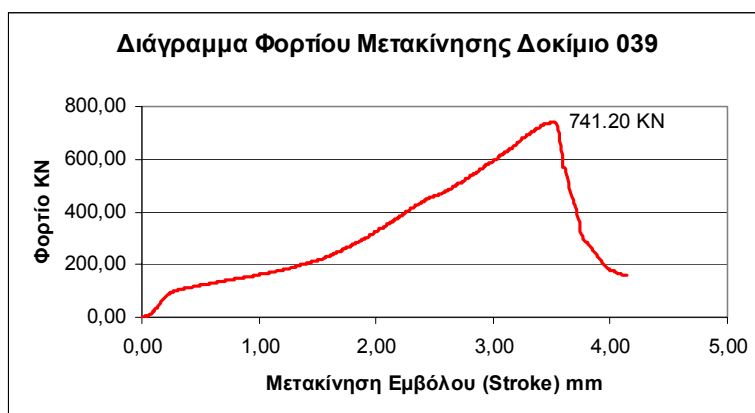
Παρακάτω θα αναλυθούν οι παρεμβολές και θα διορθωθούν οι κλίσεις των διαγραμμάτων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του κάθε δοκιμίου.

6.2 Οι παρεμβολές του “καπελώματος” (Capping)

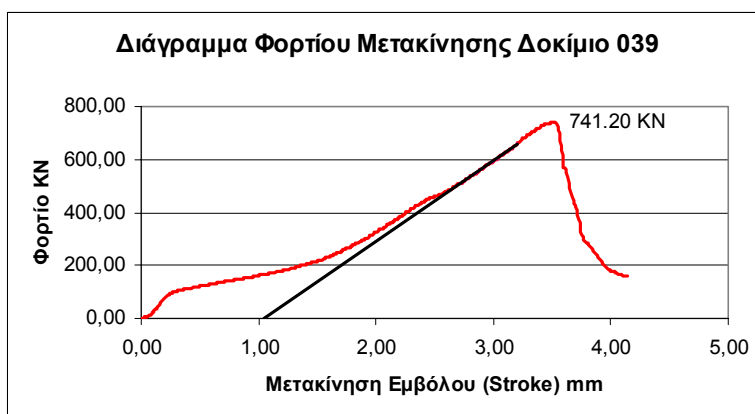
Η τοποθέτηση “καπελώματος” στα δοκίμια θλίψης επηρέασε τα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης ανάλογα με το είδος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε γι’ αυτόν τον σκοπό. Το πρώτο υλικό “καπελώματος” που χρησιμοποιήθηκε προκάλεσε σοβαρή αλλοίωση των διαγραμμάτων εξαιτίας της σταδιακής αστοχίας του. Σαφώς το μέγιστο φορτίο δεν επηρεάστηκε επειδή το δοκίμιο είχε υψηλότερη αντοχή, αλλά επηρεάστηκε σημαντικά το σχήμα του διαγράμματος. Δηλαδή επηρέασε την κλίση του διαγράμματος κάνοντας την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου σχεδόν αδύνατη. Μετά τα αρχικά πειράματα το υλικό αντικαταστάθηκε με ένα είδος ινοπλισμένου κονιάματος. Το νέο υλικό “καπελώματος” δεν προκάλεσε ιδιαίτερα προβλήματα στο σχήμα και τη μορφή των διαγραμμάτων.

Σοβαρά προβλήματα στην ομαλή μορφή των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης εμβόλου προέκυψαν στα αρχικά πειράματα. Τα διαγράμματα των δοκιμών 004, 006, 028, 038 και 039 παρουσίασαν σοβαρή αλλοίωση στην αρχική γραμμικότητα της συμπεριφοράς του υλικού λόγω της σταδιακής αστοχίας του καπελώματος. Η συμπεριφορά του υλικού “καπελώματος” αποτυπώθηκε στο διάγραμμα συνδυασμένη με τη συμπεριφορά του δοκιμίου. Οι προαναφερθέντες ανωμαλίες είναι φανερές ιδιαίτερα στα διαγράμματα των δοκιμών 004, 006, 028, 038 και 039. Με την αλλαγή του υλικού του “καπελώματος”, τα προβλήματα δεν εξαλείφθηκαν πλήρως, περιορίστηκαν όμως αρκετά. Ένα παράδειγμα των προαναφερθέντων διαγραμμάτων για το δοκίμιο

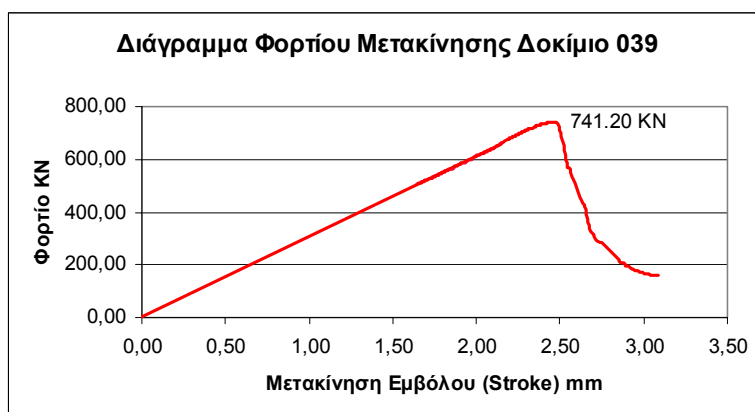
039 παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Το διορθωμένο διάγραμμα συμπεριφοράς του δοκιμίου 039 φαίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχ.6.1 Το αρχικό διάγραμμα επηρεασμένο από το "καπέλωμα"



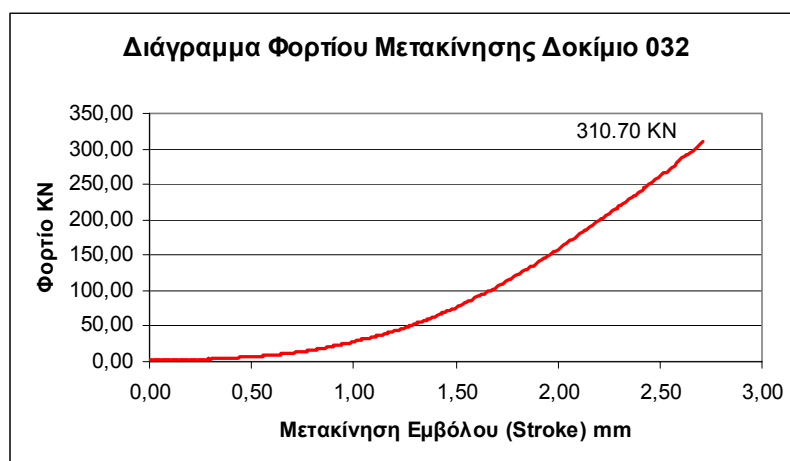
Σχ.6.2 Το αρχικό διάγραμμα παράλληλα με την διόρθωση



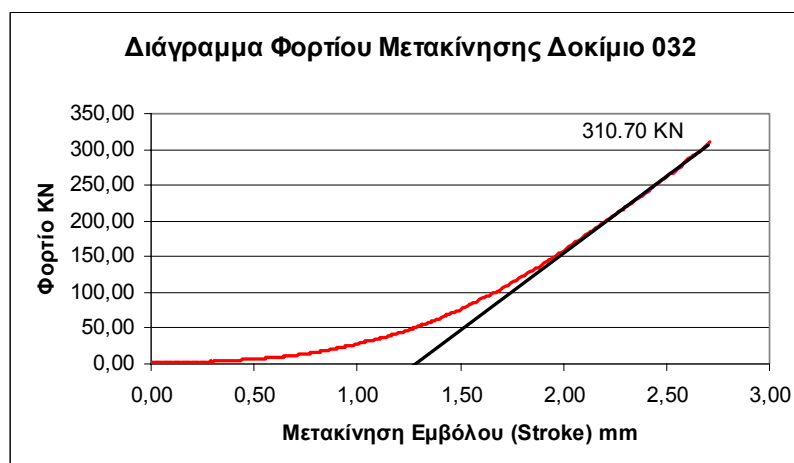
Σχ.6.3 Το διορθωμένο διάγραμμα

6.3 Οι παρεμβολές των λωρίδων φόρτισης

Στα πειράματα έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη χρησιμοποιήθηκαν λωρίδες φόρτισης από πεπιεσμένο χαρτί για την επιβολή του φορτίου στα κυλινδρικά δοκίμια. Η παραμορφωσιμότητά τους επηρέασε το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου κυρίως στην αρχή της φόρτισης. Παρουσιάστηκε αύξηση της δυστένιας (stiffening effect) για το πρώτο τμήμα της καμπύλης πριν από την καθαρά γραμμική περιοχή. Η απόκλιση αυτή από την αναμενόμενη γραμμικότητα οφείλεται στην αρχική παραμόρφωση των λωρίδων φόρτισης. Τα ανάλογα διαγράμματα του έμμεσου εφελκυσμού στο κεφάλαιο 5 δεν είναι διορθωμένα αλλά προέρχονται από τα ανεπεξέργαστα πειραματικά δεδομένα. Στα σχήματα 6.4 με 6.5 εμφανίζεται παράδειγμα διαγράμματος φορτίου – μετακίνησης εμβόλου της πρέσας έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη και τη διόρθωσή του.



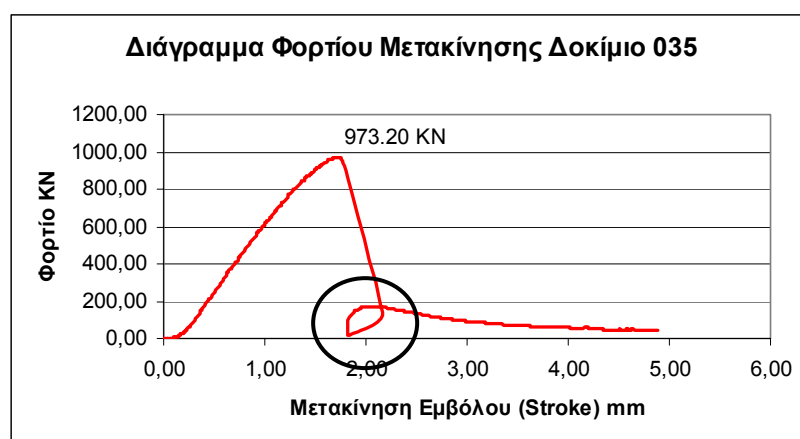
Σχ.6.4 Το αρχικό διάγραμμα επηρεασμένο από τις λουρίδες φόρτισης



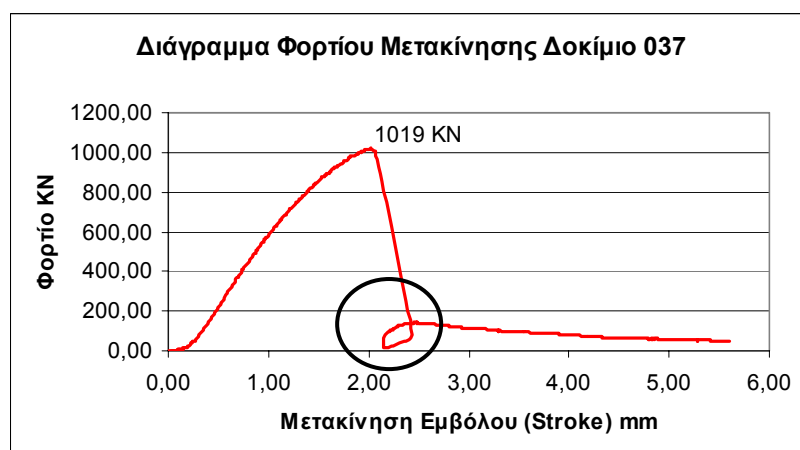
Σχ.6.5 Το αρχικό διάγραμμα παράλληλα με την διόρθωση

6.4 Η επίδραση της δυναμικότητας της αστοχίας

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τη σκυροδέτηση των δοκιμών ήταν υψηλής αντοχής. Κατά τη διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής προέκυψαν αντοχές που ξεπερνούσαν τα 50 MPa. Η υψηλή αντοχή του σκυροδέματος οδήγησε σε μια ιδιαίτερα ψαθυρή συμπεριφορά. Η τελική αστοχία των δοκιμών, ιδιαίτερα των μεγαλύτερων δοκιμών, συνοδεύεται από την δυναμική απελευθέρωση της συσσωρευμένης ενέργειας με αποτέλεσμα την αναπήδηση του εμβόλου και την καταγραφή στο διάγραμμα βρόγχου. Η πτώση του φορτίου μετά από την κορυφή ήταν ακαριαία εξαιτίας της ψαθυρής συμπεριφοράς και αναμενόμενης αστάθειας. Η ταυτόχρονη αναπήδηση του εμβόλου και ακαριαία πτώση του φορτίου καθώς και η μετέπειτα επιστροφή του εμβόλου στην αναμενόμενη θέση είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία βρόγχου στο διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου (Stroke). Στα σχήματα 6.6 και 6.7 εμφανίζονται τα ανάλογα διαγράμματα και σημειώνεται η θέση των βρόγχων.



Σχ.6.6 Το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης του δοκιμίου 035 και η θέση του βρόγχου



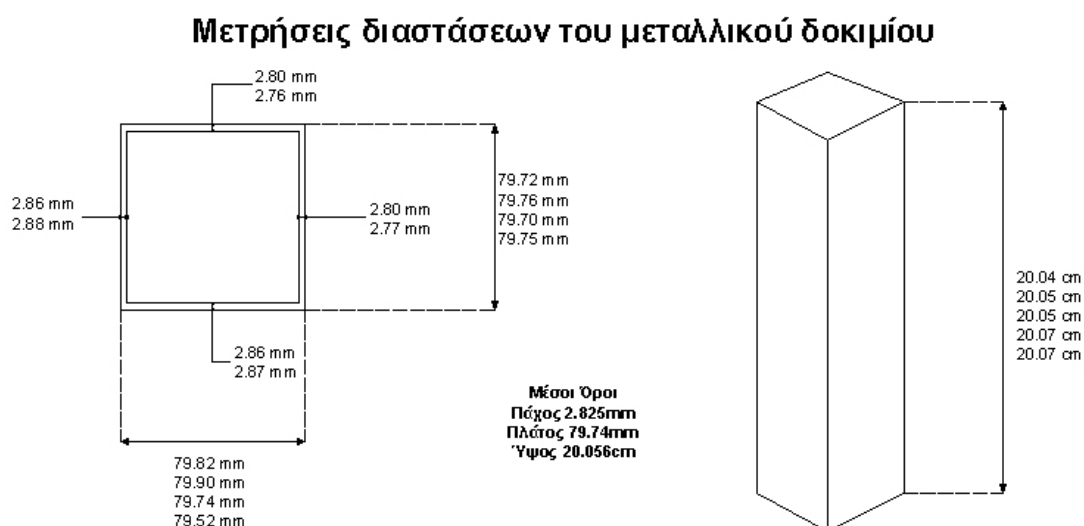
Σχ.6.7 Το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης του δοκιμίου 037 και η θέση του βρόγχου

6.5 Η επίδραση της μηχανής.

Η πρέσα που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία των πειραμάτων αποτελείται από πλαίσιο φόρτισης. Η παραμορφωσιμότητα του πλαισίου φόρτισης και κατ' επέκταση της πρέσας προκαλεί αλλοίωση της κλίσης της καμπύλης επιβαλλόμενου φορτίου-μετακίνησης (stroke). Η μετακίνηση του εμβόλου (stroke) της πρέσας, όπως καταγράφηκε στα διαγράμματα, αποτελεί άθροισμα δύο παραμορφώσεων. Η παραμόρφωση όχι μόνο του δοκιμίου αλλά και του πλαισίου φόρτισης της πρέσας συνυπολογίζονται ως stroke. Επομένως προκειμένου να βρεθεί η σωστή κλίση των διαγραμμάτων πρέπει να αφαιρέσουμε την επίδραση της δυστένειας της πρέσας.

Για να υπολογιστεί η παραμορφωσιμότητα της πρέσας πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα χρησιμοποιώντας ένα ειδικά κατασκευασμένο δοκίμιο. Η φιλοσοφία της μεθόδου ήταν η επίλυση του προβλήματος έχοντας ως μοναδική άγνωστη μεταβλητή το μέτρο της δυστένειας της πρέσας. Στο μεταλλικό δοκίμιο κοίλης ορθογωνικής διατομής τοποθετήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα να καταγραφεί η ανηγμένη αξονική θλιπτική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Προκειμένου να εξακριβωθούν οι διαστάσεις του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε όργανο μέτρησης μεγάλης ακρίβειας και πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της διατομής για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια της διαδικασίας. Οι διαστάσεις αναφέρονται αναλυτικά στο σχήμα 6.8.



Σχ.6.8 Διαστάσεις του μεταλλικού δοκιμίου

Οι μέσες τιμές των μετρήσεων ανά διάσταση που προέκυψαν ήταν:

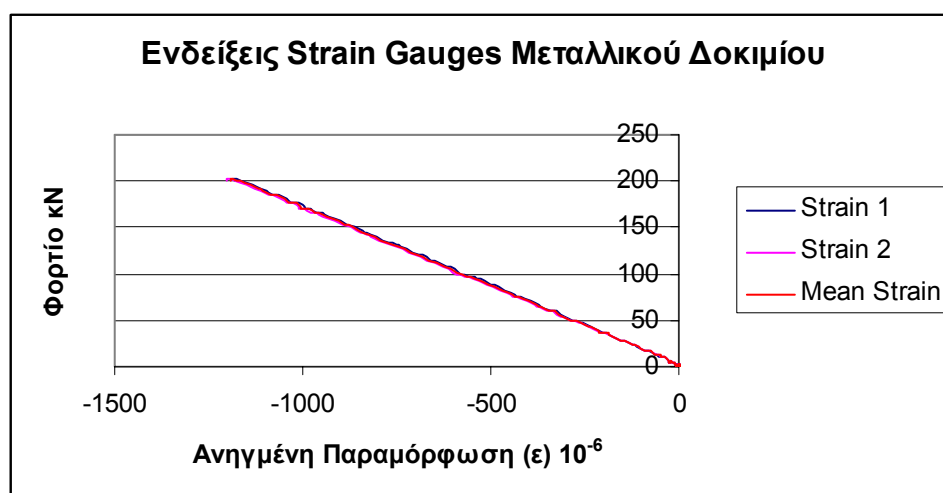
- Ύψος 20.056cm
- Πάχος 2.825mm
- Εξωτερικό πάχος κατά x 79.7325mm
- Εξωτερικό πάχος κατά y 79.745mm

Από τις παραπάνω τιμές υπολογίστηκε ότι το εμβαδόν της διατομής ήταν ίσο με $837579.42 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.

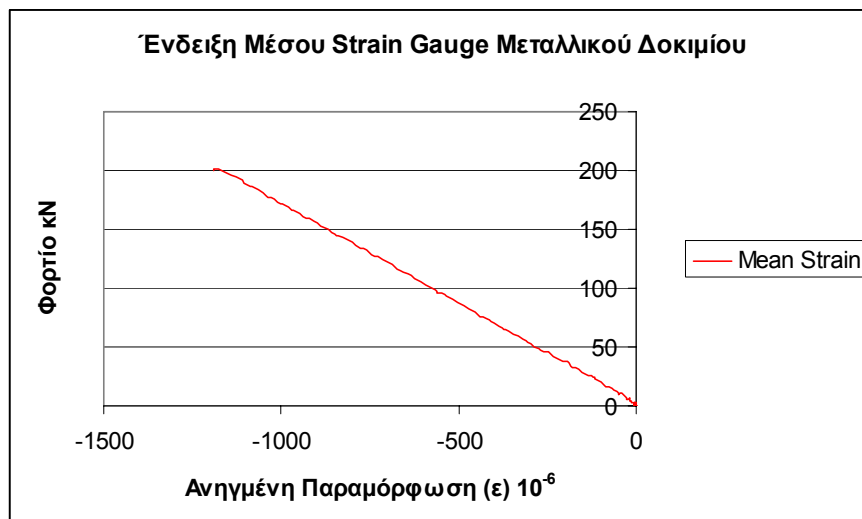
Πάνω στο δοκίμιο τοποθετήθηκαν δύο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα σε αντιδιαμετρικές θέσεις. Η επικόλληση τους έγινε με ειδική εποξιδική ρητίνη και συνδέθηκαν με το αυτόματο σύστημα καταγραφής. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην πρέσα όπου και το σύνολο των πειραμάτων με τα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος.



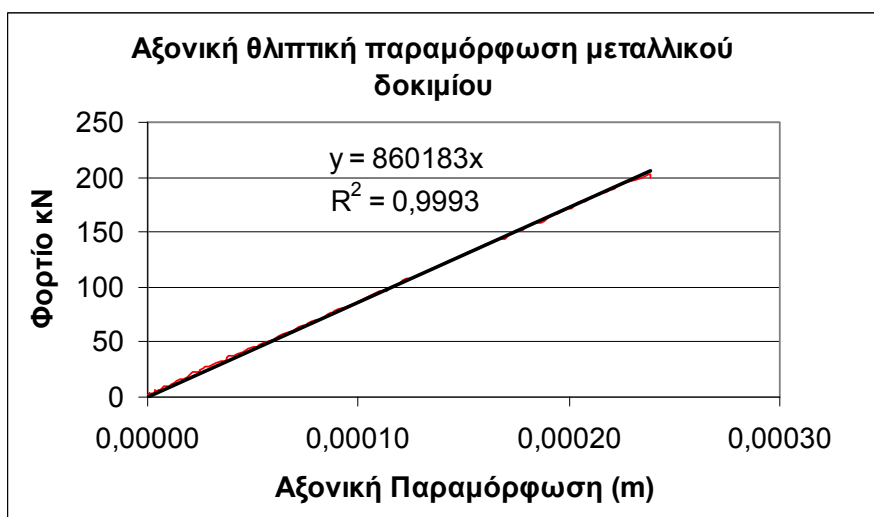
Σχ.6.9 Το δοκίμιο στην πρέσα



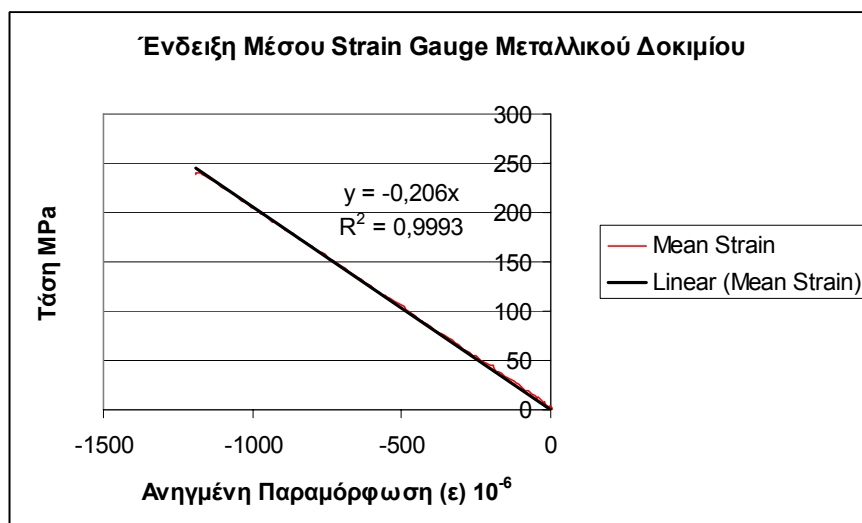
Σχ.6.10 Οι ενδείξεις των ανηγμένων αξονικών θλιπτικών παραμορφώσεων συναρτήσει του φορτίου.



Σχ.6.11 Μέση ανηγμένη αξονική παραμόρφωση συναρτήσει του φορτίου.



Σχ.6.12 Αξονική θλιπτική παραμόρφωση συναρτήσει του φορτίου και η προσέγγιση με ευθεία.

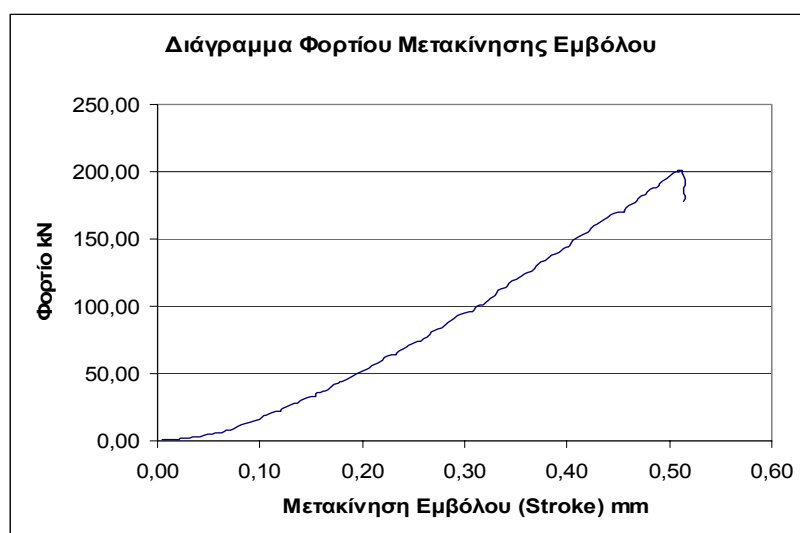


Σχ.6.13 Μέση ανηγμένη παραμόρφωση συναρτήσει της επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης και η προσέγγιση με ευθεία.

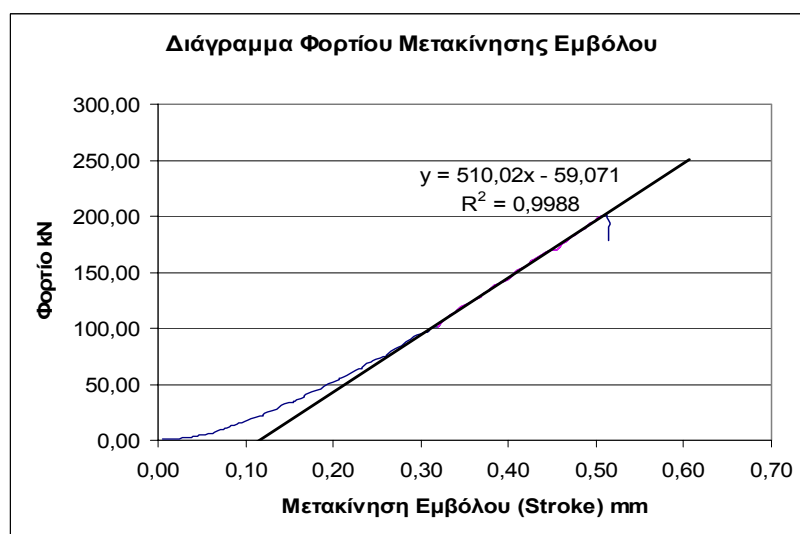
Από τα προηγούμενα διαγράμματα προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες. Από την κλίση του διαγράμματος τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης (Σχ.6.13) προκύπτει ένα μέτρο Ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 206 GPa. Επομένως η τιμή αυτή επιβεβαιώνει επίσης και τη σωστή λειτουργία των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.

Το διάγραμμα του σχήματος 6.12 περιγράφει την αξονική θλιπτική παραμόρφωση συναρτήσει του φορτίου. Προέκυψε από το γινόμενο της μέσης ανηγμένης αξονικής θλιπτικής παραμόρφωσης με την αξονική διάσταση του δοκιμίου ($\Delta \ell_{μέση} = \varepsilon_{μέση} \cdot \ell$). Από την κλίση του διαγράμματος αυτού (Σχ.6.12) προκύπτει η δυστένια του δοκιμίου. Η τιμή που βρέθηκε είναι 860183 KN/m.

Το πείραμα καταγράφηκε και από τον Η/Υ της πρέσας. Η κλίση του διαγράμματος που προέκυψε έδινε την συνδυασμένη δυστένια της πρέσας και του δοκιμίου. Προσεγγίζοντας την κλίση του διαγράμματος με μία ευθεία υπολογίστηκε η συνολική δυστένια ίση με 510020 KN/m.



Σχ.6.14 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου (Stroke)



Σχ.6.15 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου (Stroke) και υπολογισμός της συνολικής δυστένιας

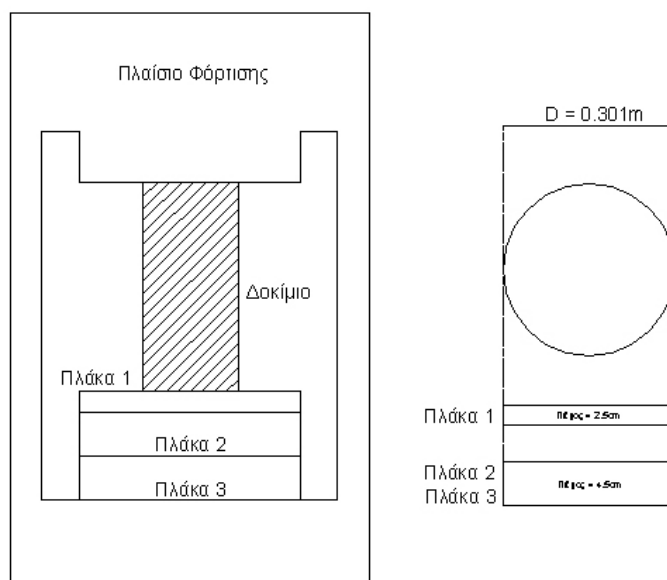
Η πρέσα και το δοκίμιο έχουν συνδυασμένη δυστένεια $K_{\text{συνολική}} = 510020 \text{ KN/m}$ και το δοκίμιο από μόνο του έχει δυστένεια $K_{\text{δοκίμιο}} = 860183 \text{ KN/m}$. Η πρέσα και το δοκίμιο μπορούν να προσεγγιστούν ως δύο ελατήρια συγκεκριμένης δυστένειας το κάθε ένα. Τα δύο αυτά ελατήρια είναι συνδεδεμένα σε σειρά και η δυστένιά τους K_1 και K_2 συνδέεται με την συνολική δυστένεια του συστήματος με τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{1}{K_{\text{συνολικό}}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \quad (\text{Εξ. 6.1})$$

Στην πρέσα όμως υπάρχει και μια σειρά πλακών για τη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των εμβόλων και των αμετακίνητων μερών του πλαισίου της πρέσας ώστε να μπορεί να δέχεται διάφορα μεγέθη δοκιμίων. Οι πλάκες αυτές είναι από χάλυβα και υπάρχουν σε δύο πάχη. Η μία είναι των 2.5 cm και η άλλη 4.5 cm . Η δυστενία των πλακών αυτών πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της δυστενίας του πλαισίου φόρτισης της πρέσας.

$$K_{\Pi 1} = K_{\text{πλάκα } h=2.5\text{cm}} = \left(\frac{EA}{h} \right)_{\Pi 1} = 597.726 \times 10^6 \text{ KN/m} \quad (6.1)$$

$$K_{\Pi 2} = K_{\text{πλάκα } h=4.5\text{cm}} = \left(\frac{EA}{h} \right)_{\Pi 2} = 332.000 \times 10^6 \text{ KN/m} \quad (6.2)$$



Σχ.6.16 Διάγραμμα πλαισίου πρέσας και ενδιάμεσων πλακών φόρτισης

Επομένως, η σχέση των δυστενιών για μια πλάκα $\Pi 1$ ($K_{\Pi 1}$), δύο πλάκες $\Pi 2$ ($K_{\Pi 2}$), δοκίμιο ($K_{\Delta\text{οκ}}$) και το πλαίσιο φόρτισης (K_M) είναι οι ακόλουθη:

$$\frac{1}{K_{\text{ολικό}}} = \frac{1}{K_{\Pi 1}} + \frac{1}{K_{\Pi 2}} + \frac{1}{K_{\Pi 2}} + \frac{1}{K_{\Delta\text{οκ}}} + \frac{1}{K_M} \quad (6.3)$$

Από τον την εξίσωση 6.3 γνωρίζουμε τη συνολική δυστένια, $K_{\text{συνολικό}}$, και τη δυστένια του μεταλλικού δοκιμίου, $K_{\text{ΔΟΚ}}$. Επομένως εφαρμόζοντας την εξίσωση 6.3 προκύπτει ότι η δυστένια του πλαισίου της πρέσας είναι $K_M = 1265074 \text{ KN/m} = 1265.074 \text{ MN/m}$.

6.6 Ανάλυση της δυστενίας των δοκιμών σκυροδέματος

Προκειμένου να βρεθεί το μέτρο Ελαστικότητας των δοκιμών σκυροδέματος πρέπει να αναλυθούν και να συνυπολογιστούν οι δυστένιες όλων των εμπλεκόμενων στοιχείων. Η δυστένια της πρέσας δεν περιλαμβάνει τις ενδιάμεσες πλάκες φόρτισης και το “καπέλωμα” των δοκιμών. Μάλιστα ο αριθμός των πλακών διαφέρει ανάλογα με τις διαστάσεις του εκάστοτε δοκιμίου. Ομοίως διαφέρει και το πάχος των “καπελωμάτων”. Προκειμένου να υπολογιστεί σωστά η δυστενία του δοκιμίου πρέπει να ληφθούν όλα αυτά υπόψη.

Οι πλάκες έχουν σχετικά μεγάλη δυστένια και δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την συνδυασμένη δυστενία που είναι η κλίση στα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου (Stroke). Θα ληφθούν όμως υπόψη για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας της μεθόδου.

Η ύπαρξη δοκιμών διαφορετικού μεγέθους οδήγησε στην προσθαφαίρεση πλακών ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Ο συνολικός αριθμός των πλακών ήταν 5. Η πλάκα με πάχος 2.5 cm αποτελούσε την κεφαλή και τη λεία επιφάνεια πάνω στην οποία τοποθετείτο το δοκίμιο προς θραύση και χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα. Η δυστενία της πλάκας αυτής υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 6.5:

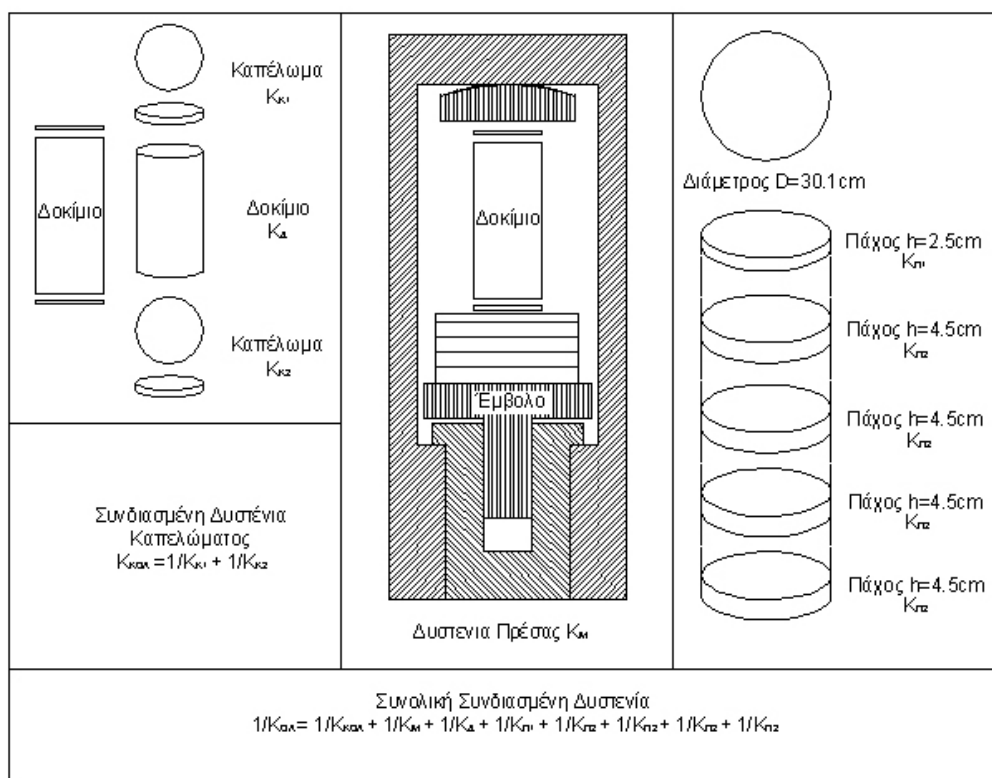
$$K_{\Pi 1} = K_{\text{Πλάκα } h=2.5\text{cm}} = \left(\frac{EA}{h} \right)_{\Pi 1} = 597.726 \times 10^6 \text{ KN/m}$$

Οι άλλες πλάκες τοποθετούνταν κάτω από την λεπτότερη ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες ρύθμισης της απόστασης μεταξύ των εμβόλων και των αμετακίνητων μερών του πλαισίου της πρέσας. Υπήρχαν τέσσερις τέτοιες πλάκες προς εξυπηρέτηση όλων των μεγεθών των δοκιμών. Το πάχος τους ήταν μεγαλύτερο (4.5cm). Η διάμετρος όλων των πλακών ήταν το ίδιο ($D=30.1\text{cm}$). Στο κεφάλαιο 6.5 υπολογίστηκε η δυστενία και αυτών των πλακών:

$$K_{\Pi 2} = K_{\text{Πλάκα } h=4.5\text{cm}} = \left(\frac{EA}{h} \right)_{\Pi 2} = 332.000 \times 10^6 \text{ KN/m}$$

Για τα μεγαλύτερα δοκίμια ($h=12 \text{ in.}$) χρησιμοποιείται μόνο η πλάκα Π_1 πάχους 2.5cm. Για το αμέσως επόμενο μέγεθος δοκιμών ($h=8 \text{ in.}$) χρησιμοποιούνται δύο μεγάλες πλάκες Π_2 και φυσικά η λεπτή Π_1 . Για το επόμενο μέγεθος δοκιμών ($h=6 \text{ in.}$) χρησιμοποιούνται τρεις μεγάλες πλάκες Π_2 και η λεπτή Π_1 . Ενώ για τα μικρότερα δοκίμια ($h=4 \text{ in.}$) χρησιμοποιούνται οι τρεις μεγάλες πλάκες Π_2 , μια τετραγωνική Π_3 και η μικρή Π_1 . Η τετραγωνική πλάκα τοποθετείτο πάνω στην μικρή και είχε διαστάσεις 15cm x 15cm και πάχος 5 cm.

$$K_{\Pi 3} = K_{\text{Ορθ.Πλάκα } =5\text{cm}} = \left(\frac{EA}{h} \right)_{\Pi 3} = 94.5 \times 10^6 \text{ KN/m}$$

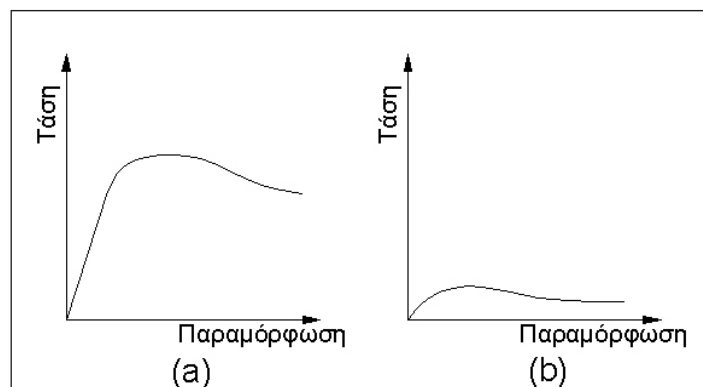


Σχ.6.17 Σχεδιάγραμμα στοιχείων σε σειρά σε δοκιμή θλίψης δοκιμίου σκυροδέματος.

Προκειμένου να είναι δυνατή η παραπάνω ανάλυση πρέπει να υπάρχουν πληροφορίες για το “καπέλωμα” (Capping). Με άλλα λόγια πρέπει να είναι γνωστές οι διαστάσεις τους και το μέτρο Ελαστικότητας του υλικού το οποίο δεν είναι γνωστό. Βέβαια το πάχος του “καπελώματος” σε σχέση με την επιφάνεια του ήταν πολύ μικρό, της τάξης μερικών χιλιοστών. Η δυστένια του αναμένεται λοιπόν να είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα δοκίμια και την πρέσα. Επομένως η επίδραση του στην συνολική δυστένια θα είναι περιορισμένη. Βέβαια προκειμένου να συνυπολογιστούν τα “καπελώματα” στην εξίσωση οφείλουν να συμπεριφέρονται γραμμικά όταν και τα υπόλοιπα στοιχεία (δοκίμια, μηχανή και πλάκες) συμπεριφέρονται γραμμικά. Εάν η συμπεριφορά των “καπελωμάτων” εισέρχονταν στην πλαστική περιοχή σε σχετικά χαμηλά φορτία ο παραπάνω γενικός τύπος θα παρουσίαζε μεγάλες αποκλίσεις.

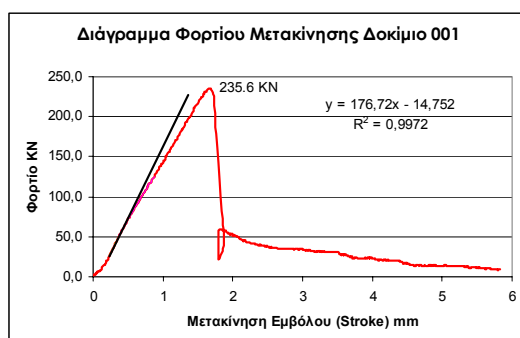
Για να υπολογιστούν οι δυστένιες των δοκιμίων θα θεωρηθεί η επίδραση του “καπελώματος” αμελητέα. Κάτι το οποίο βέβαια δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Πρώτα θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της μεθόδου στα δοκίμια των οποίων γνωρίζουμε τη δυστένια με βάση τις μετρήσεις από τα Strain Gauges. Εάν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις που δεν δικαιολογούνται από πιθανή γραμμική συμπεριφορά του “καπελώματος” τότε αυτές οφείλονται στην πρόωρη πλαστική παραμόρφωσή τους. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποκλίσεις για τα μικρότερα δοκίμια όπου το ύψος του “καπελώματος” σε σχέση με το μέγεθος των δοκιμίων είναι σχετικά μεγάλο. Η πιθανή πλαστική παραμόρφωση του “καπελώματος” θα προκαλούσε

αυξημένη παραμορφωσιμότητα στο μικτό σύστημα δοκίμιο - carrying με αποτέλεσμα η κλίση της καμπύλης φορτίου – μετακίνησης εμβόλου να ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη.

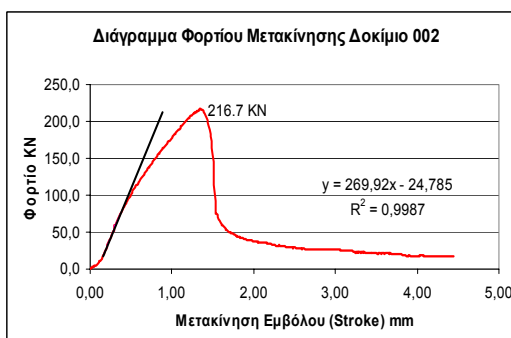


Σχ.6.18 Σχεδιαγράμματα τάση παραμόρφωσης (α) για υλικά που παρουσιάζουν σημαντική γραμμική συμπεριφορά και (β) υλικά που δεν παρουσιάζουν σημαντική γραμμική συμπεριφορά

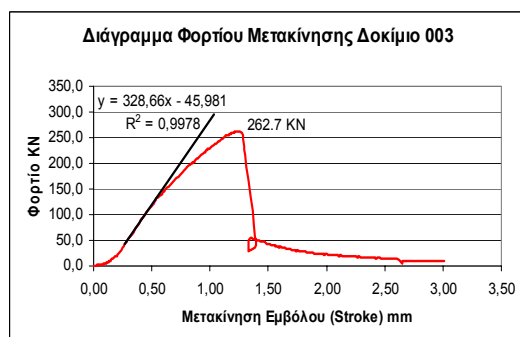
Μπορούμε να εξαγάγουμε την συνδυασμένη δυστένεια από την κλίση των διαγραμμάτων φορτίου –μετακίνησης εμβόλου. Στα διαγράμματα των δοκιμών με strain gauges, σχήματα 6.19 – 6.39, μπορούμε να εξαγάγουμε την αρχική κλίση τους.



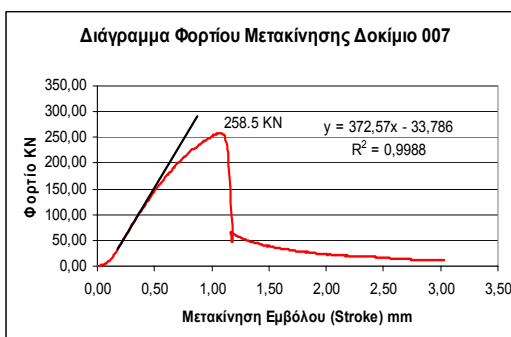
Σχ.6.19 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 001
Αρχική κλίση καμπύλης = 176.72 kN/mm



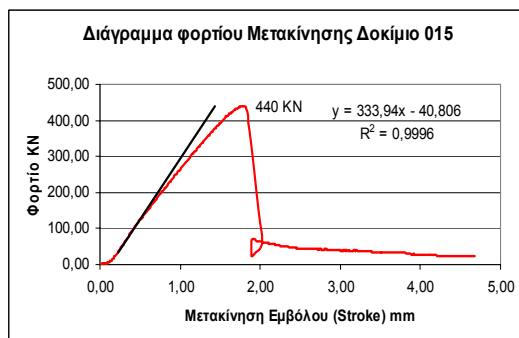
Σχ.6.20 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 002
Αρχική κλίση καμπύλης = 269.92 kN/mm



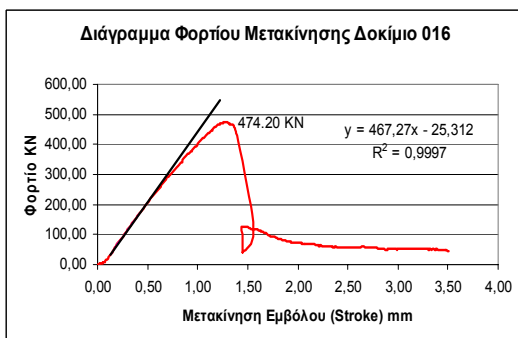
Σχ.6.21 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 003
Αρχική κλίση καμπύλης = 328.66 kN/mm



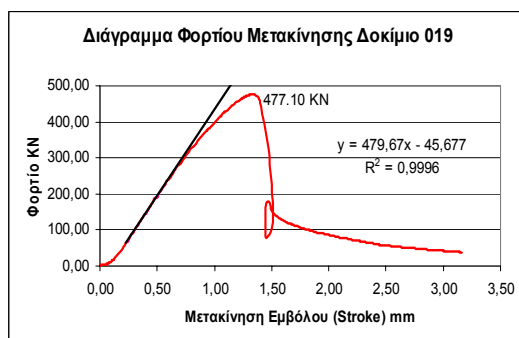
Σχ.6.22 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 007
Αρχική κλίση καμπύλης = 372.57 kN/mm



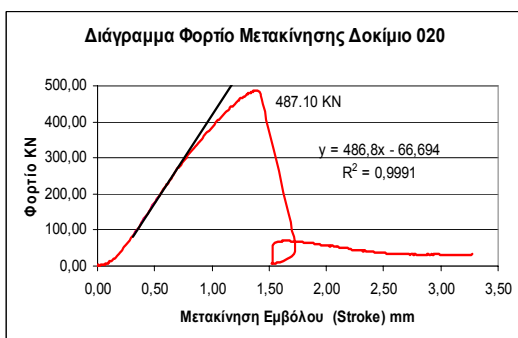
Σχ.6.23 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 015
Αρχική κλίση καμπύλης = 333.94 kN/mm



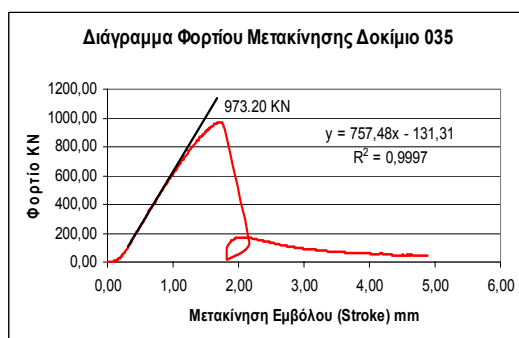
Σχ.6.24 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 016
Αρχική κλίση καμπύλης = 467.27 kN/mm



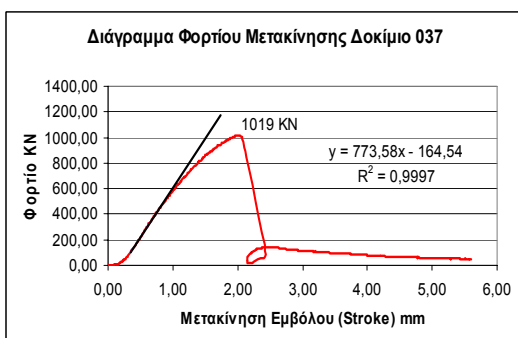
Σχ.6.25 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 019
Αρχική κλίση καμπύλης = 479.67kN/mm



Σχ.6.26 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 020
Αρχική κλίση καμπύλης = 486.80kN/mm



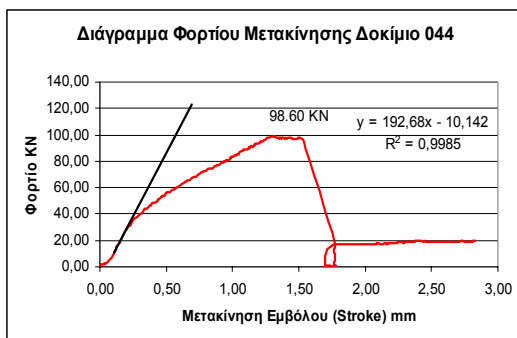
Σχ.6.27 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 035
Αρχική κλίση καμπύλης = 757.48kN/mm



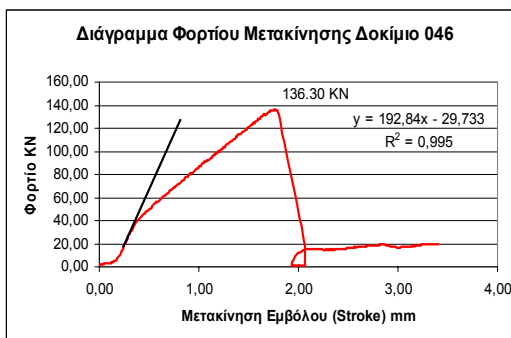
Σχ.6.28 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 037
Αρχική κλίση καμπύλης = 773.58kN/mm

Δοκίμιο	Κλίση – Δυστένια kN/mm	Δοκίμιο	Κλίση – Δυστένια kN/mm
001	176.72	016	467.27
002	269.92	019	479.67
003	328.66	020	486.80
007	372.57	035	757.48
015	333.94	037	773.58

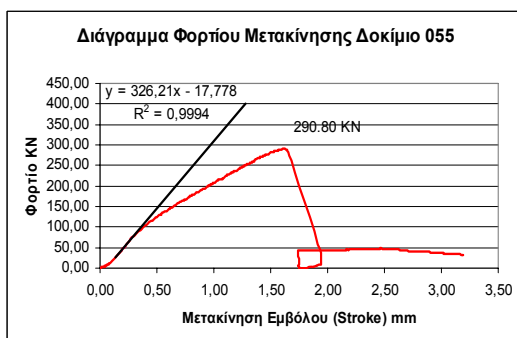
Σχ.6.29 Πίνακας κλίσεων της καμπύλης φορτίου – μετακίνησης εμβόλου της 1^{ης} σειράς δοκιμών σε θλίψη.



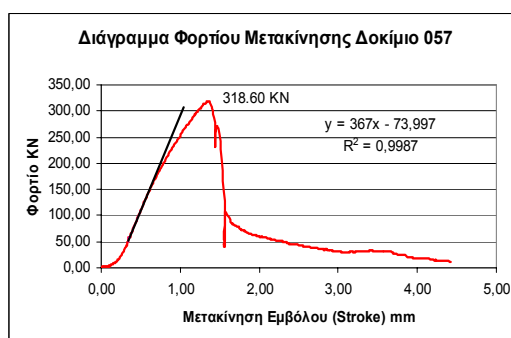
Σχ.6.30 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 044
Αρχική κλίση καμπύλης = 192.68kN/mm



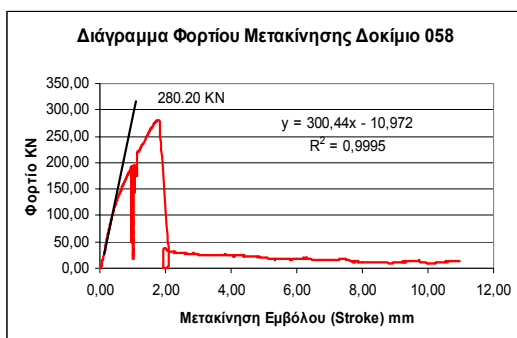
Σχ.6.31 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 046
Αρχική κλίση καμπύλης = 192.84kN/mm



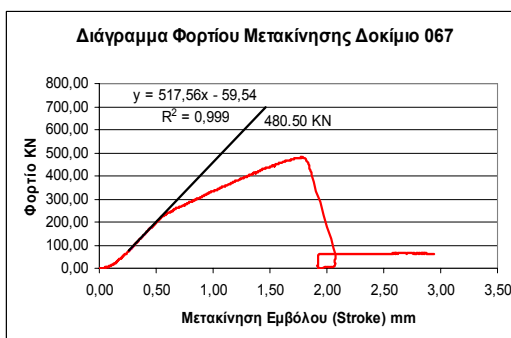
Σχ.6.32 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 055
Αρχική κλίση καμπύλης = 326.21kN/mm



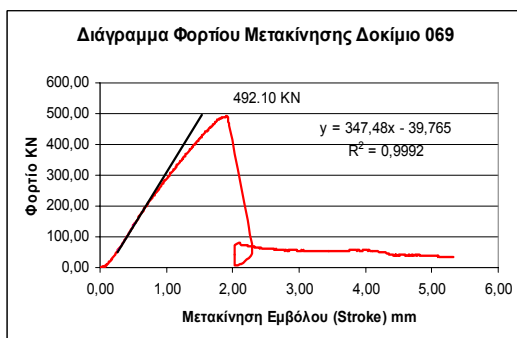
Σχ.6.33 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 057
Αρχική κλίση καμπύλης = 367.00kN/mm



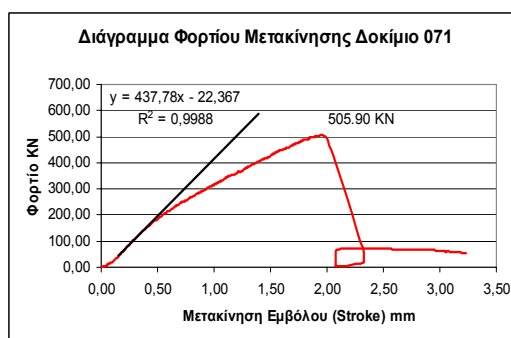
Σχ.6.34 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 058
Αρχική κλίση καμπύλης = 300.44kN/mm



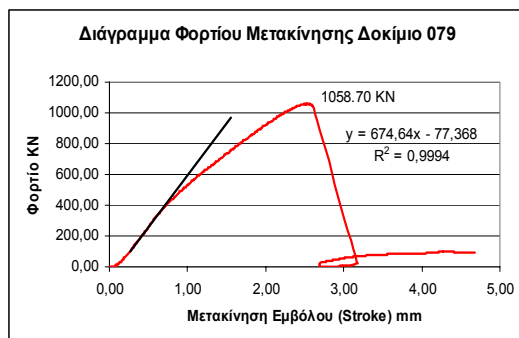
Σχ.6.35 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 067
Αρχική κλίση καμπύλης = 517.56kN/mm



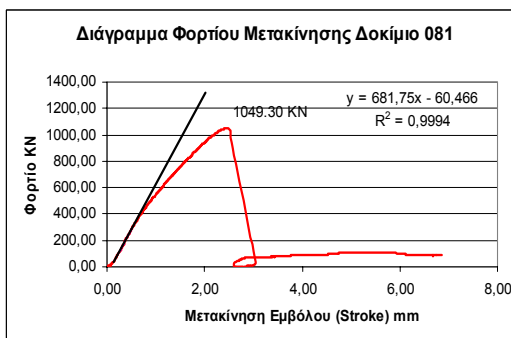
Σχ.6.36 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 069
Αρχική κλίση καμπύλης = 347.48kN/mm



Σχ.6.37 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκιμίου 071
Αρχική κλίση καμπύλης = 437.78kN/mm



Σχ.6.38 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 079
Αρχική κλίση καμπύλης = 674.64kN/mm



Σχ.6.39 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 081
Αρχική κλίση καμπύλης = 681.75kN/mm

Δοκίμιο	Κλίση – Δυστένεια kN/mm	Δοκίμιο	Κλίση – Δυστένεια kN/mm
044	192.68	067	517.56
046	192.84	069	347.48
055	326.21	071	437.78
057	367	079	674.64
058	300.44	081	681.85

Σχ.6.40 Πίνακας κλίσεων της καμπύλης φορτίου – μετακίνησης εμβόλου της 2^{ης} σειράς δοκιμών σε θλίψη.

Δοκίμιο	E(GPa)	D(m)	L(m)	A(m ²)	Kdokimio(kN/mm)
001	47,1	0,0762	0,1524	0,00456	1409
002	43,0	0,0762	0,1524	0,00456	1287
003	29,7	0,0762	0,1510	0,00456	897
007	33,5	0,0762	0,1510	0,00456	1012
015	33,4	0,1016	0,2032	0,00811	1333
016	30,4	0,1016	0,2032	0,00811	1213
019	56,4	0,1016	0,2032	0,00811	2250
020	35,5	0,1016	0,2032	0,00811	1416
035	27,0	0,1524	0,3048	0,01824	1616
037	32,7	0,1524	0,3048	0,01824	1957
044	36,4	0,0505	0,1010	0,00200	722
046	38,2	0,0505	0,1015	0,00200	754
055	30,5	0,0755	0,1540	0,00448	887
057	38,5	0,0755	0,1530	0,00448	1127
058	32,8	0,0755	0,1533	0,00448	958
067	30,8	0,101	0,2038	0,00801	1211
069	31,7	0,101	0,2050	0,00801	1239
071	32,0	0,101	0,2035	0,00801	1260
079	33,2	0,1515	0,30625	0,01803	1954
081	28,7	0,1515	0,30450	0,01803	1699

Σχ.6.41 Πίνακας της δυστένειας των δοκιμών σε θλίψη, με βάση το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε από τα Strain Gauges

Δοκίμιο	Διάμετρος	Από διαγράμματα Μικτή Δυστένια kN/mm	Δυστένια Μηχανής kN/mm	Η Δυστένια της μικρής πλάκας kN/mm	Η Δυστένια της μεγάλης πλάκας kN/mm	Αριθμός Μεγάλων πλακών	Υπολογισμένη Δυστένια kN/mm	Πραγματική Δυστένια kN/mm	Σφάλμα %
001	3in.	176.72	1265	597726	332000	3	206	1409	85
002	3 in.	269.92	1265	597726	332000	3	344	1287	73
003	3 in.	328.66	1265	597726	332000	3	446	897	50
007	3 in.	372.57	1265	597726	332000	3	531	1012	48
015	4 in.	333.94	1265	597726	332000	2	455	1333	66
016	4 in.	467.27	1265	597726	332000	2	745	1213	39
019	4 in.	479.67	1265	597726	332000	2	777	2250	65
020	4 in.	486.80	1265	597726	332000	2	796	1416	44
035	6 in.	757.48	1265	597726	332000	0	1894	1616	-17
037	6 in.	773.58	1265	597726	332000	0	1998	1957	-2
044	2 in.	192.68	1265	597726	332000	3+Τετράγωνη	228	722	68
046	2 in.	192.84	1265	597726	332000	3+Τετράγωνη	229	754	70
055	3 in.	326.21	1265	597726	332000	3	442	887	50
057	3 in.	367.00	1265	597726	332000	3	520	1127	54
058	3 in.	300.44	1265	597726	332000	3	396	958	59
067	4 in.	517.56	1265	597726	332000	2	882	1211	27
069	4 in.	347.48	1265	597726	332000	2	481	1239	61
071	4 in.	437.78	1265	597726	332000	2	673	1260	47
079	6 in.	674.64	1265	597726	332000	0	1449	1954	26
081	6 in.	681.85	1265	597726	332000	0	1483	1699	13

Σχ.6.42 Πίνακας υπολογισμού των δυστενιών από την κλίση των καμπυλών (φορτίου – μετακίνηση εμβόλου) και σύγκριση με την πραγματική δυστένια όπως προέκυψε από τα strain gauges

Από τον πίνακα του σχήματος 6.42 προκύπτουν σημαντικές αποκλίσεις της υπολογισμένης δυστένειας σε σχέση με την πραγματική. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στη συμπεριφορά του “καπελώματος”. Είναι όμως η συμπεριφορά αυτή γραμμική;

Προκειμένου να βρεθεί εάν προκύψουν σημαντικά βελτιωμένες τιμές της δυστένειας θα συνυπολογιστεί και η πιθανή γραμμική επιρροή του “καπελώματος”. Το πάχος του “καπελώματος” έχει μετρηθεί χονδρικά με την βοήθεια ενός χάρακα. Θεωρώντας ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξεως των 15GPa θα υπολογιστεί η δυστένεια των “καπελωμάτων”. Η υπολογισμένη δυστένεια των δοκιμών και οι αποκλίσεις της από την πραγματική τιμή προκύπτουν ως εξής:

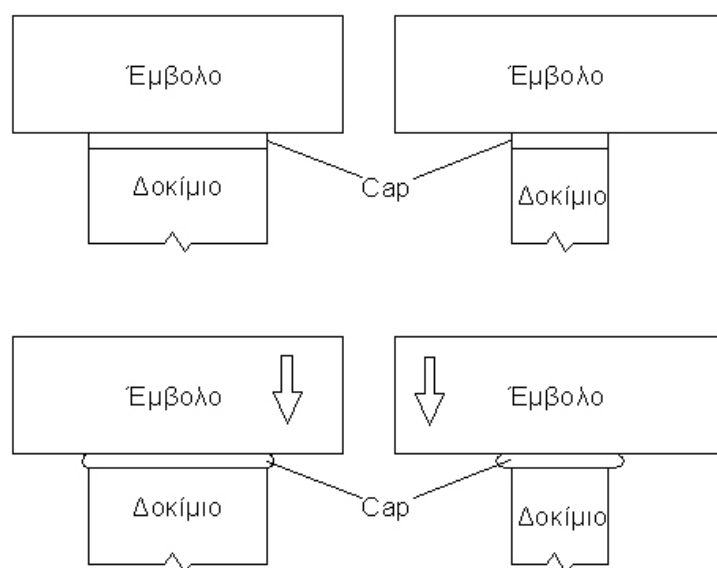
Δοκίμιο	Διάμετρο	Συνολικό Πάχος Capping (mm)	Δυστένεια Capping kN/mm	Υπολογισμένη Δυστένεια kN/mm	Πραγματική Δυστένεια kN/mm	Σφάλμα %
001	3 in.	10	6841	212	1409	85
002	3 in.	5,1	13413	353	1287	73
003	3 in.	8	8551	471	897	48
007	3 in.	11	6219	581	1012	43
015	4 in.	7,8	15591	469	1333	65
016	4 in.	6,8	17884	778	1213	36
019	4 in.	10,8	11260	835	2250	63
020	4 in.	9,8	12409	851	1416	40
035	6 in.	7,7	35535	2000	1616	-24
037	6 in.	11,2	24431	2176	1957	-11
044	2 in.	7,0	4292	241	722	67
046	2 in.	6,5	4622	241	754	68
055	3 in.	5,0	13431	457	887	48
057	3 in.	7,0	9593	550	1127	51
058	3 in.	6,8	9949	412	958	57
067	4 in.	6,3	19228	924	1211	24
069	4 in.	5,0	24036	491	1239	60
071	4 in.	6,5	18489	698	1260	45
079	6 in.	6,75	40059	1503	1954	23
081	6 in.	6,75	40059	1540	1699	9

Σχ.6.43 Πίνακας υπολογισμού των δυστενιών των δοκιμών συνυπολογίζοντας και την γραμμική συμπεριφορά των capping

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι τα σφάλματα παραμένουν σημαντικά παρόλο τον συνυπολογισμό της δυστένειας του “καπελώματος” επειδή είναι σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με αυτή των δοκιμών. Με αποτέλεσμα πράγματι ο συνυπολογισμός τους να μην επηρεάζει ιδιαίτερα το τελικό αποτέλεσμα. Τα σφάλματα που παρατηρούνται οφείλονται στην πιθανή μη-γραμμική επίδραση του “καπελώματος” το οποίο αστοχεί από νωρίς και παραμορφώνεται σημαντικά. Συμπεριφέρονται περισσότερο σαν μη-γραμμικό ελαστικό

παρά σαν ένα στερεό σώμα με αρχική γραμμική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά του αυτή βέβαια δεν επηρεάζει το τελικό μέγιστο φορτίο στο οποίο αστόχησαν τα δοκίμια.

Παράγοντας που οδήγησε στη συμπεριφορά αυτή φαίνεται να είναι το ότι η δοκιμή θλίψης στα “κατελωμένα” δοκίμια τρεις με έξι μέρες μετά το “κατέλωμά” τους. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το “κατέλωμα” πιθανώς δεν είχε την ευκαιρία να αποκτήσει επαρκή αντοχή κατά την μικρή χρονική περίοδο μεταξύ της κατασκευής του και της δοκιμής. Έτσι θα ανέμενε κανείς να υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση των *capping* στα μικρότερα δοκίμια. Αυτό τελικά συμβαίνει, γιατί τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα για τα μικρότερα δοκίμια και μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των δοκιμίων.



Σχ.6.44 Η συμπεριφορά του “κατελώματος” σε μικρά και μεγάλα δοκίμια
Στα μικρότερα δοκίμια υπάρχει αυξημένη πλευρική διόγκωση παράλληλα με την σύνθλιψη των “κατελωμάτων”.

Το πάχος του “κατελώματος” είναι περίπου ίδιο για όλα τα μεγέθη των δοκιμίων (5 – 10 mm) . Συγκριτικά όμως με το ύψος του εκάστοτε δοκιμίου, το πάχος του “κατελώματος” είναι μεγαλύτερο για τα μικρότερα δοκίμια σε σχέση με τα μεγαλύτερα δοκίμια. Τα μικρότερα δοκίμια έχουν και μικρότερη επιφάνεια. Έτσι ενώ το απόλυτο ύψος του “κατελώματος” είναι περίπου ίδιο μεταξύ δύο δοκιμίων διαφορετικού μεγέθους, εξαιτίας της μικρότερης επιφάνειας στο μικρότερο δοκίμιο το “κατέλωμα” τείνει κάτω από την ίδια πίεση να υποχωρήσει περισσότερο. Με αποτέλεσμα η παραμορφωσιμότητα του συστήματος δοκίμιο – cap να είναι μεγαλύτερη στα μικρότερα δοκίμια λόγω εντονότερης πλευρικής διόγκωσης.

Το παραπάνω όμως φαινόμενο είναι μη γραμμικό και η ύπαρξή του μπορεί να αποδειχθεί από τον ανάστροφο υπολογισμό της μικτής δυστενίας. Υπολογίζοντας από την πραγματική δυστενία μπορούμε να καταλήξουμε στη μικτή τιμή της. Εάν η υπολογισμένη τιμή είναι μεγαλύτερη από την παρατηρούμενη από το διάγραμμα τότε η

παραμορφωσιμότητα του συστήματος είναι πράγματι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του “καπελώματος” είναι η καλύτερη πιθανή εξήγηση του φαινομένου. Στον υπολογισμό αυτόν δεν θα υπολογιστεί καμία γραμμική επίδραση των “καπελωμάτων”:

Δοκίμιο	Διάμετρο	Πραγματική Δυστένεια δοκιμίου kN/mm	Υπολογισμένη Μικτή Δυστένεια kN/mm	Από διαγράμματα Μικτή Δυστένεια kN/mm	Σφάλμα %	Συντελεστής Πολλαπλασιασμού
001	3in.	1409	662	176.72	275	3,75
002	3 in.	1287	634	269.92	135	2,35
003	3 in.	897	522	328.66	59	1,59
007	3 in.	1012	559	372.57	50	1,50
015	4 in.	1333	646	333.94	93	1,93
016	4 in.	1213	616	467.27	32	1,32
019	4 in.	2250	805	479.67	68	1,68
020	4 in.	1416	665	486.80	37	1,37
035	6 in.	1616	709	757.48	-6	0,94
037	6 in.	1957	767	773.58	-1	0,99
044	2 in.	722	455	192.68	136	2,36
046	2 in.	754	468	192.84	143	2,43
055	3 in.	887	518	326.21	59	1,59
057	3 in.	1127	592	367.00	61	1,61
058	3 in.	958	542	300.44	80	1,80
067	4 in.	1211	616	517.56	19	1,19
069	4 in.	1239	623	347.48	79	1,79
071	4 in.	1260	628	437.78	43	1,43
079	6 in.	1954	767	674.64	14	1,14
081	6 in.	1699	724	681.85	6	1,06

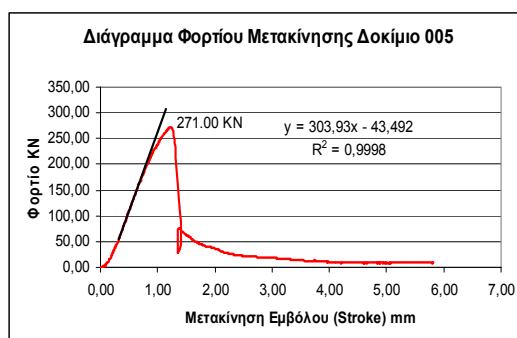
Σχ.6.45 Πίνακας ανάστροφου υπολογισμού μικτής δυστένειας

Παρατηρούμε ότι για όλα τα μεγέθη δοκιμίων, εκτός από τα μεγαλύτερα σε μέγεθος δοκίμια με διάμετρο 6 ιντσών της πρώτης σειράς, προκύπτει ότι ο ανάστροφος υπολογισμός της μικτής δυστένειας οδηγεί σε τιμές μεγαλύτερες από τις παρατηρούμενες. Επομένως υπήρχε πράγματι μη-γραμμική επίδραση του “καπελώματος” στην μικτή δυστένεια. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στον παραπάνω πίνακα αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος του δοκιμίου. Μόνο τα δοκίμια με διάμετρο 6 ιντσών προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματική τιμή.

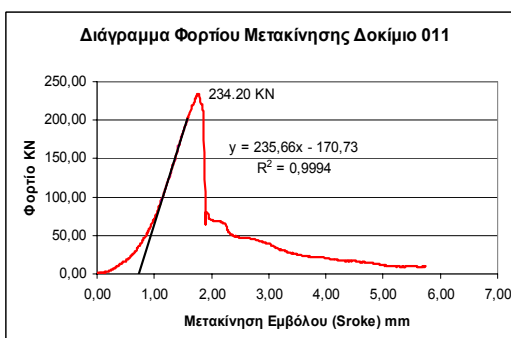
Η ύπαρξη όμως των φαινομένων αυτών οδηγεί στην μη ορθή εξαγωγή των μέτρων ελαστικότητας από τα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του “καπελώματος” δεν μπορεί να προβλεφθεί από την γραμμική θεωρία. Μπορούμε μόνο να διορθώσουμε την κλίση των διαγραμμάτων με βάση τις παραπάνω αποκλίσεις. Έτσι θα μπορεί να εκτιμηθεί ένα μέτρο ελαστικότητας το

οποίο μπορεί να δώσει πληροφορίες για την περιοχή διακύμανσης της πραγματικής τιμής. Η διόρθωση των κλίσεων θα γίνει με τον μέσον όρο των συντελεστών διόρθωσης ανά μέγεθος δοκιμίων.

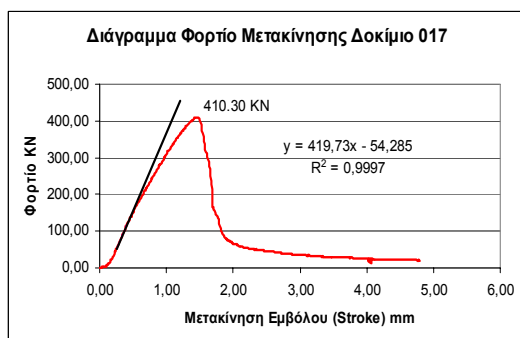
Παρακάτω στα σχήματα (6.46 – 6.67) παρουσιάζονται όλα τα υπόλοιπα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου από τα οποία μπορεί να εξαχθεί η κλίση τους. Δεν συμπεριλαμβάνονται τα δοκίμια 004, 006, 028, 038 και 039 των οποίων τα διαγράμματα είναι αλλοιωμένα υπερβολικά εξαιτίας της επίδρασης του “καπελώματος”. Συμπεριλαμβάνονται μόνο τα δοκίμια της θλίψης.



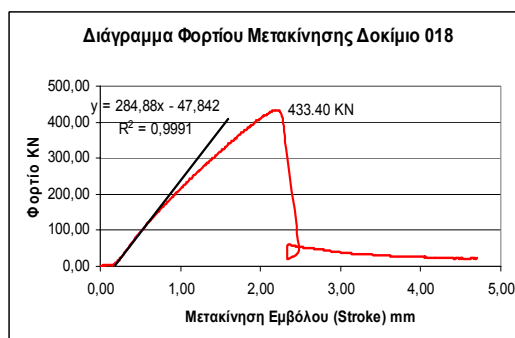
Σχ.6.46 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 005
Αρχική κλίση καμπύλης = 303.93kN/mm



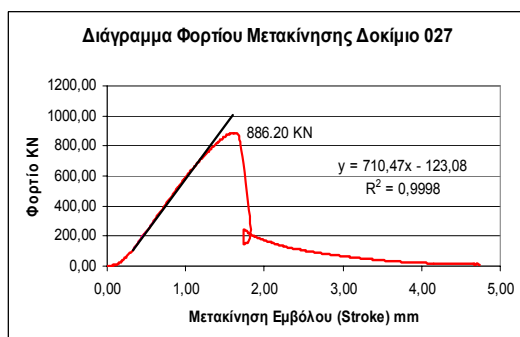
Σχ.6.47 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 011
Αρχική κλίση καμπύλης = 235.66kN/mm



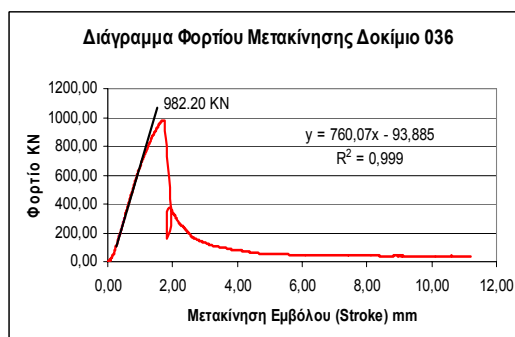
Σχ.6.48 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 017
Αρχική κλίση καμπύλης = 419.73kN/mm



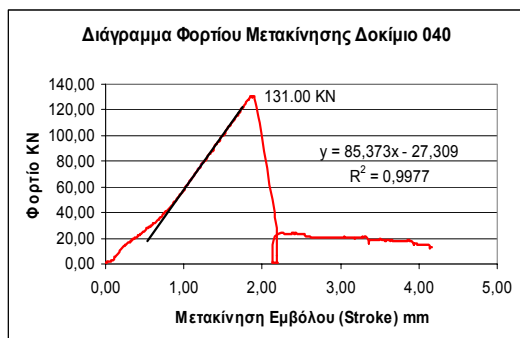
Σχ.6.49 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 018
Αρχική κλίση καμπύλης = 284.88kN/mm



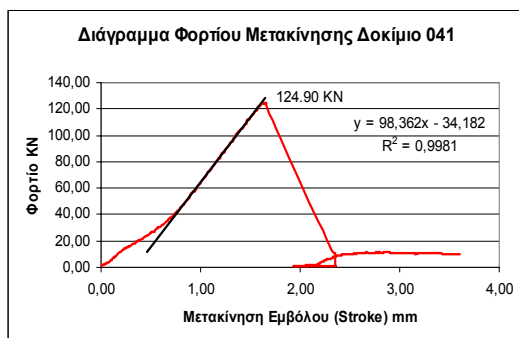
Σχ.6.50 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 027
Αρχική κλίση καμπύλης = 710.47kN/mm



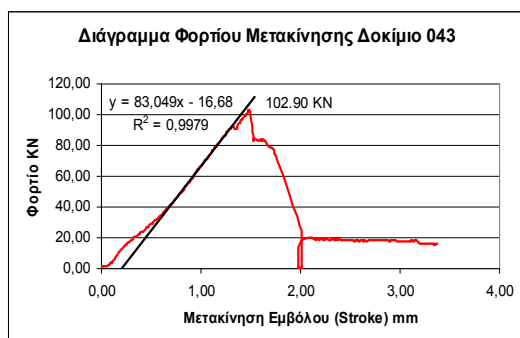
Σχ.6.51 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 036
Αρχική κλίση καμπύλης = 760.07kN/mm



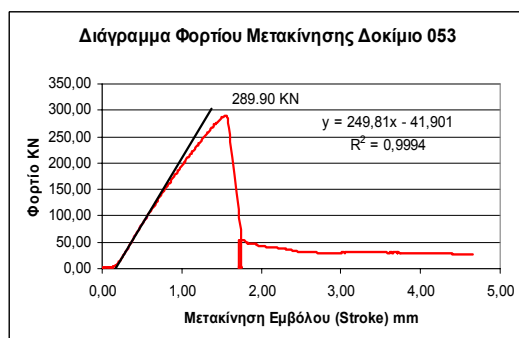
Σχ.6.52 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 040
Κλίση καμπύλης = 85.373kN/mm



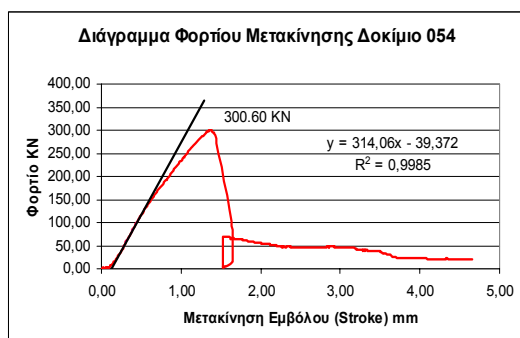
Σχ.6.53 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 041
Κλίση καμπύλης = 98.362kN/mm



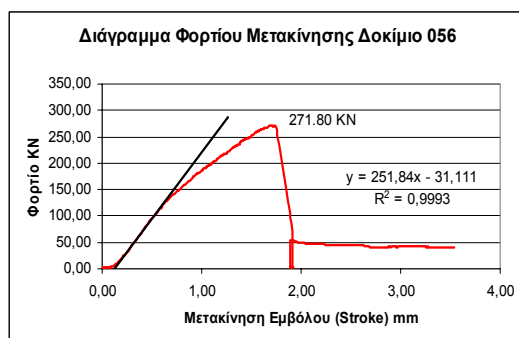
Σχ.6.54 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 043
Κλίση καμπύλης = 83.049kN/mm



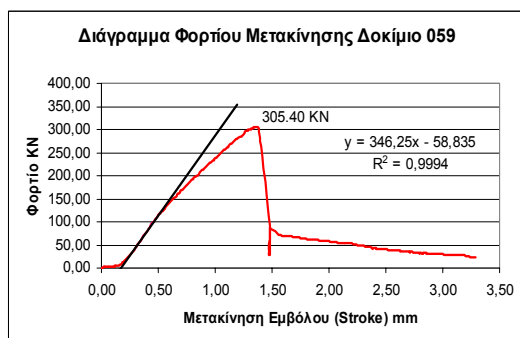
Σχ.6.55 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 053
Κλίση καμπύλης = 249.81kN/mm



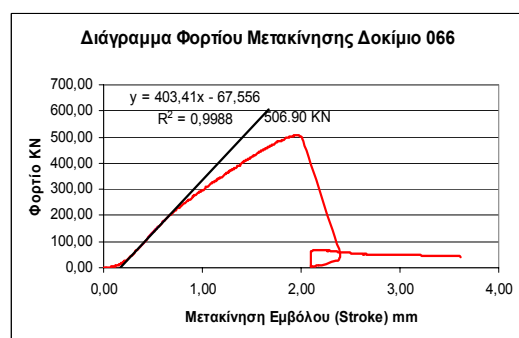
Σχ.6.56 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 054
Κλίση καμπύλης = 314.06kN/mm



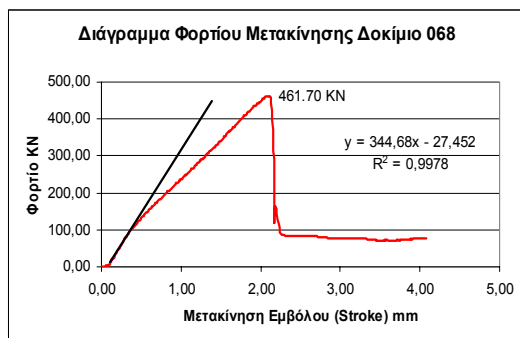
Σχ.6.57 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 056
Κλίση καμπύλης = 251.84kN/mm



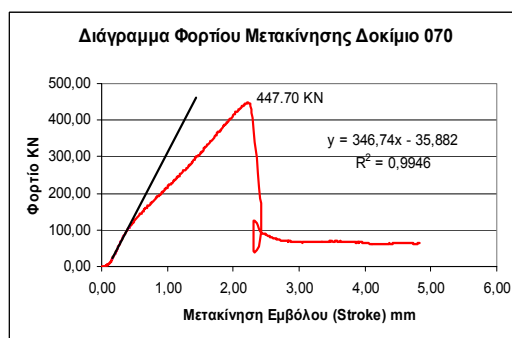
Σχ.6.58 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 059
Κλίση καμπύλης = 346.25kN/mm



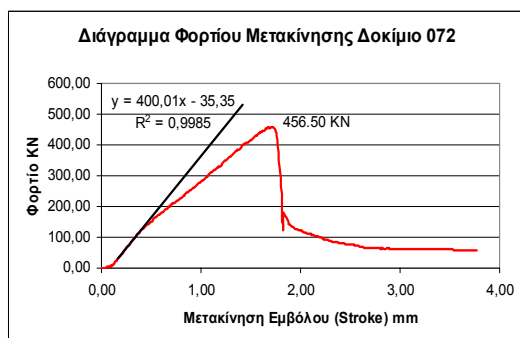
Σχ.6.59 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 066
Κλίση καμπύλης = 403.41kN/mm



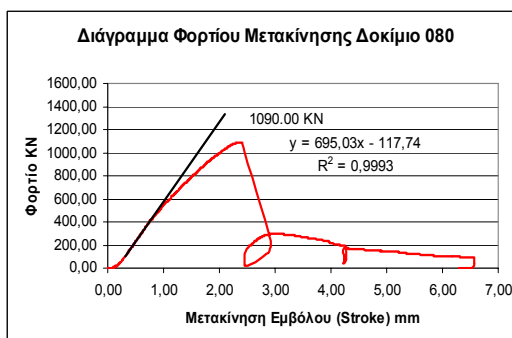
Σχ.6.60 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 068
Κλίση καμπύλης = 344.68kN/mm



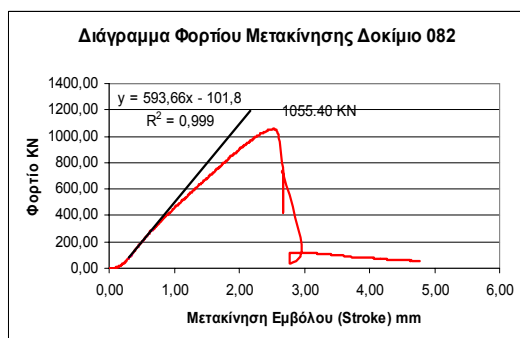
Σχ.6.61 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 070
Κλίση καμπύλης = 346.74kN/mm



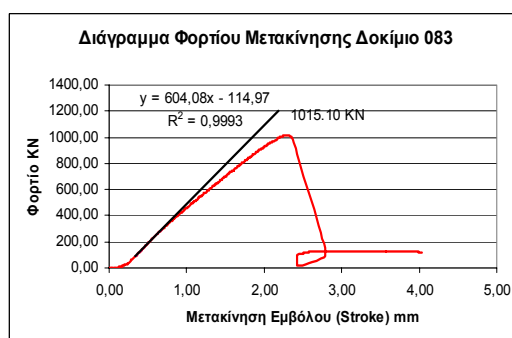
Σχ.6.62 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 072
Κλίση καμπύλης = 400.01kN/mm



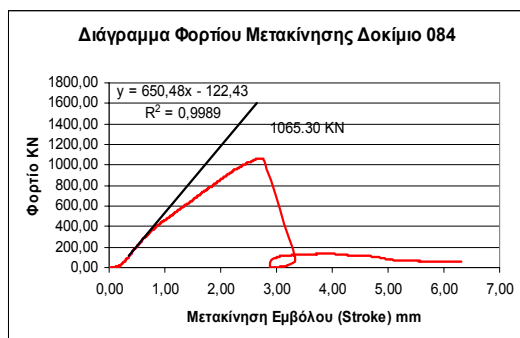
Σχ.6.63 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 080
Κλίση καμπύλης = 695.03kN/mm



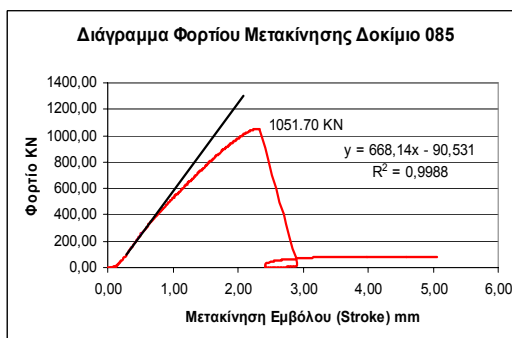
Σχ.6.64 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 082
Κλίση καμπύλης = 593.66kN/mm



Σχ.6.65 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 083
Κλίση καμπύλης = 604.08kN/mm



Σχ.6.66 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 084
Κλίση καμπύλης = 650.48kN/mm



Σχ.6.67 Διάγραμμα Φορτίου-Μετακίνησης Δοκίμιου 085
Κλίση καμπύλης = 668.14kN/mm

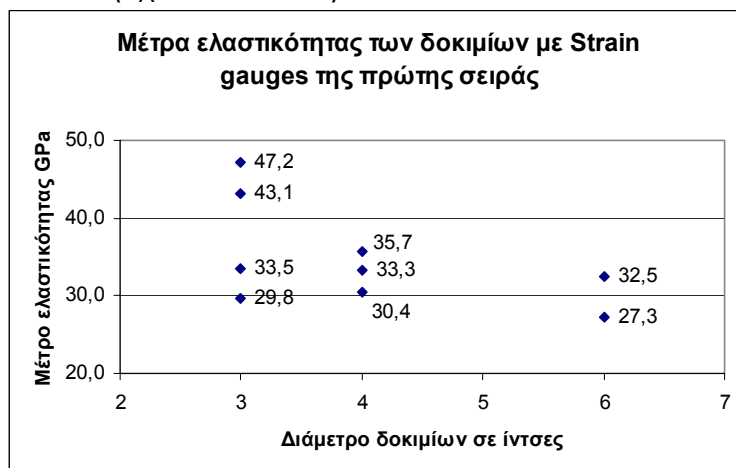
Δοκίμιο	Διάμετρος	Από διαγράμματα Μικτή Δυστένια kN/mm	Συντελεστής Πολλαπλασιασμού	Διορθωμένη Μικτή Δυστένια kN/mm	Υπολογισμένη Δυστένια δοκιμίου kN/mm	Ε δοκίμιο GPa
001	3in.	176.72	3,75	663	1413	47,2
002	3 in.	269.92	2,35	634	1290	43,1
003	3 in.	328.66	1,59	523	899	29,8
005	3 in.	303.93	1,813	551	987	33,0
007	3 in.	372.57	1,5	559	1012	33,5
011	3 in.	235.66	1,813	427	650	21,7
015	4 in.	333.94	1,93	645	1327	33,3
016	4 in.	467.27	1,32	617	1215	30,4
017	4 in.	419.73	1,575	661	1400	35,1
018	4 in.	284.88	1,575	449	699	17,5
019	4 in.	479.67	1,68	806	2259	56,6
020	4 in.	486.80	1,37	667	1426	35,7
027	6 in.	710.47	1	710	1625	27,2
035	6 in.	757.48	0,94	712	1633	27,3
036	6 in.	760.07	1	760	1910	31,9
037	6 in.	773.58	0,99	766	1947	32,5
040	2 in.	85.373	2,395	204	245	12,5
041	2 in.	98.362	2,395	236	291	14,8
043	2 in.	83.049	2,395	199	237	12,0
044	2 in.	192.68	2,36	455	721	36,3
046	2 in.	192.84	2,43	469	756	38,3
053	3 in.	249.81	1,636	409	608	20,8
054	3 in.	314.06	1,636	514	873	29,7
055	3 in.	326.21	1,59	519	887	30,5
056	3 in.	251.84	1,636	412	615	20,9
057	3 in.	367.00	1,61	591	1122	38,3
058	3 in.	300.44	1,8	541	954	32,7
059	3in.	346.25	1,636	566	1037	35,3
066	4 in.	403.41	1,47	593	1126	28,7
067	4 in.	517.56	1,19	616	1211	30,8
068	4 in.	344.68	1,47	507	851	21,7
069	4 in.	347.48	1,79	622	1235	31,6
070	4 in.	346.74	1,47	510	859	21,8
071	4 in.	437.78	1,43	626	1251	31,8
072	4 in.	400.01	1,47	588	1108	28,3
079	6 in.	674.64	1,14	769	1968	33,4
080	6 in.	695.03	1,1	765	1939	33,1
081	6 in.	681.85	1,06	723	1691	28,6
082	6 in.	593.66	1,1	653	1353	22,9
083	6 in.	604.08	1,1	664	1403	23,8
084	6 in.	650.48	1,1	716	1652	28,0
085	6 in.	668.14	1,1	735	1759	29,7

Σχ.6.68 Πίνακας υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών μέσω της διόρθωσης της μικτής δυστενίας.
 Η μικτή δυστένια διορθώθηκε χρησιμοποιώντας την μέση τιμή των συντελεστών πολλαπλασιασμού ανά μέγεθος δοκιμών ανά σειρά.
 (Σε **bold** είναι τα δοκίμια με **strain gauges**.)

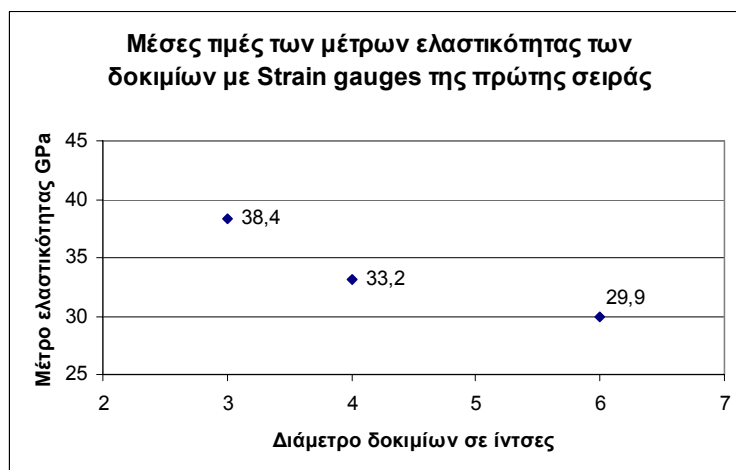
Από την συγκεκριμένη μεθοδολογία προκύπτουν προσεγγιστικά μέτρα ελαστικότητας. Υπολογίστηκαν με βάση το μέσο όρο διόρθωσης της μικτής δυστένισης των δοκιμίων των οποίων το μέτρο ελαστικότητας είναι δυνατόν να το υπολογίσουμε με βάση τις μετρήσεις των ανηγμένων παραμορφώσεων από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Αποτελούν τιμές πλησίον της πραγματικής και υπολογίστηκαν για καθαρά εποπτικούς σκοπούς. Η πραγματική τιμή είναι άγνωστη και δεν μπορεί να εξαχθεί με ακρίβεια από την κλίση των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης εμβόλου εξαιτίας της μη - γραμμικής συμπεριφοράς του “καπελώματος”.

Η παραπάνω μεθοδολογία παρήγαγε λογικές τιμές εκτός από τα δοκίμια 018, 040, 041 και 043. Στα δοκίμια αυτά η κλίση των διαγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του διορθωτικού συντελεστή διαφέρει σημαντικά από την κλίση των διαγραμμάτων των προαναφερθέντων δοκιμίων. Επίσης το δοκίμιο 019 είχε μέτρο ελαστικότητας αρκετά υψηλότερο από τα λοιπά δοκίμια του ίδιου μεγέθους και της ίδιας σειράς. Τα δοκίμια αυτά δεν θα συμπεριληφθούν (στατιστικός αποκλεισμός) στα παρακάτω διαγράμματα (Σχ. 6.69 - 6.76).

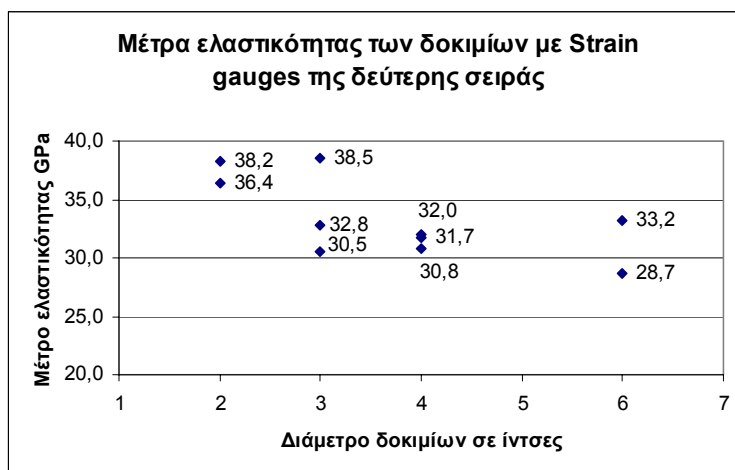
Τα εκτιμηθέντα και μετρηθέντα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων είναι τα ακόλουθα (Σχ. 6.69 – 6.79):



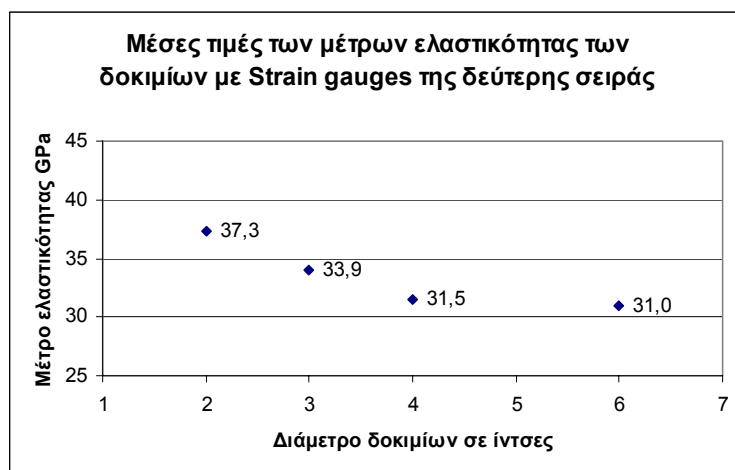
Σχ.6.69 Μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων της πρώτης σειράς με βάση τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα



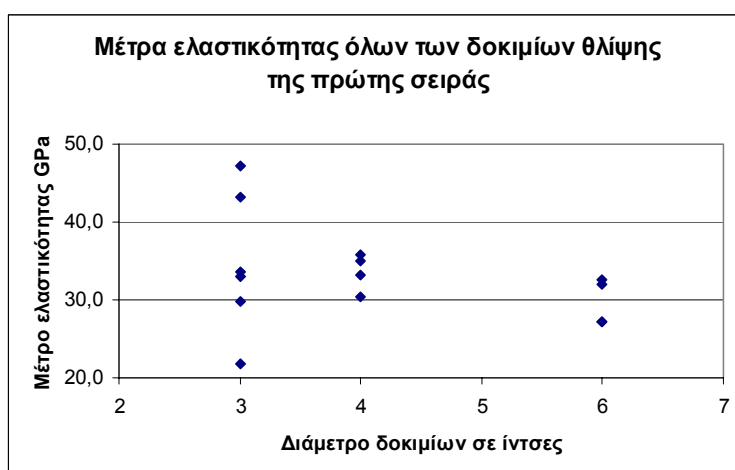
Σχ.6.70 Μέση τιμή μέτρων ελαστικότητας των δοκιμίων θλίψης της πρώτης σειράς με βάση τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα



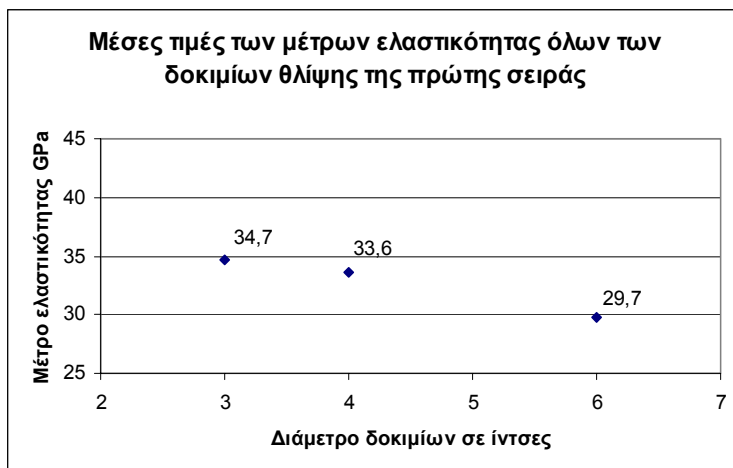
Σχ.6.71 Μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών της δεύτερης σειράς με βάση τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα



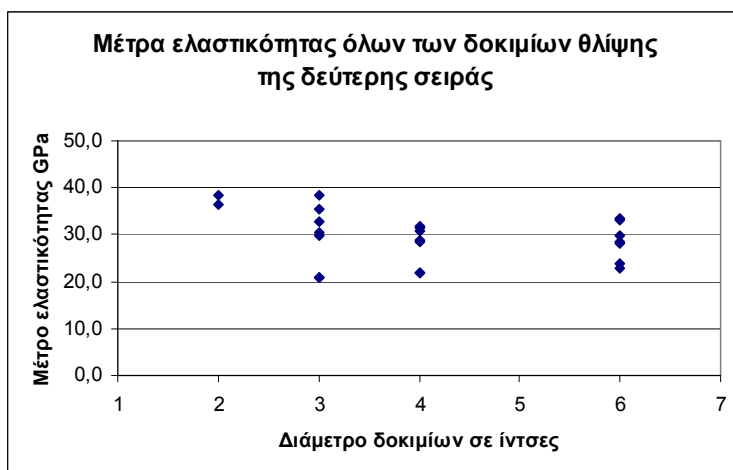
Σχ.6.72 Μέση τιμή μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών της δεύτερης σειράς με βάση τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα



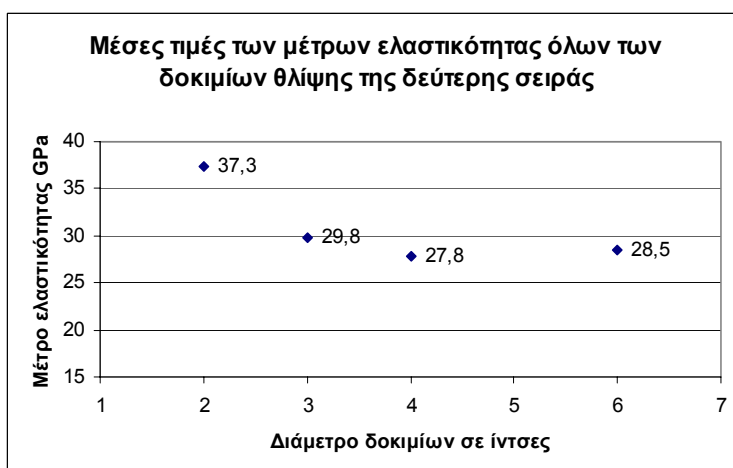
Σχ.6.73 Μετρηθέντα και εκτιμηθέντα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών θλίψης της πρώτης σειράς.



Σχ.6.74 Μέση τιμή των μετρηθέντων και εκτιμηθέντων μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών θλίψης της πρώτης σειράς



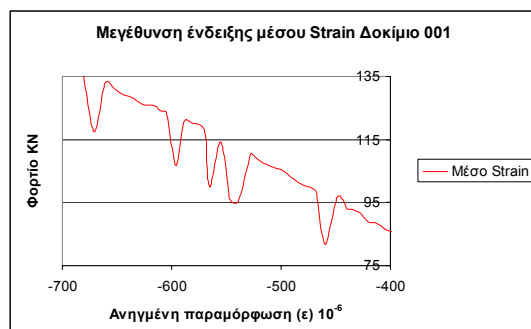
Σχ.6.75 Μετρηθέντα και εκτιμηθέντα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών θλίψης της δεύτερης σειράς



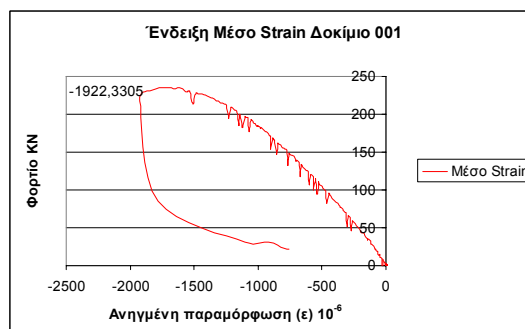
Σχ.6.76 Μέση τιμή των μετρηθέντων και εκτιμηθέντων μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών θλίψης της δεύτερης σειράς

6.7 Οι παρεμβολές στις μετρήσεις των strain gauges

Το ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα του φορτίου της πρέσας επηρεάστηκε από ηλεκτρονικές παρεμβολές (noise). Αποτέλεσμα ήταν η εμφάνιση ηλεκτρικής διακυμάνσης στο σήμα που εμφανίζεται στα διαγράμματα με τη μορφή μικρών ακίδων. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι τυχαίες και δεν επηρεάζουν το γενικότερο σχήμα της καμπύλης.

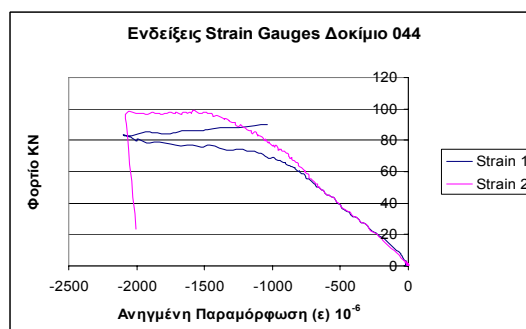


Σχ.6.77 Μεγέθυνση των "ακίδων" στο ηλεκτρικό σήμα του δοκιμίου 001

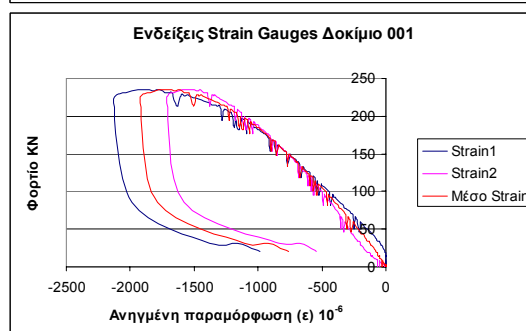


Σχ.6.78 Συνολική εικόνα του ηλεκτρικού σήματος του δοκιμίου 001

Στο δοκίμιο 044 το ένα από τα δύο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα αστόχησε πριν από την αστοχία του δοκιμίου. Η αστοχία του strain gauge έγινε εξαιτίας της αποκόλλησής του από το δοκίμιο. Στην περίπτωση αυτή η καταγραφή του συγκεκριμένου strain gauge πριν από την αποκόλληση του είναι σωστή και επομένως συνυπολογίζεται στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας.



Σχ.6.79 Τα δύο strain gauges του δοκιμίου 044 και η αστοχία του ενός πριν από το άλλο.

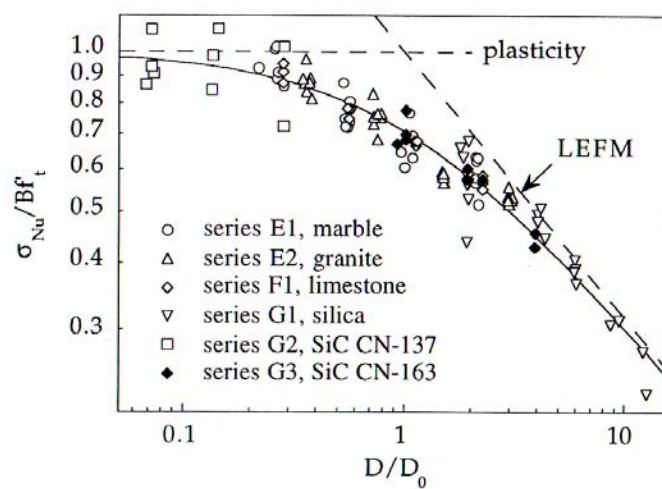


Σχ.6.80 Ο φθίνοντας κλάδος των διαγραμμάτων έχει διαφορετική κλίση από τον ανιόντα.

Ο φθίνοντας κλάδος των διαγραμμάτων φορτίου – ανηγμένης παραμόρφωσης δεν έχει την ίδια κλίση με τον ανιόντα κλάδο. Αυτό οφείλεται στο λόγο ότι τα strain gauges ήταν τοποθετημένα επιφανειακά στα δοκίμια. Όταν αστοχούσε το δοκίμιο αστοχούσε και επιφανειακός φλοιός πάνω στον οποίον ήταν τοποθετημένο το strain gauges. Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα έπαυαν μετά την αστοχία του υλικού να καταγράφουν την συμπεριφορά του υλικού.

Κεφάλαιο 7

Ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων



Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και γίνεται ανάλυση και σύγκρισή τους με βάση τους δύο επικρατέστερους νόμους των φαινομένων κλίμακας

7. Ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

7.1 Εισαγωγή

Η επιστήμη προσπαθεί να αποκρυπτογραφήσει της ιδιότητες της ύλης και να μελετήσει τρόπους για τη χρήση διαφόρων υλικών σε οικοδομικά έργα. Η ύλη ως τμήμα της φύσης απαντάται σε διάφορες μορφές. Οι εφευρετικότητα του ανθρώπου οδήγησε σε ανακαλύψεις για την καλύτερη χρήση των υλικών καθώς και τη σύνθεση νέων. Ένα τέτοιο συνθετικό υλικό αποτελεί και το σκυρόδεμα. Όπως και για όλα τα υλικά οι ιδιότητες του σκυροδέματος δεν ήταν γνωστές χωρίς συστηματική μελέτη και ανάλυση. Ο μόνος τρόπος για την απόκτηση πληροφοριών για τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των οικοδομικών υλικών είναι η πειραματική διερεύνηση. Τα πειραματικά αποτελέσματα βάζουν την εικόνα της πραγματικής φύσης της συμπεριφοράς της ύλης. Το μόνο που μένει για έναν αναλυτή είναι η εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων από τα δεδομένα αυτά και η ένταξή τους μέσα σε μία μαθηματική έκφραση. Εξάλλου η μόνη κοινή γλώσσα του σύμπαντος είναι τα μαθηματικά.

Η ανθρώπινη γνώση για την ύλη δεν αποκτήθηκε εύκολα. Μόνο μετά από χιλετίες προσπαθειών και τη συστηματική πειραματική διερεύνηση των τελευταίων αιώνων μπόρεσε η ανθρώπινη γνώση να φτάσει στο σημερινό σημείο. Η γνώση σήμερα αυξάνεται πλέον με γεωμετρική πρόοδο σε αντίθεση με τον παλαιότερο αργό ρυθμό. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι ποτέ άλλοτε στην ιστορία δεν έχει υπάρξει τόσο οργανωμένο θεσμικό πλαίσιο για την προώθηση της έρευνας. Εκατοντάδες χιλιάδες ερευνητές σε ολόκληρο τον κόσμο σε δεκάδες χιλιάδες εργαστήρια σε πανεπιστήμια και ινστιτούτα αναπτύσσουν θεωρίες και τις ελέγχουν πειραματικά είτε για την προώθηση της ανθρώπινης γνώσης είτε για λόγους συμφέροντος.

Τα πειραματικά δεδομένα όμως πρέπει να αναλυθούν σωστά προκειμένου να βοηθήσουν στην πρόοδο της γνώσης. Επίσης πρέπει να επιβεβαιωθούν από πολλές πηγές προκειμένου να εδραιωθεί η ορθότητά τους. Πολλές φορές περνάνε χρόνια προκειμένου να εξηγηθούν και να ενταχθούν μέσα σε μία γενικότερη θεωρία.

Παρακάτω θα παρατεθούν τα συγκεντρωμένα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν μέσα στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος. Επίσης θα υπάρξει μία ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με υπάρχουσες θεωρίες καθώς και διατύπωση μιας συμπληρωματικής. Μακάρι οι επόμενες γενιές να στηριχτούν πάνω σε αυτή τη μικρή και ταπεινή προσπάθεια και να μη διστάσουν ακόμη και να τη διορθώσουν για να προωθήσουν περισσότερο την ανθρώπινη γνώση.

7.2 Η ταυτότητα της πειραματικής έρευνας

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης κεντρικής θλίψης (unconfined uniaxial compression tests) και δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian tests) σε γεωμετρικά όμοια δοκίμια σκυροδέματος διαφορετικού μεγέθους με σκοπό τη διερεύνηση και ερμηνεία των φαινομένων κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Τα δοκίμια όπως προαναφέρεται σε προηγούμενα κεφάλαια ήταν κυλινδρικά. Υπήρχαν δύο σειρές κυλίνδρων η κάθε μία με μίγμα σκυροδέματος διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Το εύρος της κλίμακας δεν ήταν πολύ μεγάλο για πρακτικούς λόγους. Υπήρχαν τρία μεγέθη κυλίνδρων στη πρώτη σειρά και τέσσερα διαφορετικά μεγέθη στη δεύτερη.

7.3 Το ειδικό βάρος

Όπως αναγράφεται στο τέταρτο κεφάλαιο όλα τα κυλινδρικά δοκίμια ζυγίστηκαν και μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους. Από τα δεδομένα αυτά προέκυψε το ειδικό βάρος του εκάστοτε δοκιμίου. Το βάρος και οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου αναγράφεται στον πίνακα της παραγράφου 4.12. Παρακάτω, στα σχήματα 7.1 και 7.2 αναγράφεται το ειδικό βάρος του κάθε δοκιμίου. Επίσης στα σχήματα 7.3 και 7.4 παρουσιάζονται γραφικά οι διακυμάνσεις του ειδικού βάρους για τις δύο σειρές.

Δοκίμια	Ειδικό Βάρος (Kg/m ³)	Δοκίμια	Ειδικό Βάρος (Kg/m ³)
001	2323,74	021	2364,11
002	2316,55	022	2349,46
003	2323,50	023	2340,28
004	2309,35	024	2353,22
005	2323,74	025	2342,97
006	2309,35	026	2347,13
007	2330,76	027	2294,36
008	2350,35	028	2292,27
009	2327,63	029	2347,17
010	2343,15	030	2320,79
011	2302,16	031	2309,50
012	2365,05	032	2309,16
013	2357,75	033	2334,35
014	2318,80	034	2338,59
015	2330,94	035	2294,96
016	2330,94	036	2307,55
017	2327,90	037	2300,36
018	2346,11	038	2286,87
019	2337,01	039	2308,45
020	2327,90		

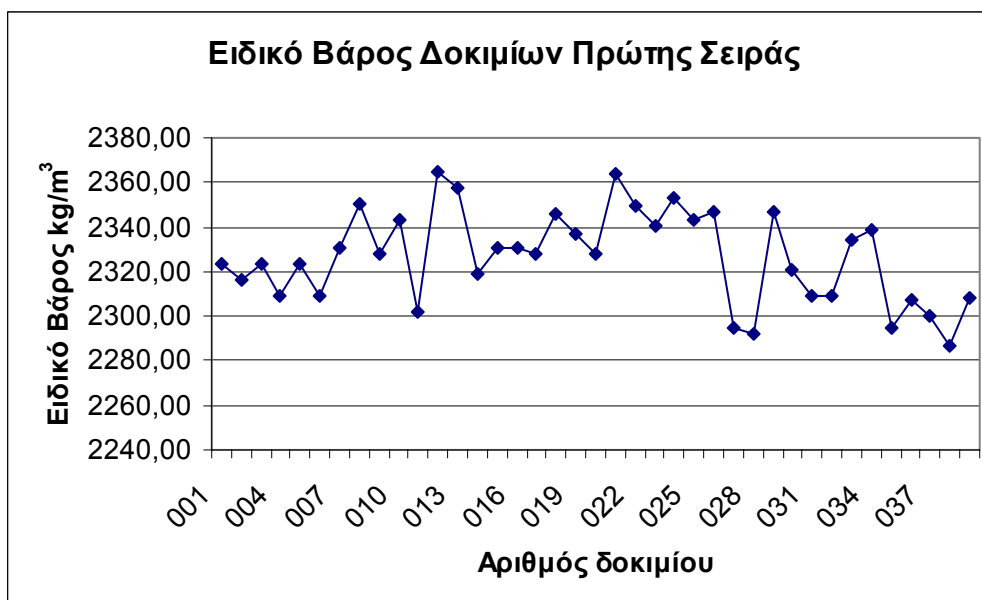
Σχ. 7.1 Πίνακας ειδικού βάρους πρώτης σειράς δοκιμίων

Δοκίμια	Ειδικό Βάρος (Kg/m ³)	Δοκίμια	Ειδικό Βάρος (Kg/m ³)
040	2349,46	066	2315,81
041	2361,04	067	2321,72
042	2324,99	068	2319,30
043	2397,44	069	2322,78
044	2323,29	070	2327,63
045	2323,29	071	2318,43
046	2336,44	072	2316,47
047	2348,01	073	2309,23
048	2373,94	074	2313,65
049	2348,01	075	2325,41
050	2372,72	076	2321,72
051	2361,04	077	2312,75
052	2324,99	078	2319,30
053	2350,45	079	2291,39
054	2343,51	080	2319,57
055	2342,44	081	2289,99
056	2340,02	082	2289,87
057	2343,15	083	2314,27
058	2332,04	084	2306,21
059	2336,18	085	2298,31
060	2328,24	086	2299,83
061	2339,67	087	2287,14
062	2335,19	088	2306,18
063	2327,93	089	2281,17
064	2335,85	090	2301,07
065	2342,79	091	2301,75

Σχ. 7.2 Πίνακας ειδικού βάρους δεύτερης σειράς δοκιμίων

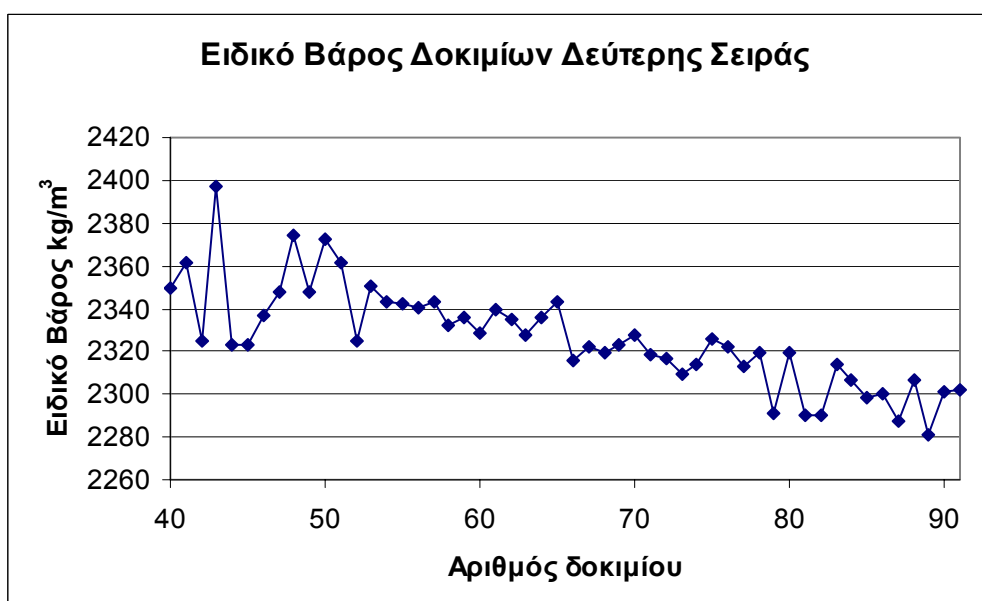
Το ειδικό βάρος αποτελεί ιδιότητα που παρουσιάζει διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές συνήθως είναι τυχαίες και χωρίς ιδιαίτερους λόγους. Η τάση που παρατηρείται όμως ως προς το ειδικό βάρος στα δοκίμια είναι ότι όσο μεγαλύτερο το δοκίμιο τόσο μικρότερο το ειδικό βάρος. Επίσης το δοκίμιο με το μικρότερο μέγεθος παρουσιάζει αύξηση. Βέβαια η διακύμανση αυτή είναι πολύ μικρή προσεγγίζοντας διαφορές της τάξεως του 5%. Η διακύμανση αυτή μπορεί κάλλιστα να είναι και τυχαία. Μάλιστα η μικρή διακύμανση που παρουσιάζει αποδεικνύει και την ομοιότητα της ύλης μεταξύ των διάφορων δοκιμίων. Πρόκειται δηλαδή για το ίδιο υλικό μεταξύ τα διάφορα μεγέθη των δοκιμίων. Απόπειρα εξήγησης της σημασίας αυτού του γεγονότος θα πραγματοποιηθεί παρακάτω.

Τιμή του μέσου ειδικού βάρους ανά μέγεθος δοκιμίου της πρώτης σειράς			
Τυπική διάσταση	D = 7.62 cm	D = 10.16 cm	D = 15.24 cm
Μέσο Ειδικό Βάρος	2329.47 kg/m ³	2339.75 kg/m ³	2311.11 kg/m ³



Σχ. 7.3 Διάγραμμα ειδικού βάρους πρώτης σειράς δοκιμών

Τιμή του μέσου ειδικού βάρους ανά μέγεθος δοκιμίου της δεύτερης σειράς				
Τυπική διάσταση	D = 5.08 cm	D = 7.62 cm	D = 10.16 cm	D = 15.24 cm
Μέσο Ειδικό Βάρος	2349.59 kg/m ³	2338.27 kg/m ³	2318.79 kg/m ³	2298.98 kg/m ³



Σχ. 7.4 Διάγραμμα ειδικού βάρους δεύτερης σειράς δοκιμών

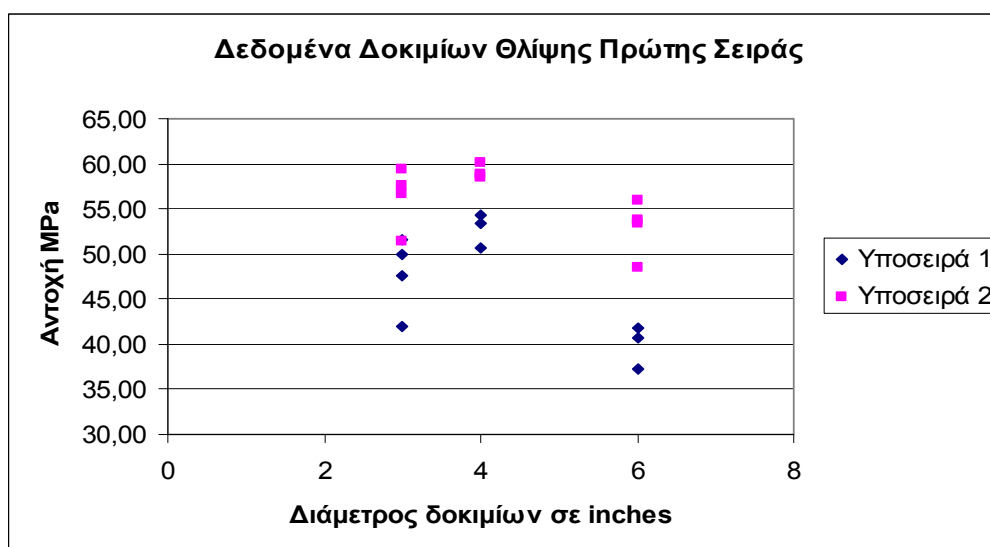
7.4 Αποτελέσματα αντοχής δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Ορισμένος αριθμός δοκιμών του εκάστοτε μεγέθους υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη. Η τιμή της μέγιστης αντοχής καταγράφηκε από αυτόματο σύστημα μετρήσεων. Συνολικά 51 δοκίμια υποβλήθηκαν σε θλίψη. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μονοαξονικής θλίψης.

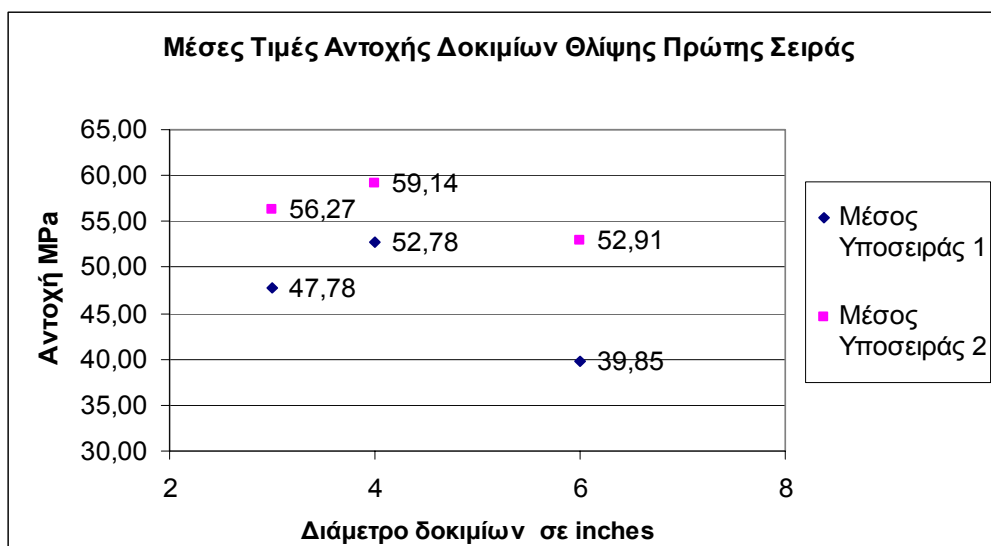
Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)
001	51,66	020	60,08	045	45,73	068	57,63
002	47,52	027	48,58	046	68,05	069	61,42
003	57,61	028	37,21	051	60,86	070	55,88
004	42,04	035	53,35	052	59,66	071	63,14
005	59,43	036	53,84	053	64,75	072	56,98
006	49,89	037	55,86	054	67,14	079	58,73
007	56,68	038	41,70	055	64,95	080	60,87
011	51,36	039	40,63	056	60,71	081	58,21
015	54,27	040	65,4	057	71,16	082	58,55
016	58,49	041	62,36	058	62,59	083	56,31
017	50,61	042	55,52	059	68,22	084	59,49
018	53,46	043	51,37	066	63,27	085	58,34
019	58,85	044	49,23	067	59,97		

Σχ. 7.5 Πίνακας τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

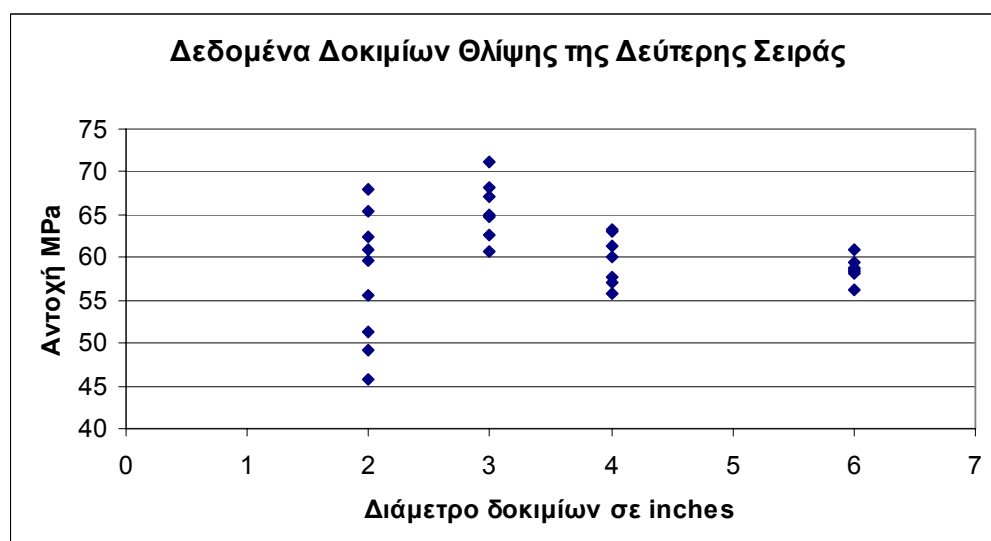
Η πρώτη σειρά χωρίστηκε σε δύο υποσειρές. Η πρώτη υποσειρά υποβλήθηκε σε θλίψη με έναν μήνα διαφορά από την δεύτερη λόγω των εορτών του Πάσχα που μεσολάβησαν. Ο λόγος που χωρίστηκαν είναι το γεγονός ότι παρουσιάστηκε διαφορά στην αντοχή της μίας υποσειράς από την άλλη περίπου κατά 30%.



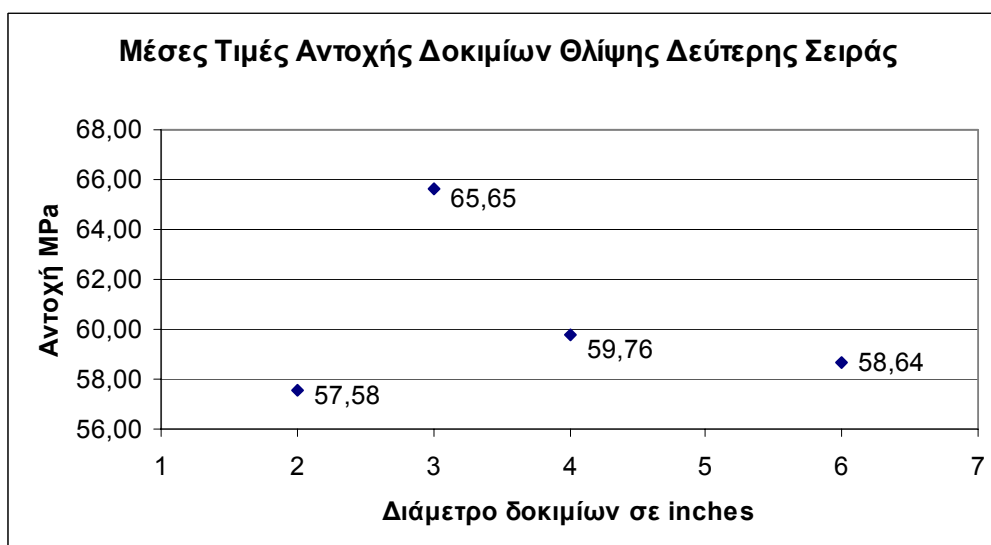
Σχ. 7.6 Διάγραμμα διασποράς των τιμών της θλιπτικής αντοχής της πρώτης σειράς δοκιμών



Σχ. 7.7 Διάγραμμα μέσης θλιπτικής αντοχής της πρώτης σειράς δοκιμίων



Σχ. 7.8 Διάγραμμα διασποράς των τιμών της θλιπτικής αντοχής της δεύτερης σειράς δοκιμίων



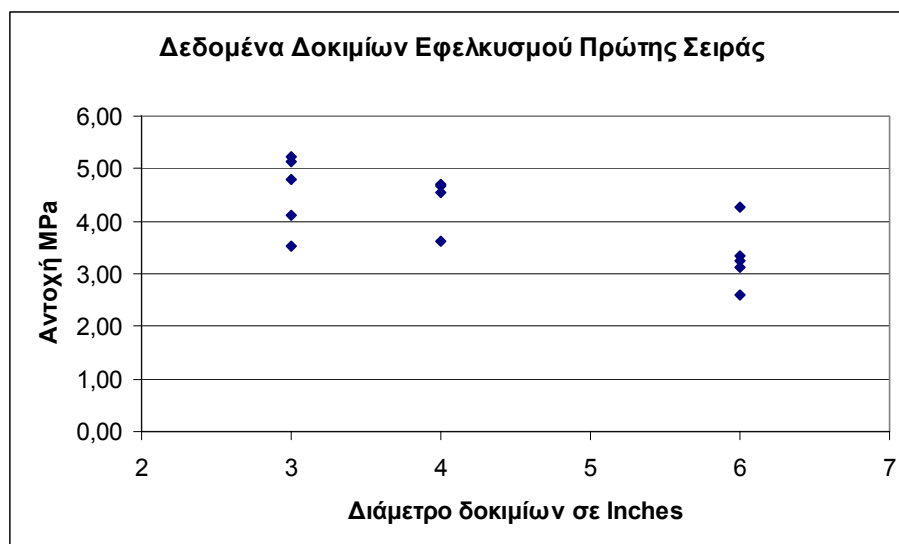
Σχ. 7.9 Διάγραμμα μέσης θλιπτικής αντοχής της δεύτερης σειράς δοκιμίων

7.5 Αποτελέσματα αντοχής δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη (Brazilian Split Test)

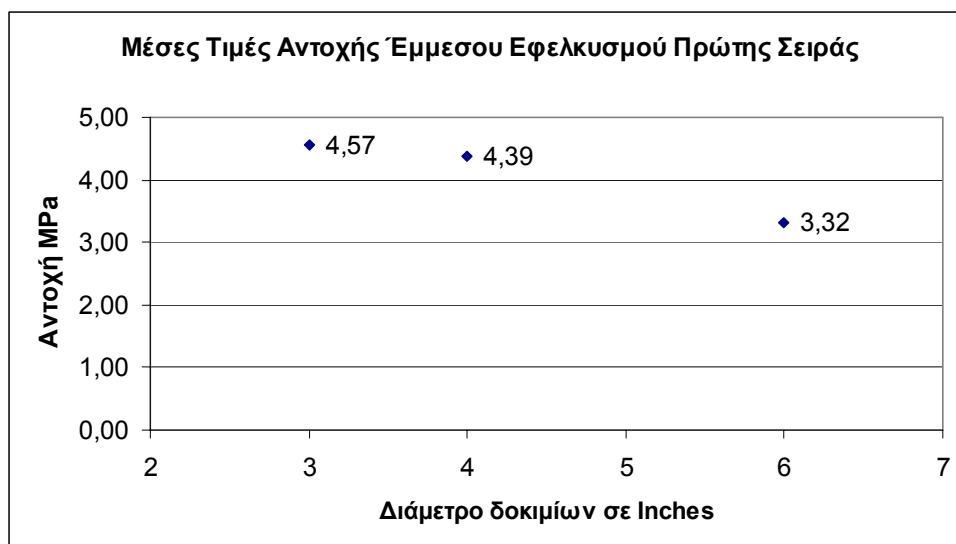
Ορισμένος αριθμός δοκιμών του εκάστοτε μεγέθους υποβλήθηκε σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής συγκρατήθηκε από αυτόματο σύστημα καταγραφής. Συνολικά 31 δοκίμια υποβλήθηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Στα παρακάτω σχήματα (7.10 -7.14) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη.

Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή (MPa)
008	4,13	024	4,56	049	6,72	076	4,26
009	4,80	030	3,13	050	6,76	077	3,84
010	5,15	031	2,61	060	3,8	086	4,42
012	5,24	032	4,27	061	3,88	087	3,62
013	3,54	033	3,35	062	4,24	088	3,8
021	3,62	034	3,24	063	4,64	089	3,55
022	4,67	047	6,52	074	3,37	090	3,23
023	4,70	048	7,11	075	4,19		

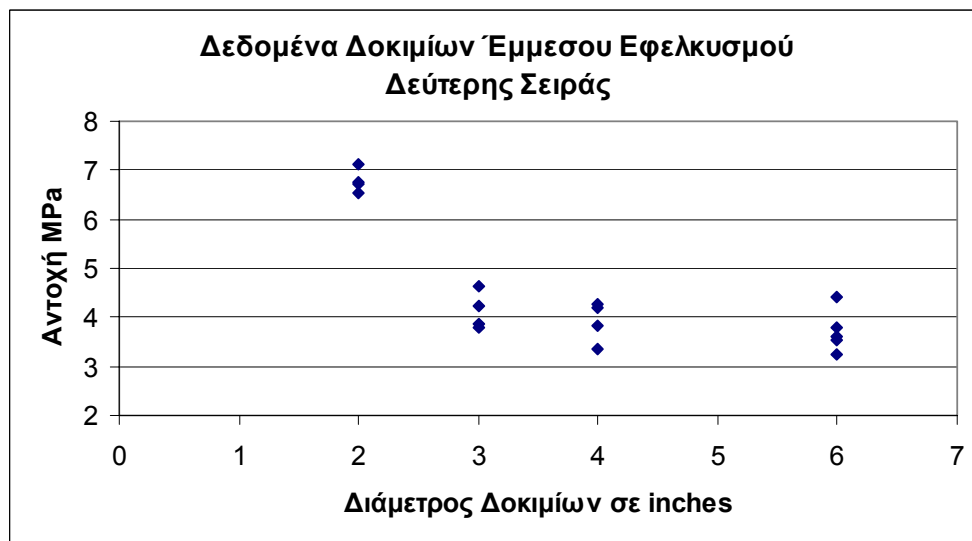
Σχ. 7.10 Πίνακας τιμών αντοχής έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη



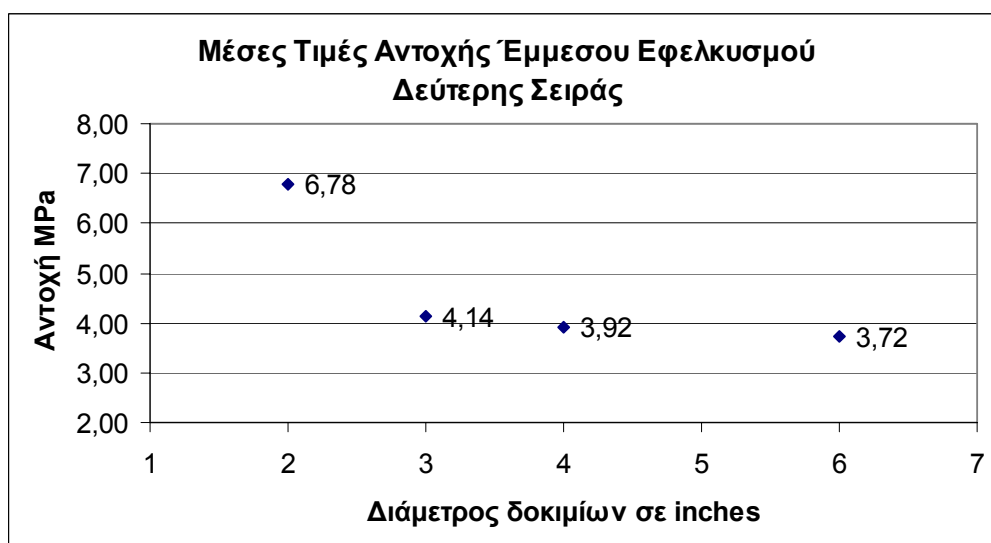
Σχ. 7.11 Διάγραμμα διασποράς των τιμών της εφελκυστικής αντοχής της πρώτης σειράς δοκιμών.



Σχ. 7.12 Διάγραμμα μέσης εφελκυστικής αντοχής της πρώτης σειράς δοκιμίων.



Σχ. 7.13 Διάγραμμα διασποράς των τιμών της εφελκυστικής αντοχής της δεύτερης σειράς δοκιμίων.

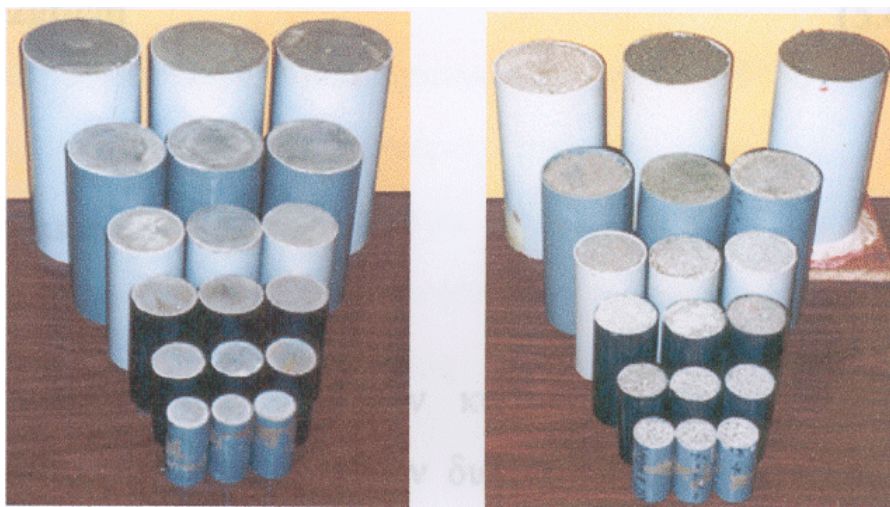


Σχ. 7.14 Διάγραμμα μέσης εφελκυστικής αντοχής της δεύτερης σειράς δοκιμίων.

7.6 Τα πειράματα των Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη

Τα πειράματα των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη που πραγματοποιήθηκαν στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ασχολούνται και αυτά με τα φαινόμενα κλίμακας. Στα πειράματα αυτά μελετήθηκε η αντοχή τσιμεντοκονιαμάτων προς χρήση σε τσιμεντοενέσεις διαφορετικής διαμέτρου. Η ενίσχυση της σταθερότητας των εδαφών με τσιμεντοενέσεις αποτελεί πλέον τυπική και αναγνωρισμένη για τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Οι τσιμεντοενέσεις πραγματοποιούνται με διάμετρο ανάλογα με αυτή που ζητεί η εκάστοτε περίπτωση. Τα φαινόμενα κλίμακας στην συγκεκριμένη περίπτωση αποτελούν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την αντοχή.

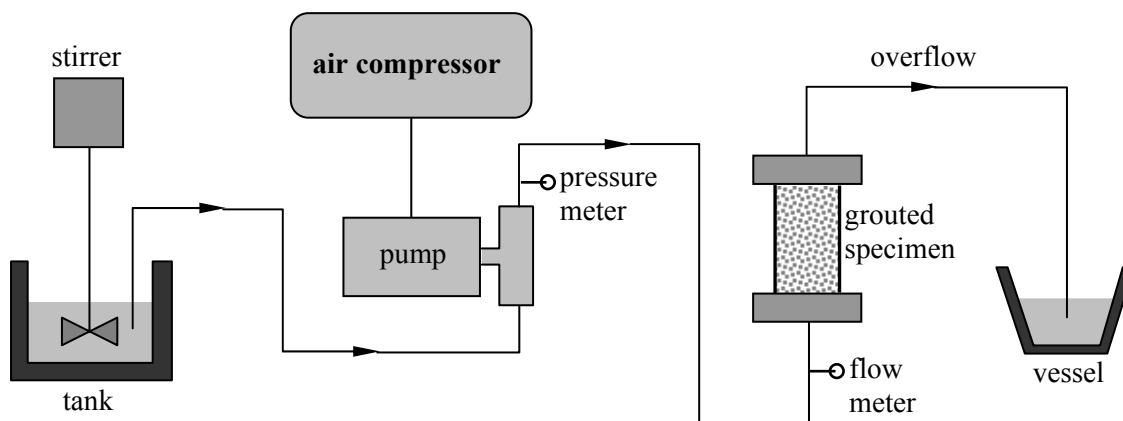
Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οκτώ (8) διαφορετικά μεγέθη κυλινδρικών δοκιμίων. Ο λόγος της διαμέτρου προς το μήκος του κάθε δοκιμίου διατηρήθηκε σταθερός (ίσος με 2) για να διατηρηθεί η γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ των δοκιμίων. Τα δοκίμια αποτελούνταν από τσιμεντοκονίαμα (grouted sand) δηλαδή ένα μίγμα άμμου, τσιμέντου, νερού και μπετονίτη. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων πειραμάτων δείχνουν ότι πράγματι υπάρχει επίδραση των φαινομένων κλίμακας στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.



Σχ. 7.15 Φωτογραφίες των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν

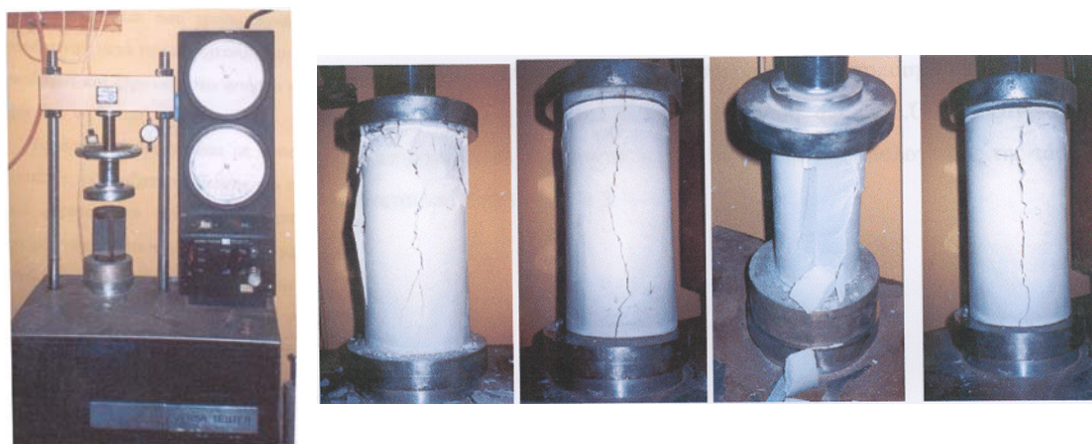
Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων προήλθε από τον Αξιό ποταμό κοντά στην Θεσσαλονίκη. Κατά το κοσκίνισμα του υλικού το 100% πέρασε από το κόσκινο No 4 και το 100% συγκρατήθηκε από το κόσκινο No. 8. Ο μέγιστος κόκκος που χρησιμοποιήθηκε ήταν $d_{\max} = 4.76\text{mm}$ συγκρίσιμος με το μέγιστο κόκκο $d_{\max} = 5\text{mm}$ που χρησιμοποιήθηκε στη 2^η σειρά των πειραμάτων που παρουσιάζονται στη παρούσα διπλωματική. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Portland με χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή μετά από 28 ημέρες τα 45 MPa. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μπετονίτης σε ποσοστό 2% του βάρους του τσιμέντου.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση της διαδικασίας του τιμεντοενέματος εμφανίζεται στο σχήμα 7.16. Η διάταξη ακολουθεί τις προδιαγραφές ASTM D 4320 – 93 που ορίζουν την διαδικασία ελέγχου τσιμεντοενέσεων. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο στο μίγμα τσιμέντο-μπετονίτη ήταν 0.66. Η έγχυση του αιωρήματος έγινε με μικρή πίεση, περίπου 100kPa επειδή η άμμος παρουσίασε ικανοποιητική υδατοπερατότητα και ροή. Η ροή ήταν της τάξεως του 0.1lt/s. Η έγχυση σταμάτησε όταν επιπλέον αιώρημα ισοδύναμο με το 120% του πορώδους της άμμου πέρασε μέσα από το δοκίμιο.



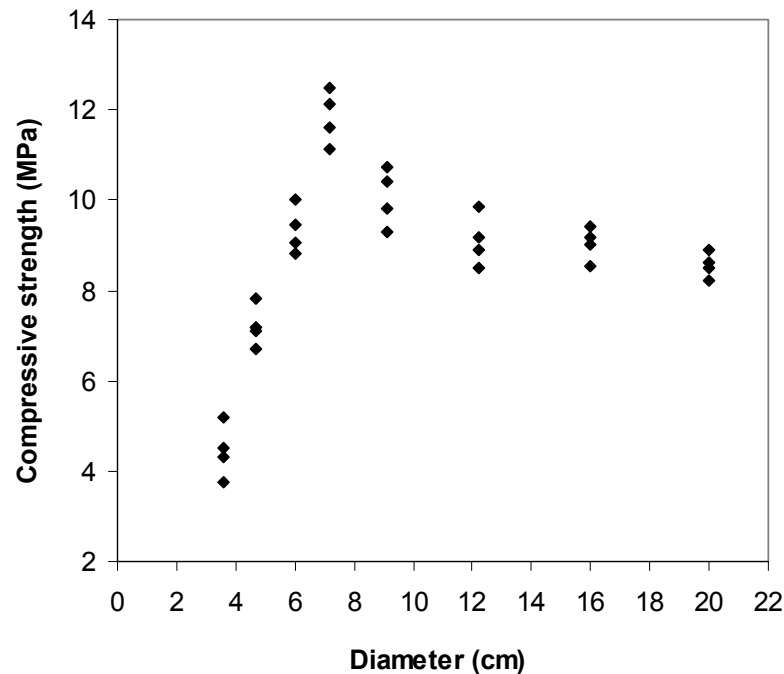
Σχ. 7.16 Σχεδιάγραμμα της διάταξης τσιμεντοένεσης

Τα δοκίμια αφού προετοιμάστηκαν αφέθηκαν στα καλούπια για μία ημέρα. Στη συνέχεια απομακρύνθηκαν από τα καλούπια τους, τοποθετήθηκαν μέσα σε πλαστικές σακούλες και συντηρήθηκαν σε θάλαμο με σχετική υγρασία 100% μέχρι τον έλεγχό τους. Ο έλεγχος της θλιπτικής αντοχής τους πραγματοποιήθηκε από μηχανή ελέγχου τύπου VERSA όπου καταγράφηκαν το φορτίο και η παραμόρφωση ταυτόχρονα από ηλεκτρομηκυνσιόμετρα και αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης. Εκτός από τα παραπάνω δοκίμια κατασκευάστηκαν και δοκίμια τσιμεντοκονιάματος (χωρίς άμμο).

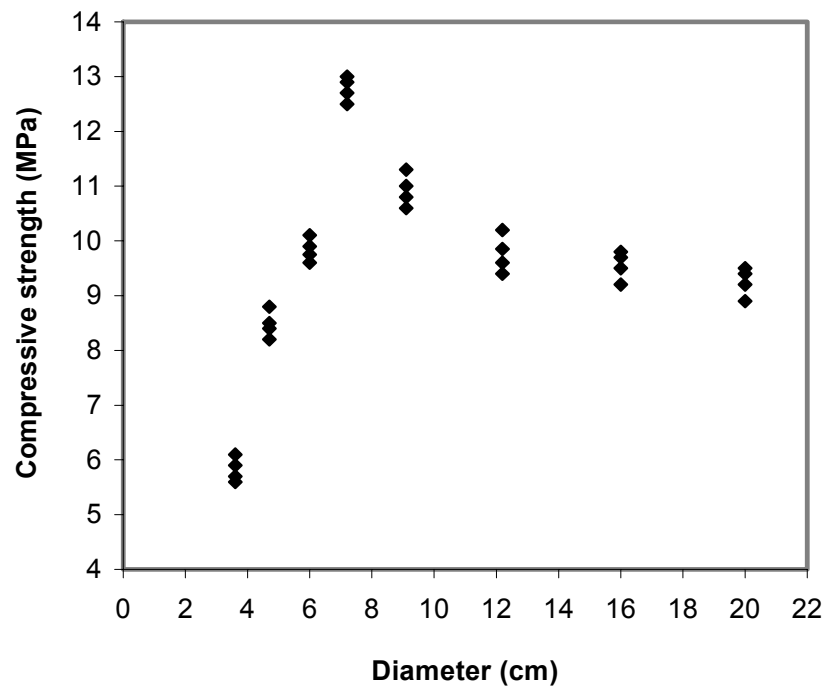


Σχ. 7.17 Μηχανή τύπου VERSA και δοκίμια μετά την αστοχία

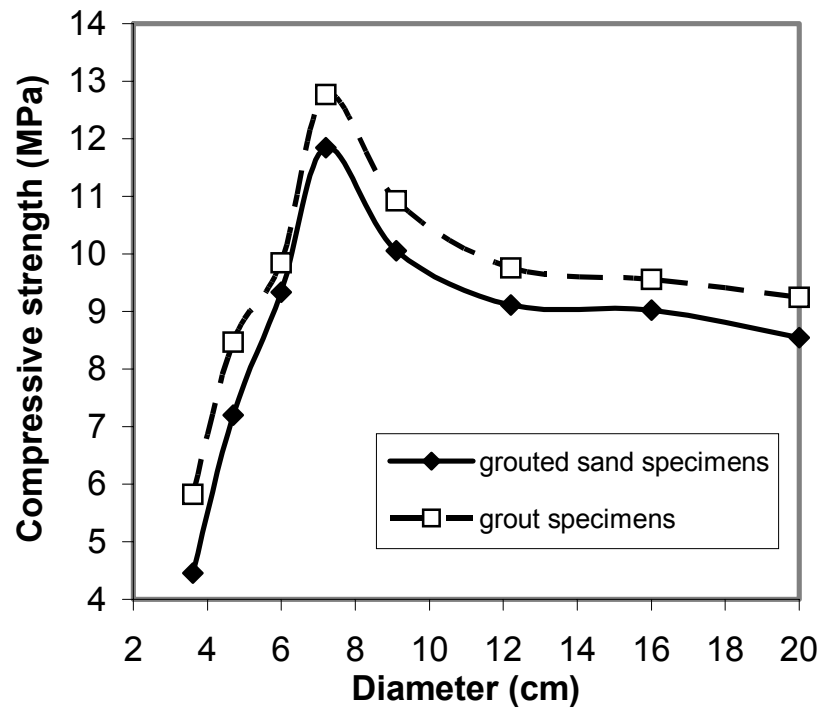
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσίασαν εμφανή ομοιότητα ως προς τις αντοχές με τις δικές μας δοκιμές ιδιαίτερα της δεύτερης σειράς. Γραφήματα των αποτελεσμάτων της θλιπτικής αντοχής αλλά και του μέτρου ελαστικότητας φαίνονται στα σχήματα 7.18, 7.19, 7.20 και 7.21.



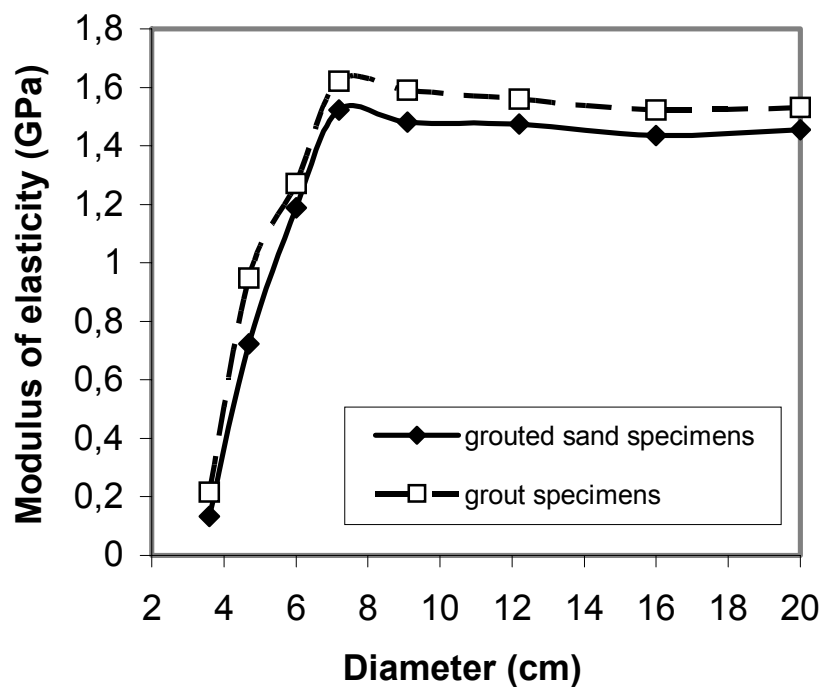
Σχ. 7.18a Αποτελέσματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμών τσιμεντοενέματος (grouted sand)



Σχ. 7.18b Αποτελέσματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος χωρίς άμμο (grout)



Σχ. 7.19 Σύγκριση αποτελεσμάτων μέσω των τιμών αντοχής μονοαξονικής θλίψης για τα δοκίμια τσιμεντοενέματος (grouted sand) και για τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος (grout)



Σχ. 7.20 Σύγκριση αποτελεσμάτων του μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια τσιμεντοενέματος (grouted sand) και για τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος (grout)

7.7 Φιλοσοφία ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων

Τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίστηκαν με τους δύο επικρατέστερους νόμους των φαινομένων κλίμακας. Ο νόμος των φαινομένων κλίμακας του Bazant (size effect law) και ο πολυφρακταλικός νόμος κλίμακας του Carpinteri (Multifractal Scaling Law) χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή. Η εφαρμογή των νόμων στις πειραματικές μέσες τιμές πραγματοποιήθηκε με τη μη-γραμμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης αυτής περιγράφονται σε δύο διαφορετικά διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει τη μη γραμμική προσαρμογή των πειραματικών τιμών ενώ στο δεύτερο διάγραμμα εμφανίζονται τα αποτελέσματα σε διλογαριθμική κλίμακα. Επίσης συγκρίθηκε η επιτυχία της προσαρμογής των δεδομένων στους δύο νόμους.

Η αναλυτική έκφραση του **πολυφρακταλικού νόμου κλίμακας** που προτάθηκε από τον Carpinteri και τους συνεργάτες του είναι η ακόλουθη:

$$\sigma_u = f_t \left(1 + \frac{l_{ch}}{d} \right)^{1/2} \quad \text{ή} \quad \ln \sigma_u = \frac{1}{2} \ln \left[f_t^2 \left(1 + \frac{l_{ch}}{e^{\ln d}} \right) \right]$$

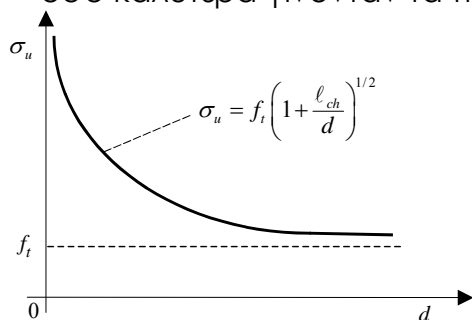
όπου σ_u η τελική εφελκυστική αντοχή

d μέγεθος του δοκιμίου

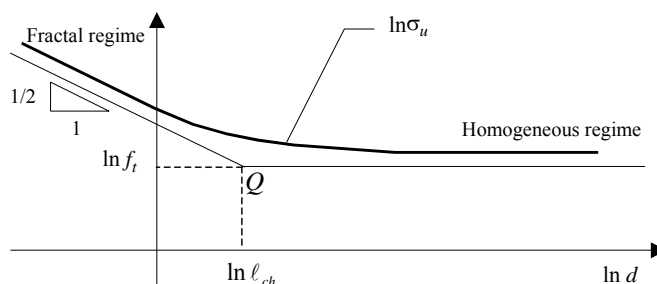
f_t η ονομαστική αντοχή (nominal strength)

l_{ch} χαρακτηριστικό εσωτερικό μήκος του υλικού

Οι δύο συντελεστές f_t και l_{ch} προσδιορίστηκαν μέσω μη-γραμμικού αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων προκειμένου να προσεγγιστούν όσο καλύτερα γίνονταν τα πειραματικά δεδομένα.



Σχ. 7.21 Αναλογικό διάγραμμα (MFSL)



Σχ. 7.22 Διάγραμμα σε διλογαριθμική κλίμακα (MFSL)

Το αναλογικό διάγραμμα του πολυφρακταλικού νόμου κλίμακας δείχνει ότι για μεγαλύτερα μεγέθη δοκιμίων η ονομαστική εφελκυστική αντοχή τείνει στην ασυμπτωτική τιμή f_t , ενώ για μικρότερα μεγέθη η εφελκυστική αντοχή φτάνει σε υψηλότερες τιμές. Στη διλογαριθμική κλίμακα η οριζόντια ασύμπτωτη αντιστοιχεί στα μεγαλύτερα μεγέθη (ομογενής περιοχή ή περιοχή τάξης). Όσο το μέγεθος του δοκιμίου μειώνεται η μηχανική συμπεριφορά τείνει προς τη κεκλιμένη ασύμπτωτη (φρακταλική περιοχή ή περιοχή αταξίας). Το σημείο τομής των δύο ασύμπτωτων Q έχει οριζόντια συντεταγμένη $\ln l_{ch}$. Το χαρακτηριστικό μήκος, l_{ch} , μπορεί

να συγκριθεί με το μέγιστο μέγεθος των μικρότερων τεμαχίων της ύλης (κόκκοι για μέταλλα, κρύσταλλοι για πετρώματα, αδρανή για σκυρόδεμα). Ειδικά για το σκυρόδεμα, ο Carpinteri πρότεινε $l_{ch} = a \cdot d_{\max}$, όπου d_{\max} είναι μέγιστο μέγεθος των κόκκων των αδρανών. Σύμφωνα με τον πολυφρακταλικό νόμο κλίμακας του Carpinteri η επίδραση της μικροδομής στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού γίνεται σταδιακά λιγότερο σημαντική όσο αυξάνεται το μέγεθος των δοκιμίων, ενώ για μικρότερα μεγέθη αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό του υλικού.

Η αναλυτική έκφραση του νόμου των φαινομένων κλίμακας του Bazant (SEL), όπου η γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική και η οριακή ανάλυση συσχετίζονται, είναι η ακόλουθη:

$$\sigma_u = \frac{\beta f_t}{\sqrt{1 + (d/d_0)}}, \quad \text{ή} \quad \ln \sigma_u = \ln(\beta f_t) - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{e^{\ln d}}{d_0} \right),$$

$$[d_0 = \lambda_0 d_{\max}],$$

όπου σ_u η τελική εφελκυστική αντοχή

d το χαρακτηριστικό μέγεθος του δοκιμίου

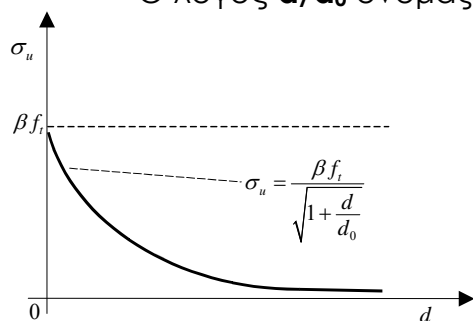
f_t είναι παράμετρος της αντοχής (μπορεί να είναι π.χ. η εφελκυστική αντοχή)

d_0 εσωτερικό μήκος του υλικού (μικροκατασκευή)

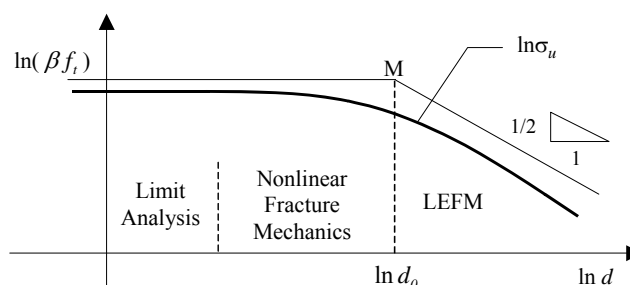
β , λ_0 δύο εμπειρικές σταθερές που προσδιορίζονται από την προσαρμογή του νόμου στα πειραματικά αποτελέσματα γεωμετρικά όμοιων δοκιμίων διαφορετικών μεγεθών.

d_{\max} είναι το μέγιστο μέγεθος των αδρανών

Ο λόγος d/d_0 ονομάζεται συντελεστής ψαθυρότητας



Σχ. 7.23 Αναλογικό διάγραμμα (SEL)



Σχ. 7.24 Διάγραμμα σε διλογαριθμική κλίμακα (SEL)

Σε διλογαριθμική κλίμακα η οριζόντια ασύμπτωτη αντιστοιχεί στα μικρότερα μεγέθη. Καθώς το μέγεθος της κατασκευής μειώνεται, η μηχανική συμπεριφορά τείνει στην οριζόντια ασύμπτωτη. Στη περίπτωση όπου $d/d_0 \rightarrow 0$ αντιπροσωπεύεται η τέλεια μη-ψαθυρή (πλαστική) συμπεριφορά. Καθώς το μέγεθος της κατασκευής αυξάνεται η μηχανική συμπεριφορά τείνει προς την κεκλιμένη ασύμπτωτη. Στη περίπτωση όπου $d/d_0 \rightarrow \infty$ η γραμμική-ελαστική θραυστομηχανική επικρατεί με ιδιαίτερα ψαθυρή συμπεριφορά. Το σημείο τομής M των δύο ασύμπτωτων έχει οριζόντια συντεταγμένη $\ln d_0$. Επειδή η σταθερά d_0 εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής, ο συντελεστής

ψαθυρότητας d/d_0 είναι ανεξάρτητος του μεγέθους καθώς και της γεωμετρίας του δοκιμίου.

Παρατηρώντας κανείς τα πειραματικά αποτελέσματα της θλίψης ξεχωρίζει δύο τάσεις συμπεριφοράς της αντοχής σε σχέση με το μέγεθος του δοκιμίου. Υπάρχει ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που αποτελεί το όριο μεταξύ των δύο τάσεων. Για μεγέθη μεγαλύτερα από το χαρακτηριστικό μέγεθος παρατηρούμε μία συμπεριφορά χαρακτηριστική των φαινομένων κλίμακας. Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυσή τους από τους δύο νόμους του Bazant και του Carpinteri. Αυτό το οποίο όμως προκαλεί εντύπωση είναι τα αποτελέσματα για μεγέθη μικρότερα του χαρακτηριστικού μεγέθους. Εκεί παρατηρούμε μία αντίθετη συμπεριφορά που δεν περιγράφεται από κανέναν νόμο των φαινομένων κλίμακας. Όσο μειώνεται το μέγεθος της κατασκευής τόσο μειώνεται η θλιπτική αντοχή. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τα πειράματα Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη επειδή το εύρος των μεγεθών είναι μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα πειράματα της παρούσας εργασίας. Παρόλα αυτά, τα πειράματα της παρούσας εργασίας αφ' ενός επιβεβαιώνουν την ύπαρξη της τάσης αυτής αλλά δείχνουν και την μετακίνηση του χαρακτηριστικού μεγέθους σε συνάρτηση με το μέγεθος του μεγίστου κόκκου των αδρανών. Αυτή η περίεργη τάση δεν παρατηρείται στα αποτελέσματα του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη. Απόπειρα αναλυτικής εξήγησης του φαινομένου αυτού θα γίνει παρακάτω.

7.8 Ανάλυση των πειραμάτων

Η μοντελοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε με την χρήση της μη-γραμμικής μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων στο μαθηματικό πακέτο MATHCAD. Ο μηχανισμός αστοχίας κατά την διάρκεια των δοκιμών θλίψης θεωρείται ότι προκύπτει από τους τοπικούς εφελκυστικούς μηχανισμούς αστοχίας του υλικού ή από συνδυασμό εφελκυστικών και διατμητικών μηχανισμών αστοχίας σύμφωνα με τη γεωμετρία των δοκιμίων. Με βάση την υπόθεση ότι ο κύριος μηχανισμός αστοχίας σε θλίψη είναι το άνοιγμα ρωγμών, τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ο Πολυφρακταλικός Νόμος Κλίμακας (MFSL) και ο Νόμος Επίδρασης Κλίμακας (SEL) για να μοντελοποιηθούν τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας και να περιγραφούν τα παρατηρούμενα φαινόμενα κλίμακας.

Ο κύριος σκοπός της μοντελοποίησης των παρόντων πειραματικών δεδομένων είναι: α) να επιτευχθούν συμπερασματικά από τα εργαστηριακά δεδομένα, ρεαλιστικές τιμές αντοχής για διαστάσεις πραγματικής κλίμακας (κλίμακα κατασκευών), και β) να συγκριθεί ο βαθμός προσαρμογής του Πολυφρακταλικού Νόμου Κλίμακας (MFSL) και του Νόμου Επίδρασης Μεγέθους (SEL) στα πειραματικά δεδομένα. Για τον σκοπό αυτό υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης R (Correlation Coefficient) για κάθε ένα από τα δύο προαναφερόμενα

μοντέλα και γίνεται μία ποσοτικοποίηση της ικανότητάς τους να ερμηνεύουν τα φαινόμενα κλίμακας.

Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε δύο σειρές δοκιμίων. Στη πρώτη σειρά ο μέγιστος κόκκος αδρανών ήταν 15 mm ενώ στη δεύτερη σειρά ήταν 5 mm. Η κάθε σειρά χωρίζεται σε δύο ομάδες δοκιμίων. Η μία ομάδα υποβλήθηκε σε αξονική θλίψη και η δεύτερη ομάδα σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Επίσης στη πρώτη σειρά δοκιμίων η ομάδα για αξονική θλίψη χωρίζεται σε δύο υποσειρές που διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς την ημερομηνία θραύσης και επομένως ως προς την αντοχή τους. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 5.05cm, 7.55cm, 10.1cm και 15.15cm. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο των δοκιμίων διατηρήθηκε στο 2 προς εξασφάλιση της γεωμετρικής ομοιότητας.

Σημείωση: Η μοντελοποίηση με βάση τους δύο παραπάνω νόμους δίνει μία διαφορετική μηχανική συμπεριφορά για κλίμακες μεγέθους πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές. Ο MFSL δίνει εξαιρετικά υψηλές τιμές αντοχής για δοκίμια μικρού μεγέθους (προβληματική συμπεριφορά) και σταθερή τιμή για δοκίμια μεγάλου μεγέθους, ενώ ο SEL δίνει σταθερή τιμή αντοχής για δοκίμια μικρού μεγέθους και μηδενική τιμή για δοκίμια μεγάλου μεγέθους (προβληματική συμπεριφορά). Με βάση το γεγονός ότι δεν είναι εφικτό να γίνουν εργαστηριακές δοκιμές σε ένα μεγάλο εύρος κλίμακας (από mm έως Km) για αυτό τον λόγο δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το ποιός από τους δύο νόμους περιγράφει καλύτερα τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Για αυτό το λόγο περιοριζόμαστε στην ποιοτική εκτίμηση με βάση τον συντελεστή συσχέτισης R σχετικά με το ποιός από τους δύο νόμους περιγράφει καλύτερα τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

7.8.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων της πρώτης σειράς

Τα πειράματα θλίψης της 1^{ης} σειράς χωρίζονται σε 2 ομάδες, για θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό. Η θλιπτική ομάδα χωρίζεται σε 2 υποσειρές.

7.8.1.1 Η πρώτη υποσειρά θλίψης της πρώτης σειράς

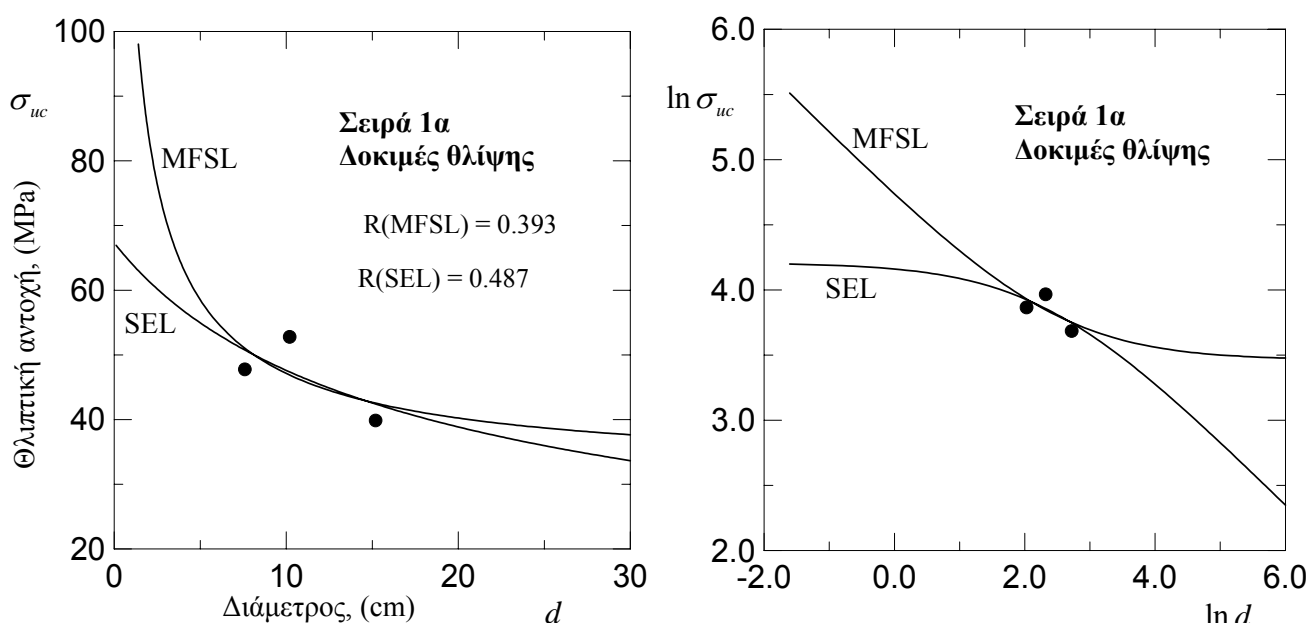
Διάμετρος / Ύψος = 1/2,		Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{max} = 1.5\text{ cm}$	
A/A Δοκιμίου	Διάμετρος, D		Θλιπτική Αντοχή (MPa)
	(in)	(cm)	
001	3	7.62	51.60
002	3	7.62	47.52
004	3	7.62	42.04
006	3	7.62	49.89
015	4	10.16	54.27
017	4	10.16	50.61
018	4	10.16	53.46
028	6	15.24	37.20
038	6	15.24	41.70
039	6	15.24	40.63

Σχ. 7.25 Πίνακας των δοκιμίων της πρώτης υποομάδας της πρώτης σειράς με τις διαστάσεις και θλιπτικές αντοχές τους.

Η 1^η υποσειρά αποτελείται από 10 κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 7.62 cm, 10.16 cm και 15.24 cm. Ο λόγος διαμέτρου προς ύψος έχει διατηρηθεί σταθερός και ίσος με $\frac{1}{2}$. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $d_{\max} = 1.5 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τον MFSL, η ελάχιστη ονομαστική θλιπτική αντοχή υπολογίζεται $f_c(\text{MFSL}) = 31.88 \text{ MPa}$ και το χαρακτηριστικό μήκος του υλικού $\ell_{ch} = 11.83 \text{ cm}$. Ο λόγος ℓ_{ch}/d_{\max} είναι ίσος με 7.88. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων έγινε με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων και προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R=0.393$. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον SEL η παράμετρος θλιπτικής αντοχής υπολογίζεται $f_c(\text{SEL}) = 60.53 \text{ MPa}$ και το εσωτερικό μήκος του υλικού $d_0 = 10 \text{ cm}$. Ο λόγος d_0/d_{\max} είναι ίσος με 6.67, ενώ η παράμετρος β ισούται με 1.111. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης $R=0.487$.

Μέγιστο μέγεθος κόκκου, $d_{\max} = 15 \text{ mm}$	Θλιπτική Αντοχή, σ_{uc} (MPa)		
	Πειραματικά δεδομένα (Μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_c(\text{MFSL}) = 31.88 \text{ MPa}$, $\ell_{ch} = 11.83 \text{ cm}$	$f_c(\text{SEL}) = 60.53 \text{ MPa}$, $d_0 = 10 \text{ cm}$, $\beta = 1.111$
7.62	47.76	50.95	50.69
10.16	52.78	46.91	47.39
15.24	39.84	42.50	42.35

Σχ. 7.26 Πίνακας 1α: Σειρά 1 / Ομάδα 1 (Δοκιμές Θλίψης: Μέσες τιμές) – Θεωρητικά αποτελέσματα.



Σχ. 7.27 Πειραματικά δεδομένα θλιπτικής αντοχής της Σειράς 1 / Υποσειρά 1 και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

7.8.1.2 Η δεύτερη υποσειρά θλίψης της πρώτης σειράς

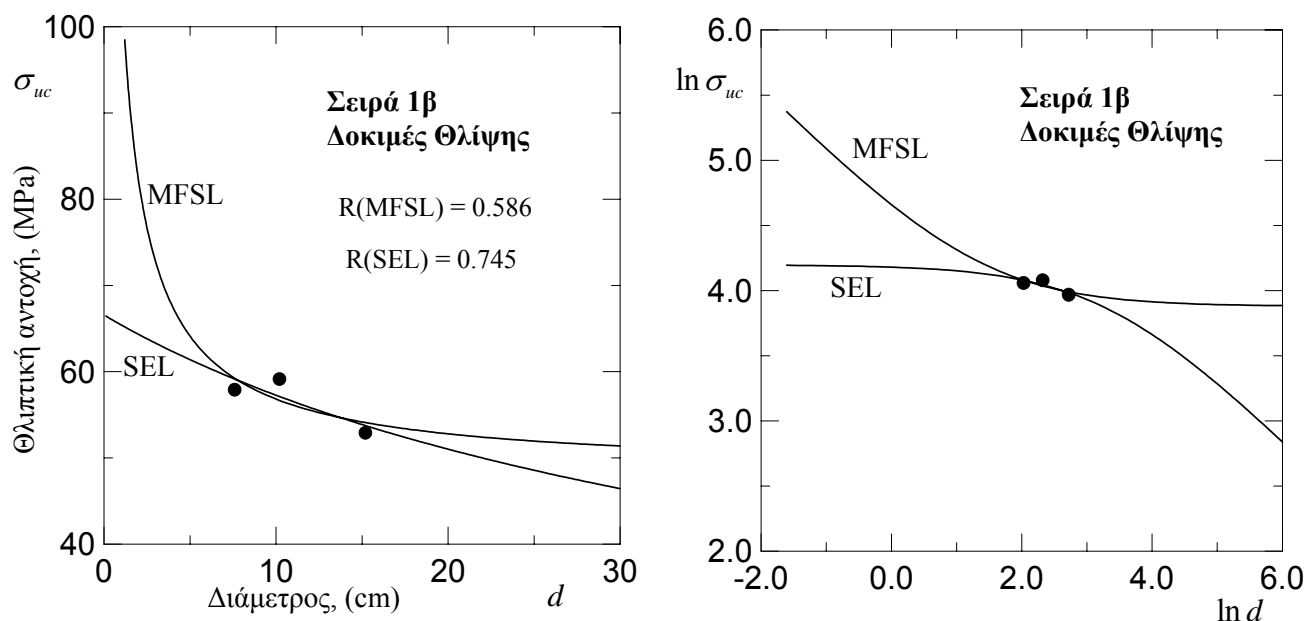
Διάμετρος / Ύψος = 1/2,		Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{\max} = 1.5 \text{ cm}$	
A/A Δοκιμίου	Διάμετρος, D		Θλιπτική Αντοχή (MPa)
	(in)	(cm)	
003	3	7.62	57.61
005	3	7.62	59.43
007	3	7.62	56.68
016	4	10.16	58.49
019	4	10.16	58.85
020	4	10.16	60.08
027	6	15.24	48.58
035	6	15.24	53.35
036	6	15.24	53.84
037	6	15.24	55.86

Σχ. 7.28 Πίνακας των δοκιμών της δεύτερης υποσειράς της πρώτης σειράς με τις διαστάσεις και αντοχές τους.

Η 2^η υποσειρές αποτελείται από 10 κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 7.62 cm, 10.16 cm και 15.24 cm. Ο λόγος διαμέτρου προς ύψος έχει διατηρηθεί σταθερός και ίσος με 1/2. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $d_{\max} = 1.5 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τον MFSL, η ελάχιστη ονομαστική θλιπτική αντοχή υπολογίζεται $f_c(\text{MFSL}) = 48.43 \text{ MPa}$ και το χαρακτηριστικό μήκος του υλικού $\ell_{ch} = 3.76 \text{ cm}$. Ο λόγος ℓ_{ch} / d_{\max} είναι ίσος με 2.51. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων έγινε με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων και προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R=0.586$. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον SEL η παράμετρος θλιπτικής αντοχής υπολογίζεται $f_c(\text{SEL}) = 63.2 \text{ MPa}$ και το εσωτερικό μήκος του υλικού $d_0 = 28.45 \text{ cm}$. Ο λόγος d_0 / d_{\max} είναι ίσος με 18.96, ενώ η παράμετρος β ισούται με 1.053. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης $R=0.745$.

Μέγιστο μέγεθος κόκκου, d_{\max} =15mm	Θλιπτική Αντοχή, σ_{uc} (MPa)			
	Πειραματικά δεδομένα (Μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα		
Διάμετρος, d (cm)		MFSL	SEL	
$f_c(MFSL) = 48.43 MPa$, $\ell_{ch} = 3.76 cm$		$f_c(SEL) = 63.20 MPa$, $d_0 = 28.45 cm$, $\beta = 1.053$		
7.62	57.91	59.19	59.11	
10.16	59.14	56.69	57.14	
15.24	52.91	54.08	53.71	

Σχ. 7.29 Σειρά 1 / Ομάδα 2 (Δοκιμές Θλίψης: Μέσες τιμές) – Θεωρητικά αποτελέσματα.



Σχ. 7.30 Πειραματικά δεδομένα θλιπτικής αντοχής της Σειράς 1 / Υποσειρά 2 και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

7.8.1.3 Η ομάδα έμμεσου εφελκυσμού της πρώτης σειράς

Διάμετρος / Ύψος = 1/2,			Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{\max} = 1.5 \text{ cm}$
A/A Δοκιμίου	Διάμετρος, D		Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
	(in)	(cm)	
008	3	7.62	4.13
009	3	7.62	4.8
010	3	7.62	5.15
012	3	7.62	5.24
013	3	7.62	3.54
021	4	10.16	3.62
022	4	10.16	4.67
023	4	10.16	4.7
024	4	10.16	4.56
030	6	15.24	3.13
031	6	15.24	2.61
032	6	15.24	4.27
033	6	15.24	3.35
034	6	15.24	3.24

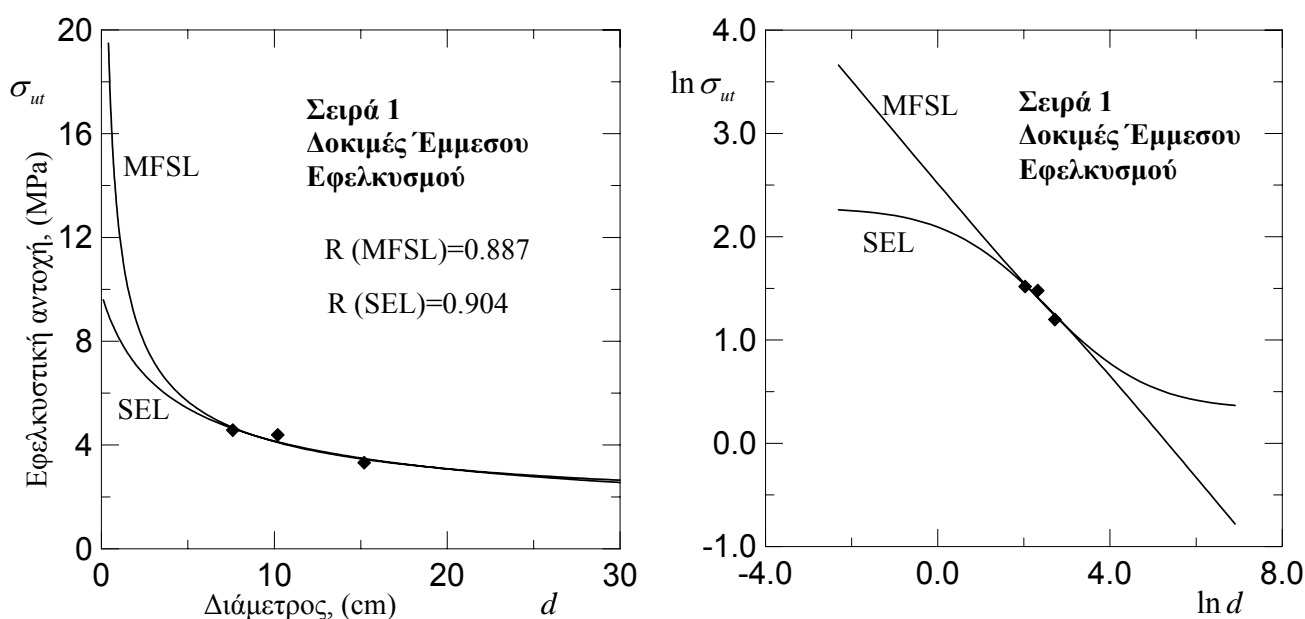
Σχ. 7.31 Πίνακας των δοκιμών της ομάδας έμμεσου εφελκυσμού της πρώτης σειράς με τις διαστάσεις και αντοχές τους.

Τα πειράματα έμμεσου εφελκυσμού της πρώτης σειράς αποτελούνται από μία ομάδα 14 κυλινδρικών δοκιμών με διάμετρο 7.62 cm, 10.16 cm και 15.24 cm. Ο λόγος διαμέτρου προς ύψος έχει διατηρηθεί σταθερός και ίσος με 1/2. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $d_{\max} = 1.5 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τον MFSL, η ελάχιστη ονομαστική εφελκυστική

αντοχή υπολογίζεται $f_t(MFSL)=1.39\text{ MPa}$ και το χαρακτηριστικό μήκος του υλικού $\ell_{ch}=78.35\text{ cm}$. Ο λόγος ℓ_{ch}/d_{\max} είναι ίσος με 52.23. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων έγινε με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων και προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R=0.887$. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον SEL η παράμετρος εφελκυστικής αντοχής υπολογίζεται $f_t(SEL)=9.57\text{ MPa}$ και το εσωτερικό μήκος του υλικού $d_0=2.17\text{ cm}$. Ο λόγος d_0/d_{\max} είναι ίσος με 1.45, ενώ η παράμετρος β ισούται με 1.026. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης $R=0.904$.

Μέγιστο μέγεθος κόκκου, $d_{\max}=15\text{ mm}$	Εφελκυστική αντοχή, σ_{ut} (MPa)		
	Πειραματικά δεδομένα (Μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_t(MFSL)=1.39\text{ MPa}$, $\ell_{ch}=78.35\text{ cm}$	$f_t(SEL)=9.57\text{ MPa}$, $d_0=2.17\text{ cm}$, $\beta=1.026$
7.62	4.57	4.66	4.62
10.16	4.39	4.1	4.12
15.24	3.32	3.44	3.47

Σχ. 7.32 Σειρά 1 (Δοκιμές Έμμεσου Εφελκυσμού: Μέσες τιμές) – Θεωρητικά αποτελέσματα



Σχ. 7.33 Πειραματικά δεδομένα εφελκυστικής αντοχής της Σειράς 1 και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

7.8.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης σειράς

7.8.2.1 Πειράματα θλίψης δεύτερης σειράς

Διάμετρος / Ύψος = 1/2,		Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{\max} = 0.5 \text{ cm}$	
A/A Δοκιμίου	Διάμετρος, D		Αντοχή (MPa)
	(in)	(cm)	
040	2	5.05	65.40
041	2	5.05	62.36
042	2	5.05	55.52
043	2	5.05	51.37
044	2	5.05	49.23
045	2	5.05	45.73
046	2	5.05	68.05
051	2	5.05	60.86
052	2	5.05	59.66
053	3	7.55	64.75
054	3	7.55	67.14
055	3	7.55	64.95
056	3	7.55	60.71
057	3	7.55	71.16
058	3	7.55	62.59
059	3	7.55	68.22
066	4	10.10	63.27
067	4	10.10	59.97
068	4	10.10	57.63
069	4	10.10	61.42
070	4	10.10	55.88
071	4	10.10	63.14
072	4	10.10	56.98
079	6	15.15	58.73
080	6	15.10	60.87
081	6	15.15	58.21
082	6	15.15	58.55
083	6	15.15	56.31
084	6	15.10	59.49
085	6	15.15	58.34

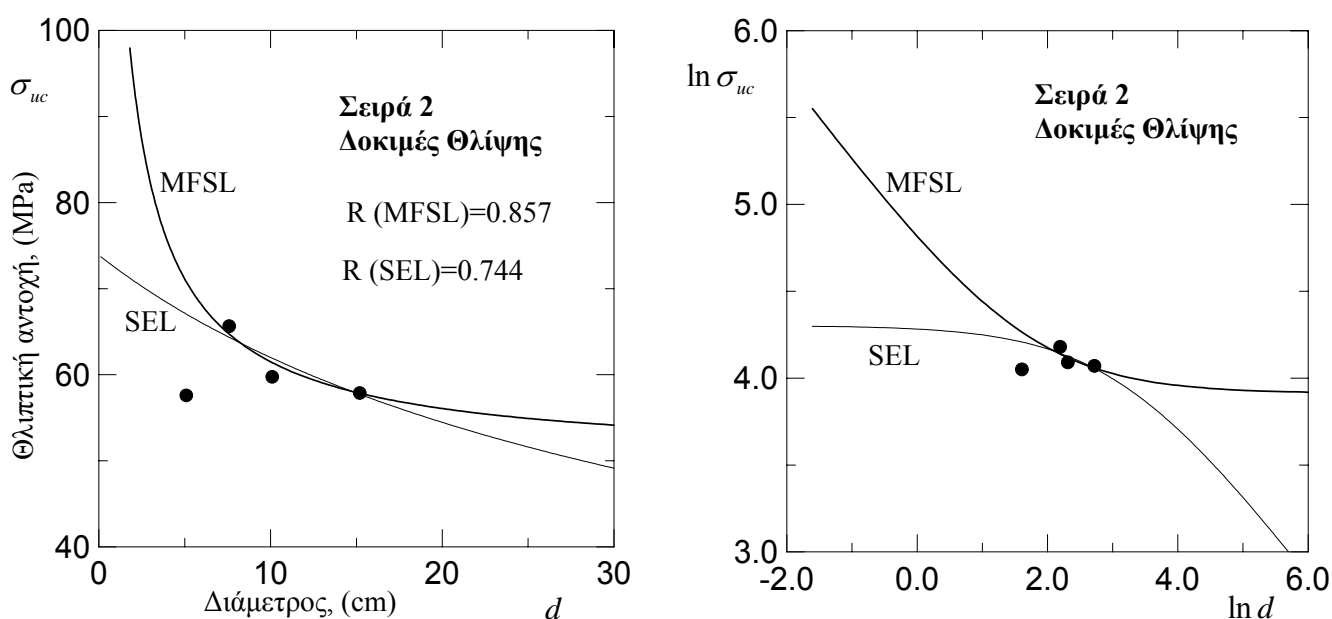
Σχ. 7.34 Πίνακας των δοκιμών θλίψης της δεύτερης σειράς με τις διαστάσεις και θλιπτικές αντοχές τους.

Τα πειράματα θλίψης της δεύτερης σειράς αποτελούνται από μία ομάδα 30 κυλινδρικών δοκιμών με διάμετρο 5.05 cm, 7.55 cm, 10.1 cm και 15.15 cm. Ο λόγος διαμέτρου προς ύψος έχει διατηρηθεί σταθερός και ίσος με 1/2. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $d_{\max} = 0.5 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τον MFSL, η ελάχιστη ονομαστική θλιπτική αντοχή υπολογίζεται $f_c(MFSL) = 50.05 \text{ MPa}$ και το χαρακτηριστικό μήκος του υλικού $\ell_{ch} = 5.1 \text{ cm}$. Ο λόγος ℓ_{ch} / d_{\max} είναι ίσος με 10.2. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων έγινε με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών

αποτελεσμάτων και προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R=0.857$. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον SEL η παράμετρος θλιπτικής αντοχής υπολογίζεται $f_c(SEL)=69.71\text{MPa}$ και το εσωτερικό μήκος του υλικού $d_0=23.81\text{cm}$. Ο λόγος d_0/d_{\max} είναι ίσος με 47.62, ενώ η παράμετρος β ισούται με 1.059. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης $R=0.744$.

Μέγιστο μέγεθος κόκκου, $d_{\max}=5\text{mm}$	Θλιπτική αντοχή, σ_{uc} (MPa)		
	Πειραματικά δεδομένα (μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_c(\text{MFSL}) = 50.05\text{MPa}$, $\ell_{ch} = 5.1\text{cm}$	$f_c(\text{SEL}) = 69.71\text{MPa}$, $d_0 = 23.81\text{cm}$, $\beta = 1.059$
5.05	57.58	70.94	67.1
7.55	65.646	64.77	64.37
10.1	59.756	61.39	61.9
15.15	58.642	57.86	57.57

Σχ. 7.35 Σειρά 2 (Δοκιμές Θλίψης: Μέσες τιμές) – Θεωρητικά αποτελέσματα



Σχ. 7.36 Πειραματικά δεδομένα θλιπτικής αντοχής της δεύτερης σειράς και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

Στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιήθηκαν και τα τέσσερα μεγέθη για την μοντελοποίηση. Το μικρότερο μέγεθος παρουσιάζει αντοχή μικρότερη από την αναμενόμενη και φαίνεται σαφώς ότι ακολουθεί άλλη λογική. Η τάση αυτή θα αναλυθεί στη συνέχεια.

7.8.2.2 Πειράματα έμμεσου εφελκυσμού δεύτερης σειράς

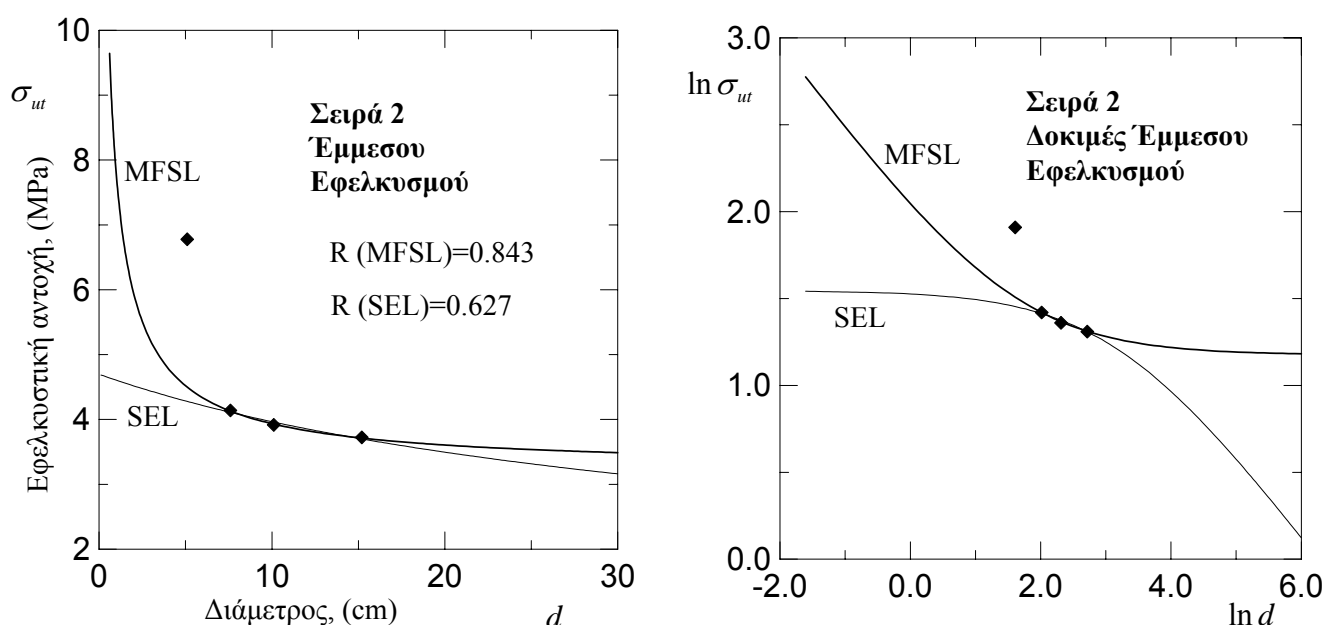
Διάμετρος / Ύψος = 1/2,		Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{\max} = 0.5 \text{ cm}$	
A/A Δείγματος	Διάμετρος, D		Αντοχή (MPa)
	(in)	(cm)	
047	2	5.05	6.52
048	2	5.05	7.11
049	2	5.05	6.72
050	2	5.05	6.76
060	3	7.55	3.80
061	3	7.55	3.88
062	3	7.55	4.24
063	3	7.55	4.64
074	4	10.10	3.37
075	4	10.10	4.19
076	4	10.10	4.26
077	4	10.10	3.84
086	6	15.10	4.42
087	6	15.15	3.62
088	6	15.10	3.8
089	6	15.15	3.55
090	6	15.10	3.23

Σχ. 7.37 Πίνακας των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού της δεύτερης σειράς με τις διαστάσεις και εφελκυστικές αντοχές τους.

Τα πειράματα έμμεσου εφελκυσμού της δεύτερης σειράς αποτελούνται από μία ομάδα 17 κυλινδρικών δοκιμών με διάμετρο 5.05 cm, 7.62 cm, 10.16 cm και 15.24 cm. Ο λόγος διαμέτρου προς ύψος έχει διατηρηθεί σταθερός και ίσος με 1/2. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου είναι $d_{\max} = 0.5 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τον MFSL, η ελάχιστη ονομαστική εφελκυστική αντοχή υπολογίζεται $f_t(\text{MFSL}) = 3.25 \text{ MPa}$ και το χαρακτηριστικό μήκος του υλικού $\ell_{ch} = 4.707 \text{ cm}$. Ο λόγος ℓ_{ch} / d_{\max} είναι ίσος με 9.414. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων έγινε με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων και προέκυψε συντελεστής συσχέτισης $R=0.843$. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον SEL η παράμετρος εφελκυστικής αντοχής υπολογίζεται $f_t(\text{SEL}) = 4.7 \text{ MPa}$ και το εσωτερικό μήκος του υλικού $d_0 = 24.84 \text{ cm}$. Ο λόγος d_0 / d_{\max} είναι ίσος με 49.68, ενώ η παράμετρος β ισούται με 0.998. Η μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων με βάση τις μέσες τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης $R=0.627$.

Μέγιστο μέγεθος κόκκου, $d_{\max} = 5\text{mm}$	Εφελκυστική Αντοχή, σ_{ut} (MPa)		
	Πειραματικά δεδομένα (μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_t(\text{MFSL}) = 3.25 \text{ MPa}$, $\ell_{ch} = 4.707 \text{ cm}$	$f_t(\text{SEL}) = 4.7 \text{ MPa}$, $d_0 = 24.84 \text{ cm}$, $\beta = 0.998$
5.05	6.778	4.51	4.27
7.55	4.14	4.13	4.11
10.1	3.915	3.92	3.96
15.15	3.724	3.71	3.70

Σχ. 7.38 Σειρά 2 (Δοκιμές Έμμεσου Εφελκυσμού: Μέσες τιμές) – Θεωρητικά αποτελέσματα



Σχ. 7.39 Πειραματικά δεδομένα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής της Σειράς 2 και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η μέση αντοχή των μικρότερων δοκιμών είναι αρκετά εκτός της αναμενόμενης περιοχής με βάση τους δύο νόμους. Τα δοκίμια αυτά δεν συμπεριλήφθησαν στην μοντελοποίηση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις συννοριακές συνθήκες και η εξήγηση του θα πραγματοποιηθεί παρακάτω.

7.9 Ανάλυση των πειραμάτων Αναγνωστόπουλου-Εφραιμίδη σε σχέση με τους δύο νόμους SEL και MFSL.

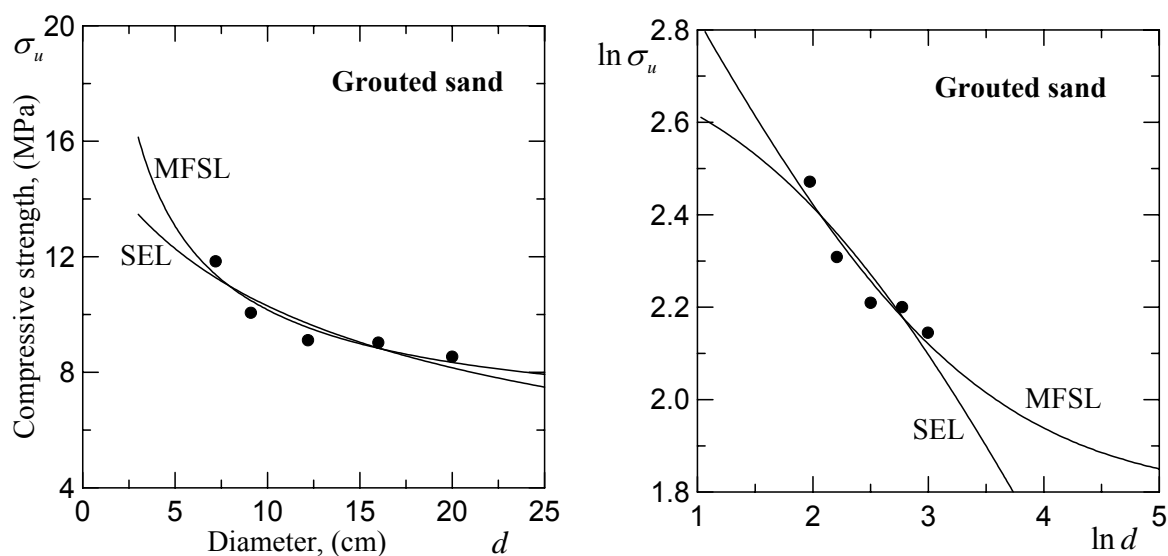
Για την ανάλυση αυτή θα χρησιμοποιηθούν τα πειραματικά αποτελέσματα για μεγέθη δοκιμίων μεγαλύτερα του χαρακτηριστικού μεγέθους εμφάνισης της μέγιστης αντοχής που ανταποκρίνονται στην συμπεριφορά που διαπραγματεύονται οι νόμοι SEL και MFSL. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε δύο ομάδες δοκιμίων. Μία ομάδα δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος και μία ομάδα δοκιμίων τσιμεντοενεμάτων. Η διάμετρος των δοκιμίων που μας ενδιαφέρουν ήταν 72 mm, 91 mm, 122 mm, 160 mm και 200 mm. Ο λόγος ύψους προς διάμετρο των δοκιμίων διατηρήθηκε στο 2 προς εξασφάλιση της γεωμετρικής ομοιότητας.

7.9.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων από τα δοκίμια τσιμεντενέματος

Grouted Sand	Θλιπτική Αντοχή, σ_u (MPa)		
	Πειραματικά Δεδομένα (Μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_t(MFSL) = 5.993 \text{ MPa}$, $\ell_{ch} = 18.746 \text{ cm}$	$f_t(SEL) = 15.92 \text{ MPa}$, $d_0 = 6.835 \text{ cm}$, $\beta = 1.01514$
7.2	11.84	11.38	11.28
9.1	10.06	10.48	10.58
12.2	9.11	9.54	9.68
16	9.025	8.83	8.84
20	8.54	8.34	8.15

Σχ. 7.40 Πίνακας μέσης τιμής της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων τσιμεντενέματος

Για τα δοκίμια τσιμεντενέματος (grouted sand specimens) οι παράμετροι $f_t(MFSL)$ και ℓ_{ch} του νόμου του Carpinteri ισούνται με 5.993 MPa και 187.46mm, αντίστοιχα ($\ell_{ch}/d_{\max} = 39.38$). Η προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με τις μέσες τιμές της θλιπτικής αντοχής. Ο νόμος MFSL παρέχει συντελεστή συσχέτισης $R(MFSL) = 0.905$. Ο συντελεστής συσχέτισης εκφράζει πόσο καλά προσεγγίζει ο νόμος τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τη μονάδα. Στην περίπτωση του SEL οι παράμετροι $f_t(SEL)$, d_0 και β ισούνται με 15.92 MPa, 68.35 mm και 1.01534, αντίστοιχα ($\lambda_0 = d_0/d_{\max} = 14.36$). Ο νόμος SEL παρέχει συντελεστή συσχέτισης $R(SEL) = 0.842$. Τα αποτελέσματα δείχνουν 28% μείωση της θλιπτικής αντοχής από ένα δοκίμιο με διάμετρο 7.2cm σε ένα με διάμετρο 20cm.



Σχ. 7.41 Πειραματικά δεδομένα θλιπτικής αντοχής τσιμεντοσενεμάτων και η μοντελοποίησή τους με βάση τους νόμους MFSL και SEL, σε αναλογικό και διλογαριθμικό διάγραμμα

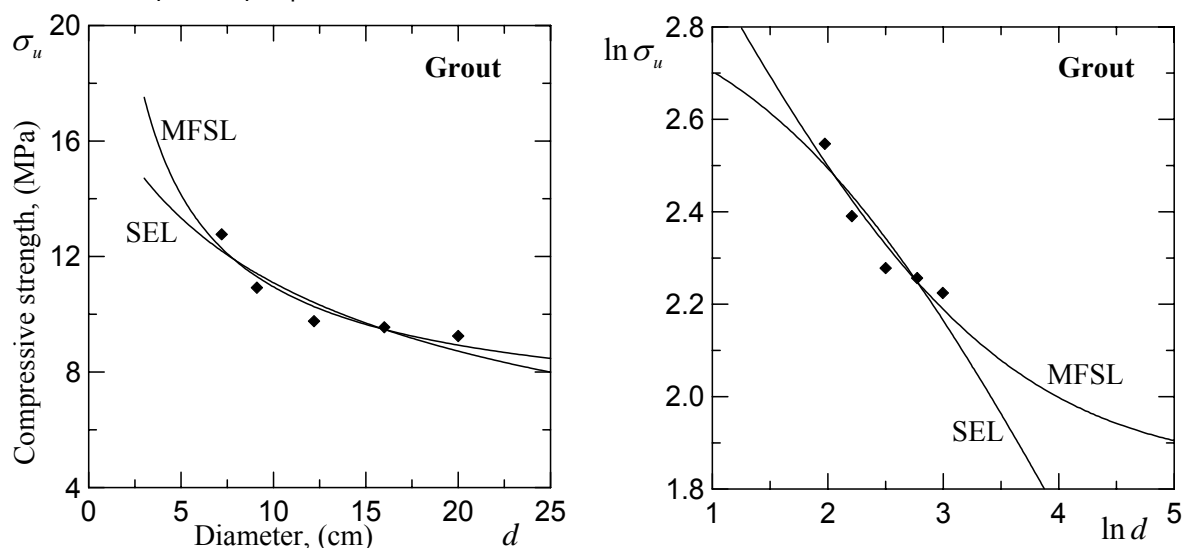
7.9.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων από τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

Grout	Θλιπτική αντοχή, σ_u (MPa)		
	Πειραματικά αποτελέσματα (Μέσες τιμές)	Θεωρητικά δεδομένα	
		MFSL	SEL
Διάμετρος, d (cm)		$f_t(MFSL) = 6.301 MPa$, $\ell_{ch} = 20.168 cm$	$f_t(SEL) = 17.02 MPa$, $d_0 = 6.221 cm$, $\beta = 1.052$
7.2	12.77	12.28	12.19
9.1	10.92	11.3	11.41
12.2	9.76	10.26	10.41
16	9.55	9.47	9.48
20	9.25	8.93	8.72

Σχ. 7.42 Πίνακας μέσων τιμών και θεωρητικών δεδομένων της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών της τσιμεντόπαστας

Για τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος (grout specimens) οι παράμετροι $f_t(MSFL)$ και ℓ_{ch} του νόμου του Carpinteri ισούται με 3.301 MPa και 201.68mm, αντίστοιχα. Η προσαρμογή πραγματοποιήθηκε με τις μέσες τιμές της θλιπτικής αντοχής. Ο νόμος MFSL παρέχει συντελεστή συσχέτισης $R(MFSL) = 0.91$. Ο συντελεστής συσχέτισης εκφράζει πόσο καλά προσεγγίζει ο νόμος τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τη μονάδα. Στην περίπτωση του SEL οι παράμετροι $f_t(SEL)$, d_0 και β ισούνται με 17.02 MPa, 62.21 mm και 1.052, αντίστοιχα. Ο νόμος SEL παρέχει συντελεστή συσχέτισης $R(SEL) = 0.848$. Τα αποτελέσματα δείχνουν

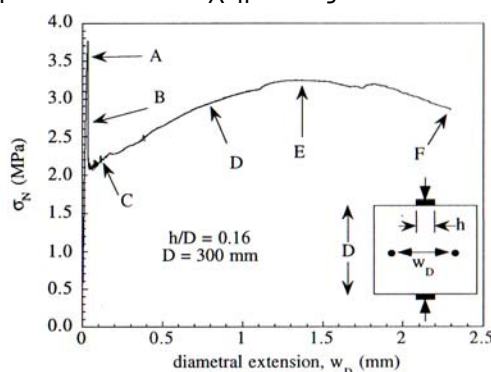
27% μείωση της θλιπτικής αντοχής από ένα δοκίμιο με διάμετρο 7.2cm σε ένα με διάμετρο 20cm.



Σχ. 7.43 Πειραματικά δεδομένα θλιπτικής αντοχής των δοκιμών της τσιμεντοκονιάματος και η μοντελοποίησή τους με βάση τον MFSL και τον SEL, σε αναλογικό διάγραμμα και διλογαριθμικό διάγραμμα

7.10 Σχολιασμός και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη (Brazilian Split Cylinder Test)

Η αντοχή του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη σχετίζεται με την αντοχή αντίστασης του υλικού για την εμφάνιση και επέκταση κεντρικής ρωγμής μεταξύ των δύο γενέτειρων γραμμικά κατανεμημένων δυνάμεων. Οι μελέτη του Rocco et al. το 1995 έδειξε ότι η επιβαλλόμενη τάση προς την διαμετρική παραμόρφωση ακολουθεί ένα διάγραμμα όμοιο με αυτό του σχήματος 7.44.



Σχ. 7.44 Διάγραμμα τάσης προς διαμετρικής παραμόρφωσης σε πειράματα διάρρηξης έμμεσου εφελκυσμού σε κυβικά δοκίμια, Rocco et al. (1995).

Το πείραμα όμως είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο ως προς τις συννοριακές συνθήκες. Προκειμένου να υπάρχουν αξιόπιστα αποτελέσματα πρέπει οι συννοριακές συνθήκες για όλα τα δοκίμια να είναι ίδιες. Με άλλα λόγια πρέπει ο λόγος d/D να είναι σταθερός (d =πλάτος λωρίδας, D = διάμετρος κυλινδρικού δοκιμίου). Αυτό όμως δεν τηρήθηκε στα πειράματα της παρούσας έρευνας. Η λωρίδα φόρτισης διατηρήθηκε σταθερού πλάτους (1cm) ανεξάρτητα

του μεγέθους του δοκιμίου. Ο λόγος που συνέβη αυτό οφείλονταν στην δυσκολία κοπής των λωρίδων σε μικρότερα πλάτη με αξιόπιστο τρόπο. Επομένως τα αποτελέσματα αναμενόταν να αποκλίνουν από την “καθαρή” συμπεριφορά. Βέβαια η διαφορά του λόγου d/D μεταξύ των δοκιμίων δεν διέφερε αρκετά ώστε να υπάρξουν σημαντικές αποκλίσεις. Υπήρξε μόνο μία εξαίρεση για το δοκίμιο του μικρότερου μεγέθους ($D=2\text{in.}$) της δεύτερης σειράς. Εκεί παρατηρούμε ότι η μέση εφελκυστική αντοχή των μικρότερων δοκιμίων αποκλίνει αισθητά από τις δύο καμπύλες των νόμων MFSL και SEL.

Οι Rocco et al. (1995) παρατήρησαν ότι η καμπύλη του σχήματος 7.44 είχε δύο κορυφές. Η μέγιστη κορυφή αντιστοιχούσε στην αντοχή της κεντρικής ρωγμής ενώ η δεύτερη κορυφή που εμφανίζονταν αργότερα αντιστοιχούσε στην αντίσταση του δοκιμίου στην επέκταση των δευτερευουσών ρωγμών. Ο μηχανισμός αστοχίας περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.15.1. Καθώς αυξάνεται ο λόγος d/D η τιμή της τάσης της δεύτερης κορυφής αυξάνεται και τείνει να φτάσει και να ξεπεράσει την τάση της πρώτης κορυφής. Η πρώτη κορυφή όμως στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην καθαρή αντοχή έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη. Όταν ο λόγος d/D ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή η δεύτερη κορυφή στο διάγραμμα ευρίσκεται σε υψηλότερη τάση από τη πρώτη. Έτσι η μέγιστη αντοχή που λαμβάνεται από το πείραμα δεν είναι η καθαρή αντοχή της διάρρηξης αλλά αντιστοιχεί σε δευτερεύοντα φαινόμενα του μηχανισμού αστοχίας. Η αντοχή αυτή θα είναι υψηλότερη της πραγματικής και επομένως θα είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη. Αυτό συνέβη με τα μικρότερα δοκίμια της δεύτερης σειράς και όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.39 η μέση αντοχή των μικρότερων δοκιμίων βρίσκεται σε υψηλότερη θέση εκτός καμπύλης. Το συμβάν αυτό στα πειραματικά δεδομένα αποτελεί απόδειξη της ορθότητας του μηχανισμού αστοχίας όπως παρατηρήθηκε από τον Rocco το 1996.

Συγκρίνοντας τους δύο νόμους SEL και MFSL με βάση τα πειραματικά δεδομένα της πρώτης σειράς βλέπει κανείς ότι ο συντελεστής συσχέτισης R είναι ελάχιστα μεγαλύτερος για τον νόμο SEL δηλαδή πρακτικά οι δύο νόμοι εμφανίζονται ισοδύναμοι. Στην δεύτερη σειρά όμως όπου υπήρξε και το πρόβλημα με το πλάτος της λωρίδας φόρτισης η μοντελοποίηση περιορίστηκε στα τρία μεγαλύτερα δοκίμια χωρίς να συμπεριληφθούν και τα δοκίμια του μικρότερου μεγέθους. Εκεί παρατηρούμε ότι ο νόμος του MFSL συμφωνεί καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα από τον νόμο SEL.

Πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, ως προς ποιος νόμος περιγράφει καλύτερα την πραγματικότητα, θα μπορούσαν να είχαν προκύψει εάν το εύρος των μεγεθών ήταν μεγαλύτερο από το συγκεκριμένο. Αυτό το οποίο όμως επιβεβαιώνεται είναι ότι στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη όσο μικρότερο είναι το δοκίμιο τόσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι και η εφελκυστική αντοχή.

7.11 Σχολιασμός και ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων στη μονοαξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων.

Η αστοχία της θλίψης αποτελεί φαινόμενο το οποίο δεν έχει κατανοηθεί πλήρως από την επιστημονική κοινότητα. Αυτό συμβαίνει παρόλο το γεγονός ότι το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται κυρίως για τη θλιπτική αντοχή του. Τα φαινόμενα κλίμακας βέβαια εμφανίζονται στη θλίψη και στον έμμεσο εφελκυσμό. Υπάρχει όμως εξαίρεση στον τρόπο και στις προϋποθέσεις υπό τις οποίες εμφανίζονται. Ο Bazant αναφέρεται στην αιτία για την ύπαρξη φαινομένων κλίμακας στη θλίψη. Μόνο εάν η αστοχία συνοδευτεί από μία καθολική απελευθέρωση της ενέργειας μπορεί να υπάρξουν φαινόμενα κλίμακας. Αυτό βέβαια μπορεί να συμβεί μόνο εάν η αστοχία προκύψει από την επέκταση ζώνης ρωγμών κάθετα στο θλιπτικό πεδίο τάσεων. Αυτός ο μηχανισμός έχει προαναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3. Ο Bazant υποστηρίζει μάλιστα ότι στα μικρά δοκίμια δεν θα υπάρξουν φαινόμενα κλίμακας. Υποστηρίζει ότι η αστοχία στα μικρά δοκίμια εμφανίζεται με τη μορφή διαχωριστικής ρωγμής παράλληλης με το θλιπτικό πεδίο τάσεων. Αυτή η μορφή αστοχίας εμφανίζεται όταν ολισθαίνουν τα άκρα του δοκιμίου. Επομένως δεν αναμένουμε να έχουμε την καθολική απελευθέρωση ενέργειας από το δοκίμιο κατά τη θραύση.

Τα πειραματικά δεδομένα της θλίψης της παρούσας εργασίας δεν συμφωνούν με την αναμενόμενη συμπεριφορά από τους νόμους των φαινομένων κλίμακας. Ενώ και οι δύο νόμοι, SEL και MFSL, δείχνουν ότι όσο πιο μικρό είναι το δοκίμιο τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η θλιπτική αντοχή του, αυτό δεν συμβαίνει. Αυτό το οποίο συμβαίνει είναι, όσο πιο μικρό είναι το δοκίμιο πράγματι η αντοχή αυξάνεται, φτάνουμε όμως σε ένα μέγεθος δοκιμίου που έχει την μέγιστη αντοχή. Από εκεί και πέρα μειώνοντας το μέγεθος του δοκιμίου έχουμε επίσης μείωση της αντοχής. Αυτό έρχεται σε αντίθεση και με τους δύο νόμους. Ο Bazant παρόλο που αναφέρει ότι είναι πιθανό να μην υπάρχουν φαινόμενα κλίμακας για μικρά μεγέθη δεν διευκρινίζει τι γίνεται ακριβώς.

Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν επίσης μια άλλη περίεργη τάση. Όχι μόνο υπάρχει ένα μέγεθος δοκιμίου το οποίο εμφανίζει μέγιστη αντοχή αλλά μάλιστα το μέγεθος του δοκιμίου αυτού φαίνεται ότι εξαρτάται από το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανών. Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται στο δοκίμιο με διάμετρο 4 ίντσες (10.16 cm) για το μίγμα με μέγιστο κόκκο αδρανών 15 mm ενώ για το μίγμα με μέγιστο κόκκο αδρανών 5mm εμφανίζεται στο δοκίμιο με διάμετρο 3 ίντσες (7.62 cm). Μειώνοντας τον μέγιστο κόκκο αδρανών μειώνεται και το μέγεθος του δοκιμίου για το οποίο εμφανίζεται η μέγιστη θλιπτική αντοχή. Βέβαια τα πειραματικά δεδομένα δεν επεκτείνονται σε τόσο μεγάλο εύρος μεγεθών ώστε να επιβεβαιωθεί το παραπάνω φαινόμενο. Τα πειράματα όμως των Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη έχουν αρκετά μεγάλο εύρος μεγεθών σε σχέση με τη διασπορά. Στα πειράματα αυτά επιβεβαιώνεται

ότι πράγματι υπάρχει μέγεθος δοκιμίου για το οποίο εμφανίζεται η μέγιστη αντοχή. Για μεγέθη μεγαλύτερα από αυτό η αντοχές μειώνονται όπως αναμένεται για τα φαινόμενα κλίμακας. Με άλλα λόγια τα φαινόμενα κλίμακας απαντώνται στη θλίψη για δοκίμια μεγαλύτερα ενός χαρακτηριστικού μεγέθους. Αντίθετα για μικρότερα μεγέθη του χαρακτηριστικού μεγέθους δεν ακολουθείται η αναμενόμενη τάση στη θλιπτική αντοχή. Αλλά μειώνεται με μία σχεδόν γραμμική μορφή.

Αυτό το οποίο προκαλεί εντύπωση είναι το πώς η μορφή των αποτελεσμάτων επαναλαμβάνεται. Στην πρώτη σειρά υπήρχαν δύο υποσειρές που δοκιμάστηκαν με διαφορά ενός μηνός, και στις δύο υποσειρές η μέγιστη αντοχή βρέθηκε για το δοκίμιο με διάμετρο 4 in.. Στην δεύτερη σειρά δεν υπήρχαν υποσειρές αντίθετα μάλιστα υπήρχε μόνο μία. Στην σειρά αυτή, με μίγμα με μέγιστο κόκκο 5mm, βρέθηκε μέγιστη θλιπτική αντοχή για τα δοκίμια με διάμετρο 3 in.. Στα πειράματα των Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη χρησιμοποιήθηκε μίγμα με μέγιστο κόκκο 4.76 mm, παρεμφερές δηλαδή με τη δεύτερη σειρά με μέγιστο κόκκο 5mm. Εκεί η μέγιστη αντοχή αντιστοιχούσε στα δοκίμια με διάμετρο 7.2 cm = 2.83 in. ≈ 3in.. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα οι δύο έρευνες πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά εργαστήρια, με διαφορετικό εξοπλισμό και όμως επαναλήφθηκαν τα ίδια αποτελέσματα.

Βέβαια, προκειμένου να υποστηρίξει κανείς ότι η τάση που παρατηρείται στα πειράματα αυτά είναι πραγματικό χαρακτηριστικό της ύλης πρέπει να επιβεβαιωθεί από πλήθος ερευνητών και μεγάλο αριθμό πειραμάτων.

Το ερώτημα που τίθεται εξαιτίας των αποτελεσμάτων αυτών είναι αφού εμφανίζεται η συγκεκριμένη τάση αντοχών στην θλίψη γιατί δεν εμφανίζεται κάτι ανάλογο και στον εφελκυσμό;

Σε σχέση βέβαια με τα μεγαλύτερα μεγέθη δοκιμίων, τα οποία ακολουθούν την αναμενόμενη συμπεριφορά αντοχών που περιγράφεται από τους δύο νόμους SEL και MFSL, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς τα αποτελέσματα των δύο υποσειρών της πρώτης σειράς. Εδώ έχουμε δοκίμια διαφορετικών μεγεθών του ίδιου όμως μίγματος. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο υποσειρών είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα θλίψης. Η πρώτη υποσειρά (τριών μηνών) ελέγχθηκε έναν μήνα πριν από την δεύτερη (τεσσάρων μηνών). Επομένως, όπως ήταν φυσικό η δεύτερη υποσειρά παρουσίασε μεγαλύτερες αντοχές. Αυτό το οποίο κεντρίζει την περιέργεια είναι ότι οι διαφορές των αντοχών μεταξύ των δοκιμίων διαφορετικής κλίμακας εξομαλύνθηκαν με το χρόνο. Η επίδραση της κλίμακας στην αντοχή φαίνεται ότι είναι ισχυρότερη για δοκίμια μικρότερης ηλικίας.

Η ύπαρξη τριών μόνο μεγεθών δοκιμίων στην πρώτη σειρά ανάγκασε τη διαδικασία της μοντελοποίησης να προσαρμοστεί και στα τρία αυτά μεγέθη. Η μοντελοποίηση με μόνο δύο μεγέθη δοκιμίων δεν θα είχε νόημα αφού η προσαρμογή φυσικά θα ήταν απόλυτη με $R = 1$. Επομένως, παρόλο που το μικρότερο μέγεθος δοκιμίου δεν ακολουθούσε την τάση των φαινομένων κλίμακας αλλά αντίθετα

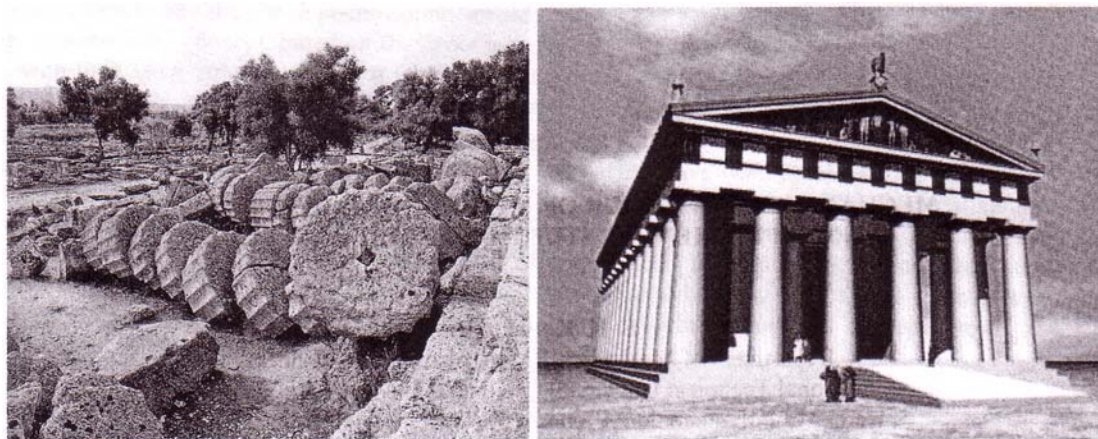
παρουσίασε μικρότερη αντοχή από το αμέσως μεγαλύτερο μέγεθος συμπεριλήφθηκε στη μοντελοποίηση με βάση τους δύο νόμους SEL και MFSL. Αυτό το γεγονός αλλά κυρίως εξαιτίας της εξομάλυνσης του φαινομένου μεταξύ των δύο υποσειρών προέκυψαν διαφορετικοί παράμετροι κατά τη μοντελοποίηση με τους δύο νόμους. Για τον νόμο SEL η παράμετρος θλιπτικής αντοχής, $f_c(SEL)$, προέκυψε 60.53 MPa για την πρώτη υποσειρά και 63.20 MPa για την δεύτερη. Ενώ, η παράμετρος $d_0(SEL)$ είναι 10 cm για την πρώτη υποσειρά και 28.45 cm για την δεύτερη. Υπάρχει δηλαδή μια μεγάλη διαφορά για την παράμετρο $d_0(SEL)$, ενώ η διαφορά της παραμέτρου $f_c(SEL)$ είναι αμελητέα. Για τον νόμο MFSL η παράμετρος ελάχιστης ονομαστικής θλιπτικής αντοχής $f_c(FMSL)$ είναι 31.88 MPa για την πρώτη υποομάδα ενώ είναι 48.43 MPa για τη δεύτερη. Η παράμετρος $l_{ch}(FMSL)$ είναι 11.83 cm για την πρώτη υποομάδα ενώ είναι 3.76 cm για την δεύτερη. Οι παράμετροι για τις δύο υποσειρές έπρεπε να συμφωνούν μεταξύ τους επειδή πρόκειται για δοκίμια του ίδιου μίγματος. Αυτό το οποίο επηρεάζει τις παραμέτρους είναι η εξομάλυνση του φαινομένου με το πέρασμα του χρόνου. Μελλοντικές μελέτες οφείλουν να συγκεντρώσουν την προσοχή τους στην πιθανή εξομάλυνση του φαινομένου με τον χρόνο. Δεν αποκλείεται να μειώνεται πολύ το φαινόμενο της κλίμακας μετά τη παρέλευση σημαντικής χρονικής περιόδου. Σε μία τέτοια περίπτωση οι διαφορές της θλιπτικής αντοχής μεταξύ δοκιμών διαφορετική κλίμακας θα οφείλεται σε διαφορές του ρυθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου.

7.12 Πρόσθετη πειραματική ένδειξη για την ύπαρξη ασυνέχειας των φαινομένων κλίμακας της μονοαξονικής θλίψης.

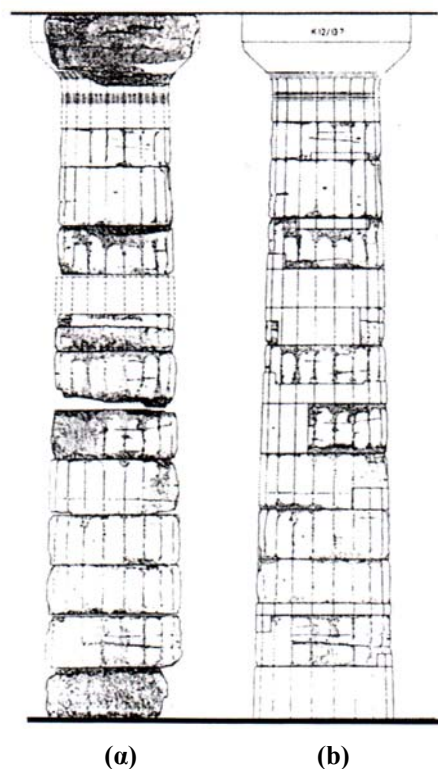
Στο πρόσφατο 7^ο Εθνικό Συνέδριο Μηχανικής στα Χανιά της Κρήτης στις 24-26 Ιουνίου 2004 ανακοινώθηκαν τα αποτελέσματα έρευνας που αφορούσε την ύπαρξη φαινομένων κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά φυσικών οικοδομικών λίθων (*). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε εξαιτίας των αναγκών ενός φιλόδοξου σχεδίου μερικής αναστήλωσης του αρχαίου ναού του Δία στην αρχαία Ολυμπία. Η αναστήλωση ενός αρχαίου μνημείου είναι μια εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία που απασχολεί πλήθος ειδικών. Αρχιτέκτονες, αρχαιολόγοι και πολιτικοί μηχανικοί συμμετέχουν στο σημαντικό αυτό έργο. Η γνώση σημαντικών χαρακτηριστικών του αρχαίου οικοδομικού υλικού, όπως είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, είναι απαραίτητη για την αποφυγή πιθανών βλαβών του οικοδομήματος. Οι κίονες του συγκεκριμένου ναού αποτελούνται από κυκλικά λαξευμένα τμήματα τα οποία τοποθετούνταν το ένα πάνω στο άλλο. Το φυσικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη λάξευση των τμημάτων προέρχεται από λατομεία κογχυόλιθου.

Η πρώτη φάση της αναστήλωσης συμπεριλαμβάνει την ανακατασκευή ενός κίονα από τα τμήματα τα οποία βρίσκονται σκορπισμένα δίπλα στον χώρο του ναού. Ο κίονας περιλαμβάνει 13

τμήματα από τα οποία τα δύο έχουν χαθεί ενώ τα υπόλοιπα 11 κατέχουν διάφορες βλάβες οι οποίες κατά την αναστήλωση θα επιδιορθωθούν χρησιμοποιώντας υλικό παρεμφερές με το αρχικό. Επομένως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του αρχικού υλικού έπρεπε να διερευνηθούν προκειμένου να γίνει σωστή επιλογή του υλικού πλήρωσης.



Σχ. 7.45 (α) Εικόνα από τα τμήματα του κίονα στον χώρο του ναού του Δία στην αρχαία Ολυμπία
(β) Εικονική ψηφιακή αναπαράσταση του ναού του Δία
 (Kourkoulis, 2004)

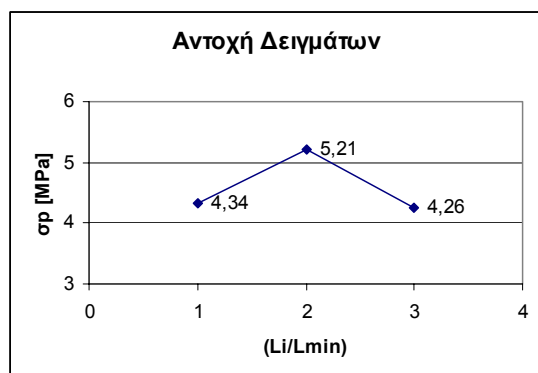


Σχ. 7.46
(α) Η κατάσταση των τμημάτων του κίονα
(β) Σχεδιάγραμμα του κίονα μετά την αναστήλωση
 (Kourkoulis, 2004)

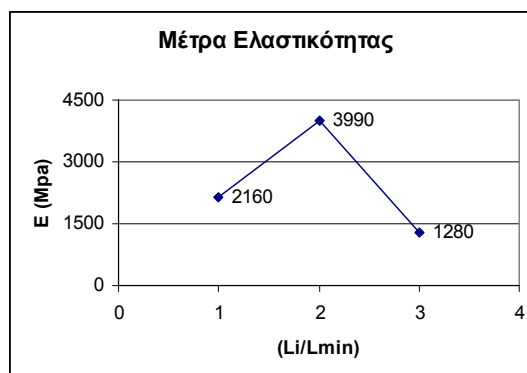
Ο κογχυόλιθος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως δομικό υλικό του συγκεκριμένου κίονα αποτελεί ένα ιζηματογενές πέτρωμα που περιέχει απολιθώματα κοχυλίων. Τα κοχύλια έχουν διαστάσεις που κυμαίνονται

από μερικά χιλιοστά μέχρι μερικά εκατοστά. Προκειμένου να διερευνηθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, με την άδεια της αρχαιολογικής υπηρεσίας, αποσπάστηκαν τμήματα πετρωμάτων από λατομείο του υλικού σε περιοχή της Αττικής που χρησιμοποιούσαν κατά την αρχαιότητα. Από το υλικό μορφώθηκαν κυλινδρικά δοκίμια σε τρία μεγέθη. Ο λόγος ύψους προς διάμετρο διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 2 προς εξασφάλιση γεωμετρικής ομοιότητας. Τα ύψη των κυλίνδρων ήταν: (CS1) 100 mm, (CS2) 200 mm και (CS3) 300 mm. Εξαιτίας της διάταξης των στρώσεων των απολιθωμάτων το υλικό χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία. Η μέγιστη αντοχή προκύπτει για τον άξονα κάθετο στις στρώσεις των κοχυλιών. Το κυλινδρικά δοκίμια κόπηκαν ώστε ο διαμήκης άξονας να είναι κάθετος στις στρώσεις. Ειδική μέριμνα υπήρξε προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιπεδότητα και η καθετότητα των άκρων στο διαμήκη κυλινδρικό άξονα.

Τα αποτελέσματα του Kourkoulis, που προέκυψαν δεν συμφωνούσαν με τα αναμενόμενα φαινόμενα κλίμακας. Αντίθετα μάλιστα συμφωνούν με τα ανάλογα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καθώς και των προαναφερόμενων πειραμάτων στο Α.Π.Θ.. Η μέγιστη αντοχή δεν προέκυψε για τα μικρότερα δοκίμια αλλά για τα δοκίμια ύψους 200 mm. Τα δοκίμια ύψους 300 mm είχαν μειωμένη θλιπτική αντοχή όπως αναμένονταν σύμφωνα με τη θεωρητική τάση των φαινομένων κλίμακας. Τα δοκίμια ύψους 100mm όμως αντί να παρουσιάσουν μεγαλύτερη αντοχή είχαν στην πραγματικότητα μικρότερη. Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής αλλά και των μέτρων ελαστικότητας παρουσιάζονται στα σχήματα 7.47 και 7.48 αντίστοιχα.



Σχ. 7.47 Θλιπτική Αντοχή



Σχ. 7.48 Μέτρα Ελαστικότητας

Στα παραπάνω διαγράμματα το μέγεθος Li είναι το ύψος του εκάστοτε κυλινδρικού δοκιμίου ενώ το Lmin το ύψος του μικρότερου δοκιμίου, τα 100 mm.

Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται για τα δοκίμια με ύψος 200 mm. Η διάμετρος των κυλινδρικών δοκιμίων αυτών είναι τα 100mm, δηλαδή περίπου 4 ίντσες. Το μέγιστο μέγεθος των απολιθωμένων κοχυλιών που περιέχονται στην κατασκευή του κογχυόλιθου είναι της τάξεως μερικών εκατοστών (2cm περίπου). Ένα μέγεθος παρόμοιο με τα 15mm του μέγιστου κόκκου αδρανών της πρώτης σειράς δοκιμίων σκυροδέματος

που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Και στα δοκίμια του σκυροδέματος η μέγιστη αντοχή προέκυψε για τα κυλινδρικά δοκίμια των τεσσάρων ιντσών διάμετρο. Υπάρχει δηλαδή συμφωνία στα πειραματικά αποτελέσματα.

(*) Η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Μηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου : **Kourkoulis S. K.** (2004) *Mechanical Behavior of natural building stones: an experimental study of the size effect* in Proceedings of the 7th National Congress on Mechanics, June 24-26, 2004, Chania, Greece.

7.13 Το μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ύλης. Διαφορετικά υλικά έχουν το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας. Στο σκυρόδεμα υπάρχει σχέση μεταξύ της αντοχής ενός μίγματος και του μέτρου ελαστικότητας. Αυτό είναι και λογικό αφού μεταξύ δύο μιγμάτων σκυροδέματος υπάρχουν σημαντικές διαφορές ως προς την σύνθεσή τους. Το ένα μίγμα μπορεί να έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αδρανή ή τσιμέντο σε σχέση με ένα άλλο. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε διαφορά στην αντοχή και συνεπώς στο μέτρο ελαστικότητας των μιγμάτων. Θα περίμενε κανείς όμως το μέτρο ελαστικότητας να παραμένει σχετικά σταθερό μεταξύ δοκιμών του ίδιου μίγματος αφού πρακτικά πρόκειται για το ίδιο υλικό. Αυτό που συμβαίνει βέβαια δεν συμφωνεί με την άποψη αυτή.

Στα πειράματα του Αναγνωστόπουλου - Εφραιμίδη, όπου οι μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας ήταν ιδιαίτερα εκτενείς εξαιτίας της ύπαρξης ηλεκτρομηκυνσιόμετρων σε όλα τα δοκίμια, προκύπτει κάτι ιδιαίτερα σημαντικό. Για τα δοκίμια με μεγέθη μεγαλύτερα από το μέγεθος του δοκιμίου με τη μεγαλύτερη αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει μικρές σχετικά διακυμάνσεις γύρω από μία μέση τιμή. Κάτι το οποίο βέβαια είναι αναμενόμενο αφού πρόκειται για το ίδιο υλικό, αλλά απλώς διαφέρει ως προς την κλίμακά του. Εντύπωση όμως προκαλεί η διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών για τα μικρότερα μεγέθη. Στα δοκίμια αυτά παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής, αντίθετα με την αναμενόμενη διακύμανση της αντοχής με βάση τους νόμους των φαινομένων κλίμακας. Σημαντική μείωση εμφανίζει και το μέτρο ελαστικότητας. Όσο μειώνεται η κλίμακα της κατασκευής τόσο αυξάνεται η απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας από την μέση τιμή των μεγαλύτερων δοκιμών. Ουσιαστικά συμπεριφέρεται ως άλλο υλικό.

Κάτι ανάλογο δεν παρατηρείται στα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών της παρούσας εργασίας. Δεν είχαν όμως όλα τα δοκίμια ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, επομένως δεν ήταν δυνατή η εύρεση της ακριβούς τιμής του μέτρου ελαστικότητας για όλα τα δοκίμια. Μόνο για ορισμένο αριθμό δοκιμών με strain gauges προέκυψαν ακριβή δεδομένα. Για όλα τα υπόλοιπα εκτιμήθηκε η πιθανή τιμή του μέτρου ελαστικότητας από την κλίση των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης εμβόλου (stroke) με βάση την μεθοδολογία που περιγράφεται στο

Κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με strain gauges μπορούν να παρατηρηθούν στα διαγράμματα των σχημάτων 6.69 - 6.72. Με βάση τα διαγράμματα αυτά βλέπει κανείς ότι ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών της πρώτης σειράς δεν ακολουθεί την λογική των αποτελεσμάτων των πειραμάτων Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη. Ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας των δοκιμών της δεύτερης σειράς επίσης δεν ακολουθεί την ίδια λογική. Αυτό βέβαια μπορεί να οφείλεται στο μικρό αριθμό δοκιμών από τα οποία προέκυψαν τα αποτελέσματα του μέτρου Ελαστικότητας για τα μικρότερα δοκίμια.

Η ανάλυση των κλίσεων των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης εμβόλου όμως καθόσον αφορά το μέτρο Ελαστικότητας οδήγησε σε διπλασιασμό του όγκου των δεδομένων. Έτσι προέκυψαν τα σχήματα 6.73 - 6.76. Οι μέσοι όροι των μέτρων ελαστικότητας όμως δεν συμφωνούν με την τάση που παρατηρείται στα πειράματα των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη. Στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρατηρείται η ίδια τάση και στα δύο μίγματα. Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την μείωση των διαστάσεων των δοκιμών. Βέβαια τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του κεφαλαίου 6 δεν είναι οι ακριβείς τιμές των μέτρων ελαστικότητας. Αποτελούν προσεγγιστικά αποτελέσματα που δείχνουν τα όρια ανάμεσα στα οποία πιθανώς να βρίσκεται η πραγματική τιμή των μέτρων ελαστικότητας. Επίσης η απουσία ικανοποιητικού αριθμού (υπάρχουν μόνο 2) μικρών δοκιμών ($D = 2 \text{ in.}$) με strain gauges στην παρούσα εργασία πιθανώς προκαλεί την ασυμφωνία που παρατηρείται ως προς τα μέτρα ελαστικότητας μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής και των πειραμάτων των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη. Υπάρχει όμως το θέμα του ειδικού βάρους.

Τα αποτελέσματα των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη για τα μέτρα ελαστικότητας των μικρότερων δοκιμών δεν είναι και απόλυτα αξιόπιστα. Οι σημαντικές διαφορές των μέτρων Ελαστικότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μικρότερα δοκίμια είναι από άλλο υλικό συγκριτικά με τα μεγαλύτερα. Η απουσία μετρήσεων σχετικά με την διακύμανση του ειδικού βάρους σε όλο το εύρος των μεγεθών των δοκιμών δεν μας επιτρέπει να ισχυριστούμε ότι πρόκειται για το ίδιο υλικό. Τα μικρότερα δοκίμια θα μπορούσαν να είχαν σημαντικά μικρότερο ειδικό βάρος από τα μεγαλύτερα. Στη περίπτωση αυτή η μείωση του μέτρου Ελαστικότητας με τη μείωση της κλίμακας είναι λογική.

Στην περίπτωση του κογχυόλιθου υπάρχει σημαντική μείωση του μέτρου ελαστικότητας για μεγαλύτερα μεγέθη. Ομοίως υπάρχει μείωση και για τα μικρότερα μεγέθη. Το κρίσιμο μέγεθος του δοκιμίου που εμφανίζει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή εμφανίζει επίσης και τη μέγιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Ομοίως και εδώ, η απουσία μετρήσεων σχετικά με την διακύμανση του ειδικού βάρους για όλα τα μεγέθη δεν μας επιτρέπει να ισχυριστούμε ότι πρόκειται για το ίδιο υλικό.

7.14 Πιθανός μηχανισμός φαινομένων κλίμακας.

Οι αντοχές που προέκυψαν από τον έμμεσο εφελκυσμό ακολουθούν την αναμενόμενη με βάση τους νόμους φαινομένων κλίμακας αύξηση με τη μείωση του μεγέθους του δοκιμίου. Στην περίπτωση όμως της θλίψης η αντοχή αυξάνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο μέγεθος δοκιμίου το οποίο μάλιστα καθορίζεται από το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανών. Για μεγέθη μικρότερα από αυτό η αντοχή μειώνεται. Γιατί συμβαίνει αυτή η ασυμφωνία συμπεριφοράς της αντοχής μεταξύ δοκιμίων του ίδιου μίγματος; Είναι η άποψη του συγγραφέα ότι η λύση βρίσκεται στα μέτρα ελαστικότητας.

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη δομή του σκυροδέματος. Εξαρτάται από τα αδρανή και το τσιμέντο. Αλλά κυρίως εξαρτάται από τη μεταβατική ζώνη, δηλαδή στην περιοχή μεταξύ των κόκκων των αδρανών και της υγιούς τσιμεντόπαστας. Μεταξύ δοκιμίων του ίδιου μίγματος το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών δεν διαφέρει, επειδή η κοκκομετρική τους διαβάθμιση είναι ίδια σε όλα τα δοκίμια. Ούτε μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας της υγιούς τσιμεντόπαστας γιατί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι ίδια για ένα δεδομένο μίγμα. Αυτό το οποίο πιθανώς διαφέρει όμως είναι η μεταβατική ζώνη. Η μεταβατική ζώνη επηρεάζει ιδιαίτερα το μέτρο ελαστικότητας επειδή συνδέει τα μέτρα ελαστικότητας των αδρανών και της τσιμεντόπαστας. Επομένως οι διαφορές των μέτρων ελαστικότητας των μικρότερων δοκιμίων με αυτά των μεγαλύτερων οφείλονται σε διαφορές της μεταβατικής ζώνης.

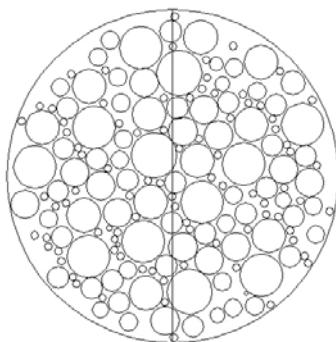
Από τα πειραματικά δεδομένα των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη προκύπτει ότι για τα μεγάλα δοκίμια το μέτρο ελαστικότητας δεν διαφέρει ιδιαίτερα. Για μικρότερα μεγέθη όμως το μέτρο ελαστικότητας αποκλίνει από το αναμενόμενο και μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους. Το κρίσιμο αυτό μέγεθος του δοκιμίου που χωρίζει τις δύο τάσεις του μέτρου ελαστικότητας είναι το ίδιο που εμφανίζει και τη μέγιστη αντοχή, το οποίο με την σειρά του επηρεάζεται από τις διαστάσεις του μέγιστου κόκκου. Η απουσία όμως δεδομένων σχετικά με τη διακύμανση του ειδικού βάρους σε όλο το εύρος των μεγεθών δεν μας επιτρέπει να ισχυριστούμε ότι πρόκειται για το ίδιο υλικό.

Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας το μέτρο Ελαστικότητας αυξάνεται μονοτονικά με τη μείωση των διαστάσεων των δοκιμίων. Παρατηρείται δηλαδή φαινόμενο κλίμακας στις τιμές των μέτρων Ελαστικότητας. Αντίθετα με την περίπτωση των πειραμάτων των Αναγνωστόπουλου και Εφραιμίδη το μέτρο ελαστικότητας δεν ακολουθεί την λογική της αντοχής στα πειράματα της παρούσας εργασίας. Η μείωση της αντοχής στα μικρότερα δοκίμια δεν συνοδεύεται και από μείωση του μέτρου Ελαστικότητας. Αντίθετα μάλιστα το μέτρο Ελαστικότητας αυξάνεται. Η τάση αύξησης του μέτρου ελαστικότητας

και η παράλληλη μείωση της αντοχής για μεγέθη μικρότερα από κάποια κρίσιμη διάσταση έχει πρόσφατα επιβεβαιωθεί με αριθμητική μέθοδο από τους Giannakopoulos A. και Stamoulis K. (2004).

Σχετικά με τη θλιπτική αντοχή, αυτό το οποίο πιθανώς συμβαίνει είναι η μεταβολή των αποστάσεων μεταξύ των αδρανών για διαφορετικά μεγέθη δοκιμίων. Τα αδρανή, είτε εξαιτίας της μεθόδου συμπύκνωσης είτε εξαιτίας κάποιου άλλου λόγου, τείνουν να πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους στα μικρότερα δοκίμια. Όσο ο διαθέσιμος χώρος μειώνεται, ελαχιστοποιούνται και η αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει όταν το μίγμα είναι ακόμα νωπό. Για δοκίμια με μέγεθος μικρότερο του κρίσιμου οι μεταβατικές ζώνες που περιβάλλουν τα αδρανή τείνουν να πλησιάζουν και να ενωθούν μεταξύ τους. Όσο μειώνεται η κλίμακα της κατασκευής τόσο περισσότερο εμπλέκονται οι μεταβατικές ζώνες μεταξύ τους. Η ύπαρξη όμως μη υγιούς τσιμεντοπολτού ανάμεσα στα αδρανή οδηγεί στη μείωση της θλιπτικής αντοχής με τη μείωση του μεγέθους. Αποτέλεσμα είναι να παρατηρείται μια γενικότερη αστάθεια και να αστοχούν τα δοκίμια σε χαμηλότερο θλιπτικό φορτίο. Με την αύξηση του μεγέθους όμως αυξάνονται και οι αποστάσεις μεταξύ των αδρανών με αποτέλεσμα να υπάρχουν ευρύτερες ζώνες υγιούς τσιμεντοπολτού για να μεταφέρουν τις δυνάμεις. Όσο αυξάνεται το εύρος τους όμως αυξάνεται και η πιθανότητα να υπάρχουν μικρορωγμές και ατέλειες από τις οποίες ξεκινάει και η αστοχία. Το φαινόμενο βέβαια εξομαλύνεται καθώς η κλίμακα της κατασκευής αυξάνεται. Έτσι οι αντοχές σε θλίψη ακολουθούν τη λογική των φαινομένων κλίμακας για μεγέθη μεγαλύτερα μιας κρίσιμης τιμής.

Μέσω του μηχανισμού αυτού οδηγούμαστε σε ένα αντίστροφο φαινόμενο κλίμακας, για μεγέθη μικρότερα μιας κρίσιμης τιμής, το οποίο εμφανίζεται μόνο για τη θλίψη και συμβαίνει για λόγους που δεν έχουν τίποτα να κάνουν με τα κανονικά φαινόμενα κλίμακας. Εξάλλου ακόμα και ο Bazant αναφέρεται στο γεγονός ότι για μικρά δοκίμια δεν εμφανίζονται φαινόμενα κλίμακας επειδή η αστοχία δεν συνοδεύεται από καθολική απελευθέρωση ενέργειας.



Σχ. 7.49 Όσο πλησιέστερα είναι τα αδρανή τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας αστοχίας καλύπτεται από αυτά.

Αν συμβαίνουν τα παραπάνω τότε γιατί δεν εμφανίζεται ανάλογη συμπεριφορά των αντοχών και στα πειράματα του έμμεσου εφελκυσμού; Ο λόγος που συμβαίνει αυτό βασίζεται πιθανότητα στο

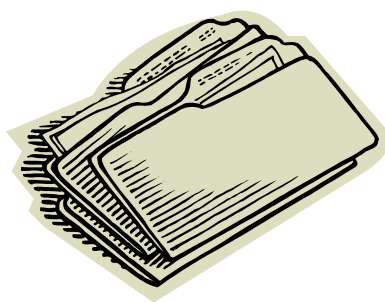
μηχανισμό αστοχίας για το εκάστοτε είδος φόρτισης της δοκιμής. Στον έμμεσο εφελκυσμό η μέγιστη αντοχή σχετίζεται με την εμφάνιση και επέκταση ρωγμών που συνδέει τις δύο γενέτειρες των λωρίδων φόρτισης. Όσο μειώνεται το μέγεθος της κατασκευής τόσο πλησιέστερα είναι οι κόκκοι των αδρανών. Επομένως τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο αριθμός των αδρανών που θα τέμνουν την επιφάνεια αστοχίας. Στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη η αστοχία επέρχεται με τον διαχωρισμό του δοκιμίου στη μέση. Η ρωγμή συνήθως δεν παρακάμπτει τα αδρανή που τέμνουν την επιφάνεια αστοχίας. Αντίθετα μάλιστα τα διαπερνά. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι η εφελκυστική τάση εμφανίζει μέγιστη τιμή για μία πολύ μικρή ζώνη εγκάρσια στην επιφάνεια αστοχίας. Όσο πλησιέστερα είναι τα αδρανή τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας αστοχίας θα τέμνεται από αδρανή. Επομένως για την επέκταση της ρωγμής και το διαχωρισμό του δοκιμίου θα απαιτηθεί υψηλότερο φορτίο.

Η μείωση των αποστάσεων μεταξύ των αδρανών πρέπει να συνοδεύεται και από διαφορές στο ειδικό βάρος των δοκιμίων. Όσο πλησιέστερα είναι να αδρανή τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το ειδικό βάρος. Οι μετρήσεις για τα ειδικά βάρη που αναφέρονται στο κεφάλαιο 7.3 υποστηρίζουν την άποψη αυτή. Ιδιαίτερα τα ειδικά βάρη των δοκιμίων της δεύτερης σειράς δείχνουν πράγματι μία μείωση της μέσης τιμής με την αύξηση της κλίμακας. Τα ειδικά βάρη της πρώτης σειράς δείχνουν και αυτά μείωση από τα δοκίμια με διάμετρο 4 ίντσες σε σύγκριση με τα δοκίμια διαμέτρου 6 ίντσών. Δείχνουν όμως αύξηση του ειδικού βάρους με την αύξηση της διαμέτρου από 3 σε 4 ίντσες. Οι διαφορές είναι της τάξης του 0.5%. Εξάλλου οι διαφορές των αποστάσεων είναι ελάχιστες και επομένως ανάλογης κλίμακας θα είναι και οι διαφορές του ειδικού βάρους. Εξάλλου όσο πυκνότερη η ύλη τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας. Κάτι που συμβαίνει στα πειράματα της παρούσας εργασίας.

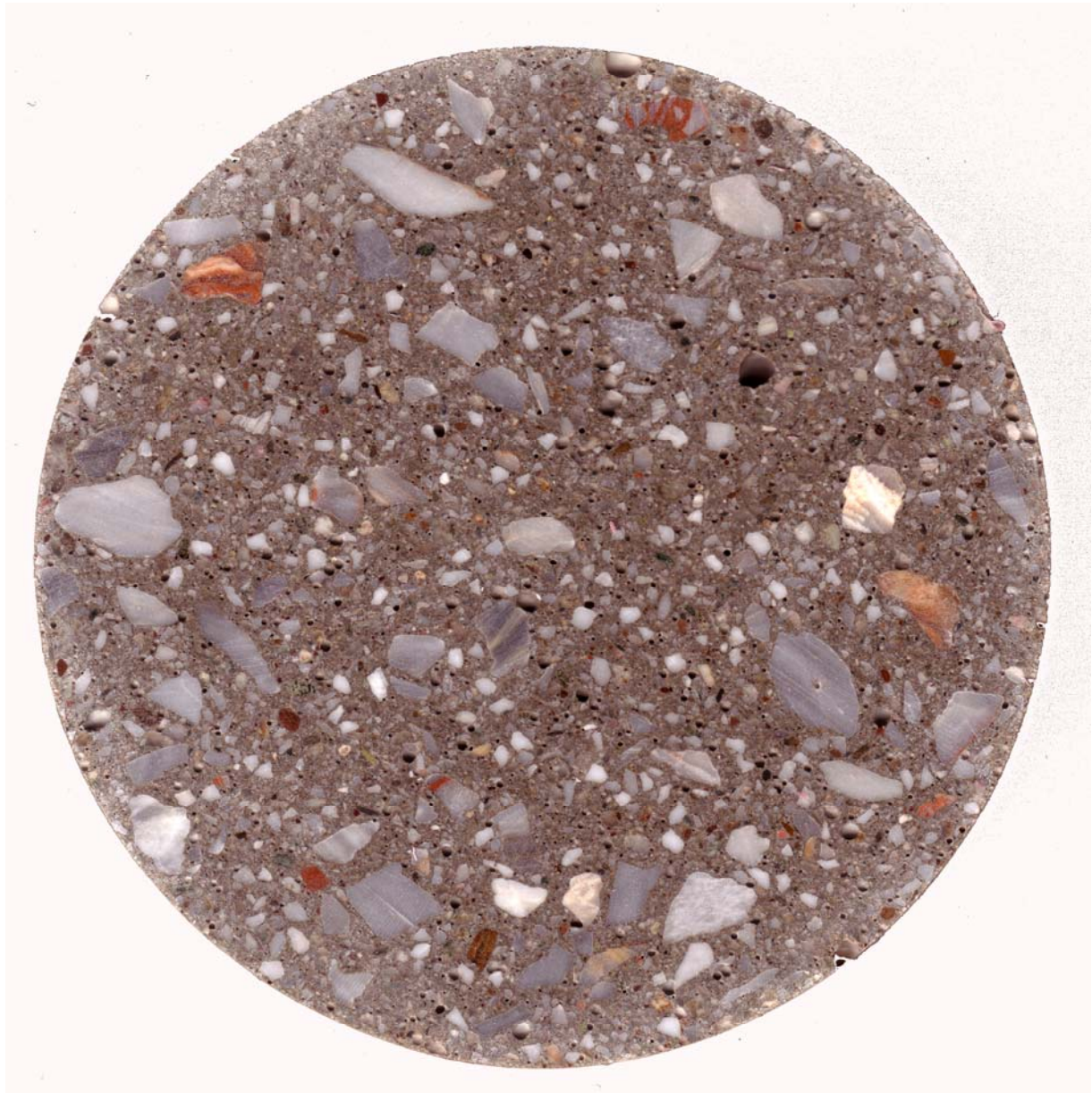
Ο μηχανισμός αστοχίας τόσο στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη όσο και στη μονοαξονική θλίψη επηρεάζεται από την διαδρομή που ακολουθεί η ρηγματώση στο μικροσκοπικό επίπεδο μέσα στο δοκίμιο σε σχέση με το μέγεθος των αδρανών και το ποσοστό της διαμέτρου που καλύπτουν. Η ρωγμή θα ακολουθήσει τη διαδρομή που θα υποδείξει το τασικό πεδίο σε σχέση με τις αδυναμίες του υλικού. Στη περίπτωση του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη η ρωγμή θα αναπτυχθεί κατά μήκος της διαμέτρου γιατί απλώς εκεί υπάρχει το τασικό πεδίο εφελκυσμού. Όμως, στην περίπτωση της θλίψης το θλιπτικό τασικό πεδίο δρά σε όλη την διατομή του υλικού με αποτέλεσμα οι ρωγμές να είναι ελεύθερες να αναπτυχθούν οπουδήποτε μέσα στην μάζα του δοκιμίου. Στη θλίψη οι ρωγμές επιχειρούν να παρακάμψουν τους μεγάλους κόκκους των αδρανών. Επομένως όσο μεγαλύτεροι είναι οι κόκκοι των αδρανών συγκριτικά με τη διάμετρο, για μεγέθη δοκιμίων μικρότερα μιας κρίσιμης τιμής, τόσο περισσότερο υποβαθμίζεται η αντοχή.

Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται σε έναν πιθανό μηχανισμό εμφάνισης φαινομένων κλίμακας που να εξηγεί τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν. Αποτελεί άποψη του συγγραφέα και αναφέρεται ως πιθανότητα. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί πρέπει να πραγματοποιηθεί πλήθος ερευνών και να ελεγχθούν οι αποστάσεις των αδρανών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Αυτό βέβαια δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

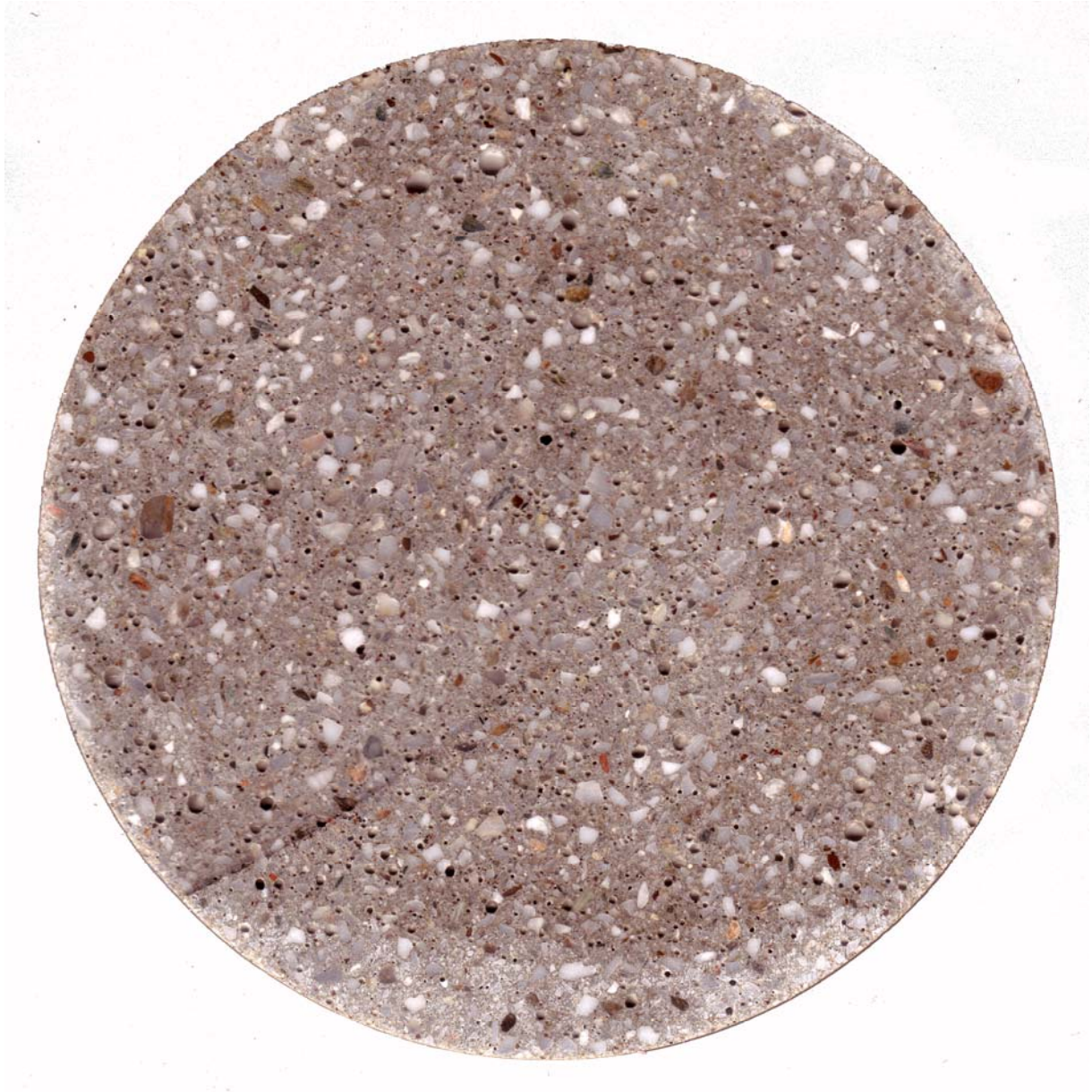
Παράρτημα



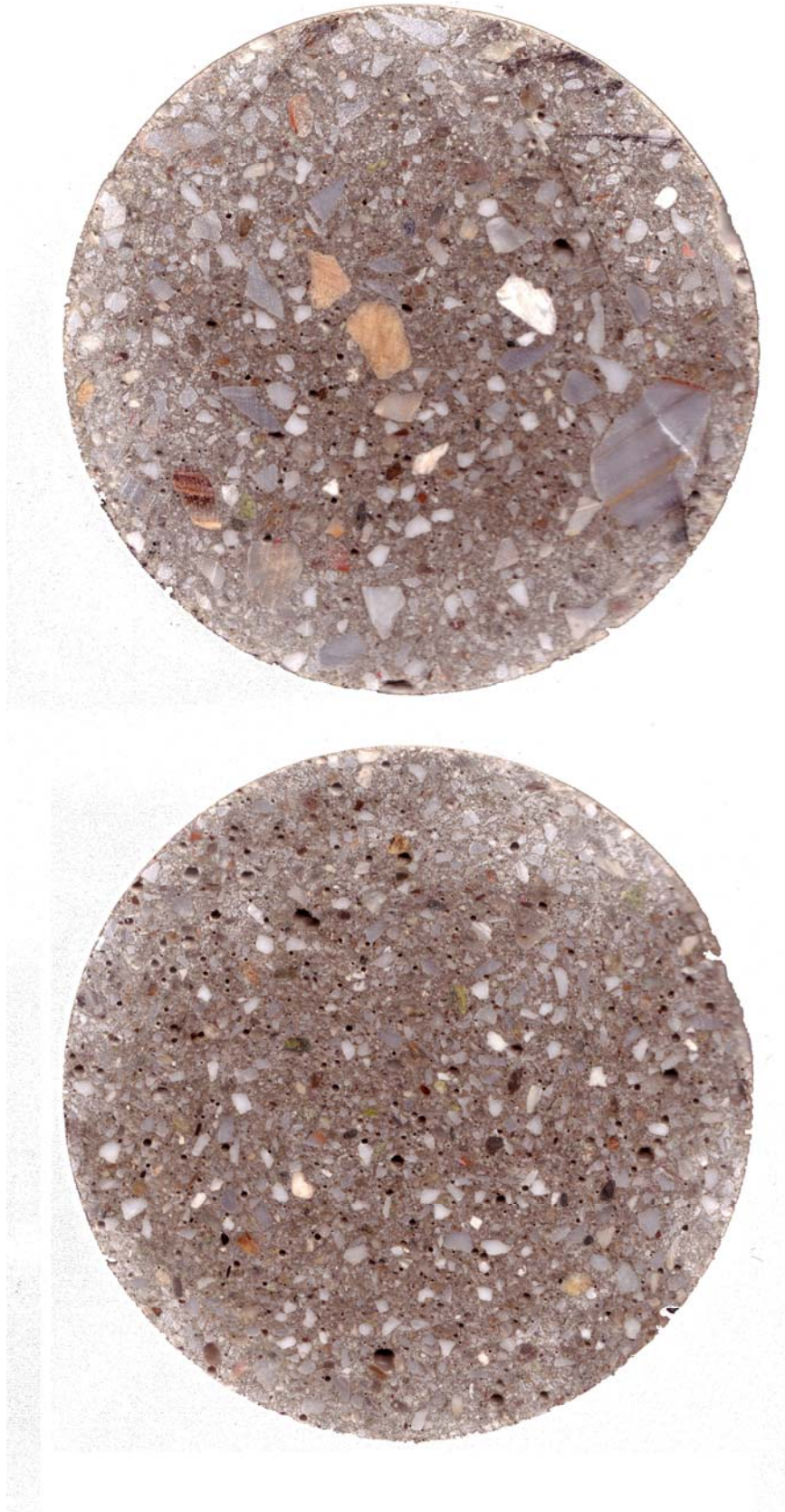
Εικόνα υψηλής ευκρίνειας μικροδομής δίσκου κάθετα στον κύριο άξονα δοκιμίου διαμέτρου 6 in. του πρώτου μίγματος σκυροδέματος με μέγιστο κόκκο αδρανών 15 mm. (Κλίμακα 1:1)



Εικόνα υψηλής ευκρίνειας μικροδομής δίσκου κάθετα στον κύριο άξονα δοκιμίου διαμέτρου 6 in. του δευτέρου μίγματος σκυροδέματος με μέγιστο κόκκο αδρανών 5 mm. (Κλίμακα 1:1)



Εικόνες υψηλής ευκρίνειας μικροδομής δίσκων κάθετα στον κύριο άξονα δοκιμίων διαμέτρου 4 in. του πρώτου και δεύτερου μίγματος σκυροδέματος με μέγιστο κόκκο αδρανών 15 και 5 mm, αντίστοιχα. (Κλίμακα 1:1)



Επιφάνειες θραύσης στη μονοαξονική θλίψη



Επιφάνειες θραύσης στον έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη



Βιβλιογραφία

Βιβλία και Δημοσιεύσεις



1. **Abrams, D. A.** (1922) *Flexural strength of plain concrete*, Proc. Am. Concr. Inst., 18, pp.20-50
2. **Adamson R. M., Dempsey J. P., DeFranco S. J. and Xie Y.** (1995) *Large scale in situ ice fracture experiments. Part 1 Experimental Aspects* Ice Mechanics 1995, J. P. Dempsey and Y. D. S. Rajapakse, eds. The American Society of Mechanical Engineers New York pp.107 – 128 (AMD Vol. 207, ASME Summer meeting Los Angeles CA.)
3. **Aifantis E.C.** (1996) *Higher order gradients and size effects* In: Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures, Ed. A. Carpinteri, pp. 231-242, E & FN Spon, London.
4. **Aifantis E.C.** (1999) *Strain gradient interpretation of size effects*, Int. J. Fracture 95, 299-314
5. **Akcaoglou T., Tokyay M. and Celik T.** (2003) *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*. Elsevier - Cement and Concrete Composites 0958-9465/03
6. **Anagnostopoulos C. and Efremidis G.** (2003) *Experimental investigation on size effects in compressive strength of grouted sand* in: Book of Abstracts of the 5th European Solid Mechanics Conference – 5th ESMC, Ed. E.C. Aifantis, pp. 371-372, Thessaloniki
7. **Anagnostopoulos C. and Efremidis G.** (2004) *Size effect in Compressive Strength of Grouted Sand – Part 1: Experiments* Journal of the Mechanical Behavior of the Material. (To appear)
8. **Ashby M. F. and Hallam S. D.** (1986) *The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states* Acta. Metall. 34(3), 497-510
9. **Barenblatt G. I.** (1959) *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture, general ideas and hypothesis, axially symmetric cracks* Prikl. Mat. Mech. 23(3) 434-444
10. **Barenblatt G. I.** (1962) *The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture* Adv. Appl. Mech. 7, 55-129
11. **Batto R. A. and Schulson E. M.** (1993) *On the ductile-to-brittle transition in ice under compression* Acta Metall. Mater., 41(7), 2219-2225
12. **Bazant Z. P.** (1967) *Stability of continuum and compression strength* Bulletin RILEM, 39, 99-112. (In French)
13. **Bazant Z. P.** (1984a) *Size effect in blunt fracture. Concrete rock metal* Journal of Engineering Mechanics ASCE 110, 518-535
14. **Bazant Z. P.** (1994a) *Size effect in tensile and compressive quasibrittle failures*. In Size Effect in Concrete Structures, H. Mihashi, H. Okamura and Z.P. Bazant, eds., E & FN Spon, London, pp. 161 -180
15. **Bazant Z. P. and Cao Z.** (1986) *Size effect in brittle failure of unreinforced pipes* ACI J. 83(3), 369-373
16. **Bazant Z. P. and Cao Z.** (1987) *Size effect in punching shear failure of slabs* ACI Struct. J. 84, 44-53
17. **Bazant Z. P. and Cedolin L.** (1991) *Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories*, Oxford University Press, New York.
18. **Bazant Z. P. and Kim J. K.** (1984) *Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams* ACI J. 81, 456 – 468. (Discussion and closure 82, 579 – 583)
19. **Bazant Z. P. and Kwon Y. W.** (1994) *Failure of slender and stocky reinforced columns: Tests of size effect*. Mater. Struct., 27, 79-90
20. **Bazant Z. P. and Ozbolt J.** (1992) *Compression failure in quasibrittle material: Nonlocal microplane model* J. Eng. Mech. ASCE, 118(3), 540-556

21. **Bazant Z. P. and Pfeiffer P. A.** (1986) Shear Fracture Tests on Concrete Material Struct. 19, 111-121
22. **Bazant Z. P. and Pfeiffer P. A.** (1987) Determination of fracture energy from size effect and brittleness number. ACI Material Journal 84(6) 463-480
23. **Bazant Z. P. and Kazemi M. T.** (1988) Size dependence of concrete fracture energy determined by RELEM work-of-fracture method, Int. J. Fracture, 121, 121-138
24. **Bazant Z. P. and Kazemi M. T.** (1991) Size effect in diagonal shear failure of beams without stirrups ACI Struct. J. 88(3) 268 – 276
25. **Bazant Z. P. and Gettu R.** (1992) Rate effects and load relaxation: Static fracture of concrete ACI Material Journal 89(5) 456 – 468
26. **Bazant Z. P. and Sener S.** (1988) Size Effect in pullout tests ACI Mater. J. 85 347 – 351
27. **Bazant Z. P. and Sun H. H.** (1987) Size effect in diagonal shear failure Influence of aggregate size and stirrups ACI Material Journal 84 259 – 272
28. **Bazant Z. P. and Xiang Y.** (1997) Size effect in compressive fracture: splitting crack band propagation J. Eng. Mech. ASCE, 123(2), 162-172
29. **Bazant Z. P., Lin F. B. and Lippmann H.** (1993) Fracture energy release and size effect in borehole breakout Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 17, 1-14
30. **Bazant Z. P. , Sener S. and Prat P. C.** (1988) Size effect tests of the torsional failure of plain and reinforced concrete beams Mater. Struct. 21 425 – 430
31. **Bazant Z. P., Daniel I. M. and Li Z.** (1996) Size effect and fracture of composite laminates J. Eng. Mater. Technol. T. ASME 118, 317 – 324
32. **Bazant Z.P., Gettu R. and Kazemi M.T.** (1991) Identification of nonlinear fracture properties from size effect tests and structural analysis based on geometry dependent R curves. Int. j. Rock Mech. Min. Sci. 28(1) 43 – 51
33. **Bazant Zdenek P., Planas Jaime** (1998) Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials. CRC Press ISBN 0-8493-8284-X
34. **Bazant Z. P., Kazemi M.T., Hasegawa T., and Mazars J.** (1991) Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis ACI Materials Journal V.88, No 3, May-June 1991
35. **Bieniawski Z. T.** (1974) Estimating the strength of rock materials J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 74, 312-320
36. **Biot M. A.** (1965) Mechanics of Incremental Deformations, John Wiley & Sons , New York
37. **Blackman J. S., Smith D. M. and Young L. E.** (1958). Stress distribution affects ultimate tensile strength, J. Am. Conc. Inst., 55, 675-684
38. **Blanks R. F. and McNamara C. C.** (1935) Mass concrete tests in large cylinders ACI J., 31, 280-303
39. **Bruhwiller, E., Broz, J.J., Saouma, V.E.,** (1991) Fracture model evaluation of dam concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 3, pp. 235-251.
40. **Carneiro, F.L.L. and Barcellos, A.** (1953) Tensile Strength of Concrete RILEM Bulletin, 13,97-123
41. **Carpinteri A. and Chiaia B.** (1997) Multifractal Scaling Laws in the Breaking Behavior of Disordered Materials Pergamon Chaos, Solitons & Fractals Vol. 8 No. 2, pp 135-150
42. **Carpinteri, A. and Ferro, G.,** (1994) Size effect on tensile fracture properties: A unitary explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure, Materials and Structures, 27, pp. 563-571.

43. **Carpinteri A. and Ferro G.** (2003) New Experimental Aspects of Concrete in Compression 16th Congresso AIMETA di Meccanica Teorica ed Applicata.
44. **Carpinteri A. , Chiaia B and Ferro G.** (1995) Size effect on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. Materials and Structures, 28, 311 -317
45. **Carpinteri A., Chiaia B., Ferro G.** (1995) Multifractal Scaling Law: An Extensive Application to Nominal Strength Size Effect of Concrete Structures. Politecnico Di Torino Dipartimento Di Ingegneria Strutturale Ati Del Dipartimento
46. **Carter B. C.** (1992) Size and stress gradient effects on fracture around cavities Rock Mech. Rock Eng. 25(3), 167-186.
47. **Carter B. C., Lajtai E. Z. and Yuan Y.** (1992) Tensile fracture from circular cavities loaded in compression Int. J. Fracture, 57, 221-236
48. **Chen W. F. and Yuan R. L.** (1980) Tensile Strength of concrete, double punch test J. Struct. Div. ASCE, 106, 1673-1693
49. **Costin D. M.** (1991) Damage Mechanics in the post failure regime Mech. Mater., 4, 149-160
50. **Cotterell B.** (1972) Brittle fracture in compression Int. J. Fract. Mech. 8(2) 195-208
51. **Cotterell B. και Rice J. R.** (1980) Slightly curved or kinked cracks Int. J. Fracture, 16, 155-169
52. **Davies J. (1992)** Macroscopic study of crack bridging phenomenon in mixed mode loading. In Fracture Mechanics of Concrete Structures, Z. P. Bazant, ed., Elsevier Applied Science, pp. 713 – 718
53. **Davies J. (1995)** Study of shear fracture in mortar specimens Cement and Concrete Research, 25(5), 1031-1042
54. **Droz P. and Bazant Z. P.** (1989) Nonlocal analysis of stable states and stable paths of propagation of damage shear bands. In cracking and Damage, Strain Localization and Size Effect, J. Mazars and Z. P. Bazant, eds., Elsevier Applied Science, London, pp. 183-207
55. **Efremidis G.** (2002) On the theory of gradient elasto-plasticity and scale phenomena, Ph.D. thesis, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (in Greek)
56. **Efremidis G. and Anagnostopoulos C.** (2004) Size effect in Compressive Strength of Grouted Sand – Part 2: Modeling of Experimental Data Journal of the Mechanical Behavior of the Material. (To appear)
57. **Elinghausen R. and Ozbolt J.** (1990) Size effect in anchorage behavior In Fracture behavior and design of materials and structures Vol 2, D. Firrao ed Engineering Materials advisory services Ltd. (EMAS), Warley, West Midlands U.K. pp. 721 - 727
58. **Fathy A. M.** (1992) Application of fracture mechanics to rocks and rocky materials Doctoral Thesis Universidad Politecnica de Madrid, Departamento de Ciencia de Materiales, ETS de Ingenieros de Caminos, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain (In English)
59. **Freudenthal A. M.** (1968) Statistical approach to brittle fracture In Fracture – An Advanced Treatise, Vol. 2, H. Liebowitz, ed. Academic press, New York. pp. 591 – 619
60. **Gettu R., Bazant Z. P. and Karr M. E.** (1990) Fracture properties and brittleness of high strength concrete ACI Material Journal 87 608-618
61. **Giannakopoulos A. and Stamoulis K.** (2004) Structural analysis of MEMS Submitted to publication.

62. **Gonnermann H. F.** (1925) Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete Proc. ASTM 25, 237-250
63. **Griffith A. A.** (1921) The Phenomena of rupture and flow in solids Philos. T. Roy. Soc. A, 221, 163-197
64. **Griffith A. A.** (1924) The theory of rupture In Proceedings of the first international conference of applied mechanics pp 55-63
65. **Gustafsson. P. J. and Hillerborg A.** (1985) Improvements in concrete design achieved through the application of fracture mechanics In Application of fracture mechanics to cementitious composites, S. P. Shah ed., Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 667 – 680
66. **Haimson B. C. and Herrick C. G.** (1989) In-situ stress calculation from borehole breakout experimental studies In Proc., 26th U.S. Symp. on Rock Mechanics, pp. 1207-1218
67. **Harris H. G., Sabnis G. M.** (1999) Structural Modeling and Experimental Techniques – Second Edition. CRC Press ISBN 0-8493-2469-6
68. **Harris H. G., Schwindt R., Taher I. and Werner S.** (1963) Techniques and Materials in the Modeling of Reinforced Concrete Structures under Dynamic loads, Report R63-54, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, December; also NCEL-NBY-3228, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme CA.
69. **Hasegawa T., Shioya T. and Okada T.** (1985) Size-effect on splitting tensile strength of concrete In Proc. Japan Concrete inst. 7th Conf., pp. 309-312
70. **Hawkes I. and Mellor M.** (1970) Uniaxial testing in rock mechanics laboratories Eng. Geol., 4, 177-285
71. **Hoek E. and Bieniawski Z. J.** (1965) Brittle fracture propagation in rock under compression Int. J. Fract. Mech., 1, 137-155
72. **Horii H. and Nemat-Nasser S.** (1982) Compression induced non planar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockburst. J. Geophys. Res. 87, 6806-6821
73. **Horii H. and Nemat-Nasser S.** (1986) Brittle failure in compression, splitting, faulting and brittle ductile transition Philos. T. Roy. Soc., 319(1549), 337-334
74. **Inglis C. E.** (1913) Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners T. Inst. Naval Architects, 55, 219 – 241
75. **Ingraffea A. R.** (1977) Discrete Fracture propagation: Laboratory tests and finite element analysis. Doctoral Thesis, University of Colorado, Boulder
76. **Irwin G. R.** (1958) Fracture In Handbuck der Physik Vol 6 Flugge ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 551-590
77. **Jenq Y. S. and Shah S. P.** (1985a) A fracture toughness criterion for concrete Eng. Fract. Mech. 21(5) 1055-1069
78. **Jenq Y. S. and Shah S. P.** (1985b) Two parameters fracture model for concrete Journal Eng. Mech. –ASCE 111(10) 1227-1241
79. **Jishan X. and Xixi H.** (1990) Size effect on the strength of a concrete member Eng. Fract. Mech., 35, 687-696
80. **Johnson R. P.** (1962) Strength tests on scaled-sown concretes suitable for models, with a note on mix design, Mag. Concrete Res., 14(40), March
81. **Kachanov M.** (1982) A microcrack model of rock inelasticity – Part I. Frictional sliding on microcracks Mech. Mater., 1, 19-41
82. **Kadlecek V. and Spetla Z.** (1977) How size and shape of specimens affect the direct tensile strength of concrete, Tech. Dig. (Prague), 9, 865-872

83. **Kemeny J. M. and Cook N. G. W.** (1987) *Crack models for the failure of rock under compression* In proc. 2nd Int. Conf. on Constitutive Laws for Eng. Mat., Vol. 2, C. S. Desai et al., eds., Elsevier Science Publisher, New York, pp. 879-887
84. **Kemeny J. M. and Cook N. G. W.** (1991) *Micromechanics of deformation in rock* In Toughening Mechanisms in Quasibrittle Materials, S. P. Shah, ed., Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 155-188
85. **Kendall K.** (1978) *Complexities of compression failure* Philos. T. Royal Soc.A, 361, 254-263
86. **Kim, J.K., Eo, S.H.,** (1990) *Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks*, Magazine of Concrete Research, 42, pp. 233-238.
87. **Kourkoulis S. K.** (2004) *Mechanical Behavior of natural building stones: an experimental study of the size effect* in Proceedings of the 7th National Congress on Mechanics, June 24-26, 2004, Chania, Greece Vol. 2 pp. 1-8
88. **Kraft J. M., Sullivan A. M. and Boyle R. W.** (1961) *Effect of dimensions on fast fracture instability of notched sheets* In Proc. of the Crack-Propagation Symposium Vol. 1 pp. 8-28
89. **Lehner F. and Kachanov M.** (1996) *On modeling of "winged" cracks forming under compression* Int. J. Fracture, 77, R65-R75
90. **Malhotra V. M.** (1969), *Effect of specimen size on tensile strength of concrete*, Report of Department of energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, June, 9 pp.
91. **Marti P.** (1989) *Size effect in double punch tests on concrete cylinders* ACI Materials Journal 86(6), 597 – 601
92. **McKinney K. R. and Rice R. W.** (1981) *Specimen size effects in fracture toughness testing of heterogeneous ceramics by the notch beam method*. In Fracture Mechanics Methods for Ceramics, Rocks, and Concrete, S. W. Freiman and E.R. Fuller Jr. eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.118 – 126. (ASTM Special Technical Publication No. 745)
93. **van Mier J. G. M.** (1986) *Multiaxial strain-softening of concrete; Part 1: Fracture; Part 2: Load histories* Mater. Struct., 19 (111), 179-200
94. **Modeer M.** (1979) *A fracture mechanics approach to failure analysis of concrete materials* Report No. TVBM-1001, Division of building materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
95. **Mulmule S. V., Dempsey J. P. and Adamson R. M.** (1995) *Large scale in situ ice fracture experiments Part II Modeling aspects* Ice Mechanics 1995, J. P. Dempsey and Y. D. S. Rajapakse, eds. The American Society of Mechanical Engineers New York pp.107 – 128 (AMD Vol. 207, ASME Summer meeting Los Angeles CA.)
96. **Nemat-Nasser S. and Obata M.** (1988) *A microcrack model of dilatancy in brittle material* J. Appl. Mech.-T ASME, 55, 24-35
97. **Neville A. M.** (1966) *A general relation for strengths of concrete specimens on different shapes and sizes*, Proc. Am. Concrete Inst., 63, 1095-1110
98. **Nesetova V. and Lajtai E. Z.** (1973) *Fracture from compressive stress concentration around elastic flaws* Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, 265-284
99. **Nixon W. F.** (1996) *Wing crack models of the brittle compressive failure of ice*. Cold Reg. Sci. Technol., 24, 41-55
100. **Οικονόμου Ν.** (1999) *Σημειώσεις Δομικών Υλικών Ι* - Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.

101. **Οικονόμου Ν.** (1998) *Σημειώσεις Δομικών Υλικών II* – Τεχνολογία Σκυροδέματος – Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας.
102. **Paul B.** (1968) *Macroscopic criteria for plastic flow and brittle fracture* In Fracture- An advanced Treatise Vol2 H. Liebowitz, ed., Academic Press, New York, pp. 313-496. (Chapter 4)
103. **Perdikaris P.C. and Romeo A.** (1995) *Size effect on the Fracture energy of Concrete and Stability Issues in Three-Point Bending Fracture Toughness Testing* ACI Materials Journal, 92, 483 - 495
104. **Popovics Sandor** (1998) *Strength and Related Properties of Concrete – A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-14903-9
105. **Rice J. R.** (1968a) *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks* Journal Applied Mechanics T ASME, 35, 379-386
106. **Rice J. R.** (1968b) *Mathematical analysis in the mechanics of fracture* In Fracture – An Advanced Treatise Vol. 2, H. Liebowitz, ed. Academic press, New York. pp. 191 – 308
107. **Rocco C., Guinea G. V., Planas J. and Elices M.** (1995) *The effect of boundary conditions on the cylinder splitting strength* In fracture mechanics of concrete structures F.H. Wittmann, ed., Aedificatio Publishers, Freiburg, Germany, pp. 75-84
108. **Ross, C.A., Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W.** (1989) *Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression* ACI Materials journal 86 (5), 475 - 781
109. **Sabnis G. M. and Mizra S. M.** (1979) *Size effect in model concretes?* Structural Journal Div. ASCE, 106, 1007-1020
110. **Sabnis G. M. and White R. N.** (1967) *A gypsum mortar for small scale models*, Proc. Am. Concr. Inst., 64(11), November, 767-774
111. **Sammis C. G. and Ashby M. F.** (1986) *The failure of brittle porous solids under compressive stress state* Acta. Metall., 34(3), 511-526
112. **Sanderson T. J. O.** (1988) *Ice Mechanics Risks to offshore Structures*, Graham and Trotman, Bosotn
113. **Schulson E. M.** (1990) *The brittle compressive fracture of ice* Acta. Metall. Mater., 38, 1963-1976
114. **Schulson E. M. and Nickolayev O. Y.** (1995) *Failure of columnar aline ice under biaxial compression: failure envelopes and the brittle-to-ductile transition*. J. Geophys. Res., 100(B11), 22383-22400
115. **Sener S.** (1992) *Bond Spice Tests* In FIP92 Symposium G. Tassi ed., Hungarian Scientific Society of Building Budapest pp. 357 – 362
116. **Shetty D. K., Rosenfield A. R. and Duckworth W. H.** (1986) *Mixed mode fracture of ceramics in diametrical compression*. J. Am. Ceram. Soc., 69(6), 437-443
117. **Tang T., Shah S.P. and Ouyang C.** (1992) *Fracture mechanics and the size effect of concrete in tension* J. of Struct. Eng. ASCE 118 (11), 3169-3185
118. **Triantafillou T. X.** (1997) Δομικά Υλικά. Πάτρα
119. **Walsh P. F.** (1972) *Fracture of Plain Concrete*, Indian Concrete J. 46(11) 469 – 470 και 476
120. **Weibull W.** (1939) *A statistical theory of the strength of materials* Proc. Royal Swedish Academy of Engineering Science, 151, 1-45
121. **Wright P. J. F.** (1952) *The effect of the method of test on the flexural strength of concrete* Mag. Concrete Res., 11, 67-76

-
122. **Yuan Y. Y., Lajtai E. Z. and Ayari M. L.** (1993) *Fracture nucleation from a compression parallel finite- width elliptical flaw* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 30(7), 873-876

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας