

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Διπλωματική εργασία:
Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Σύμμικτων Πλακών
Σκυροδέματος

Φοιτητές: **Γιαννόπουλος Αλέξανδρος-Χρήστος**
Παπαχρήστου Κων/νος



Επιβλέπων Καθηγητής:
Περδικάρης Φίλιππος
Καθηγητής

Συνεπιβλέποντες Καθηγητές:
Μυστακίδης Ευριπίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής

Μωρέττη Μαρίνα
Διδάσκουσα Π.Δ. 407/80

Βόλος, Ακαδημαϊκό έτος 2004-2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3331/1

Ημερ. Εισ.: 26-09-2005

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ

2005

ΓΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Χρήση , Συμπεριφορά και Τύποι Αστοχίας Σύμμικτων Πλακών Σκυροδέματος

- 1.1 Ιστορική αναδρομή
- 1.2 Σύμμικτες πλάκες
- 1.3 Η σπουδαιότητα της συνάφειας σκυροδέματος - χαλυβδόφυλλου
- 1.4 Συμπεριφορά και τύποι αστοχίας
- 1.5 Διατμητική αντοχή για πλάκες χωρίς ακραία αγκύρωση
- 1.6 Μέθοδος m-k
- 1.7 Μέθοδος μερικής διατμητικής σύνδεσης EC4
- 1.8 Κρίσιμο διατμητικό μήκος L_s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Πειραματική Διαδικασία κατά EC4

- 2.1 Πειραματική διάταξη
- 2.2 Προετοιμασία δοκιμίων πλακών
- 2.3 Διαδικασία φόρτισης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Υλικά και Πειραματική Διάταξη

- 3.1 Κατασκευή των δοκιμίων σύμμικτων πλακών σκυροδέματος
 - 3.1.1 Ξυλότυπος
 - 3.1.2 Σκυροδέτηση
- 3.2 Συντήρηση
- 3.3 Υλικά
 - 3.3.1 Χαλυβδόφυλλο
 - 3.3.2 Σκυρόδεμα
- 3.4 Ελάσματα «προρηγμάτωσης» πλακών
- 3.5 Περιγραφή πειραματικής διάταξης
 - 3.5.1 Περιγραφή σερβοϋδραυλικού συστήματος

επιβολής φορτίου

3.5.2 Χαρακτηριστικά σιδηροδοκών φόρτισης και
στήριξης των δοκιμίων (των σύμμικτων πλακών)

3.5.3 Περιγραφή μετρητικού συστήματος-αισθητήρων

3.5.3.1 Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges)

3.5.3.2 Μηκυνσιόμετρα (DCDT)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Υπολογισμοί Χαρακτηριστικών Μεγεθών Αντοχής των υπό Εξέταση Δοκιμίων ($M_{pl,rd}$, V_{rd} , M_{cr}) με Εξισώσεις κατά EC4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών

5.1 Επεξήγηση παραμέτρων πειράματος

5.2 Πείραμα A1

5.3 Πείραμα A2

5.4 Πείραμα B1

5.5 Πείραμα B2

5.6 Πείραμα B3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Σύγκριση Αποτελεσμάτων Πειραμάτων

6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων SLAB_240A
και SLAB_240B

6.2 Εφαρμογή της μεθόδου m-k στα πειραματικά
αποτελέσματα της σειράς δοκιμίων 'B'

6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων σειράς δοκιμίων 'B'

6.4 Σύγκριση των πειραματικών αντοχών με τις αντίστοιχες
που προβλέπει ο EC4

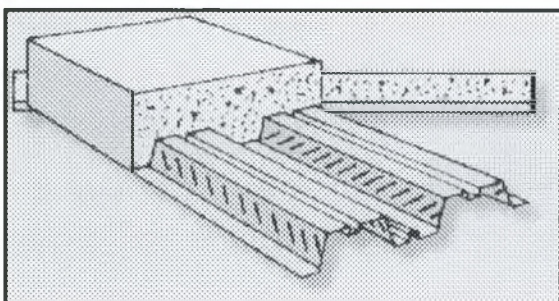
6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων PUC-Rio de Janeiro

6.6 Συμπεράσματα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των σύμμικτων πλακών έχει αποδειχθεί με το πέρασμα των χρόνων ως ένα από τα οικονομικότερα συστήματα κατασκευής. Παρά τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι σύμμικτες πλάκες, κυρίως για ιστορικούς λόγους και ελλείψει τεχνογνωσίας, ο ελληνικός κλάδος των οικοδομών και των τεχνικών έργων δεν έχει υιοθετήσει πλήρως τις δυνατότητες του συγκεκριμένου δομικού συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας



γίνεται σχολιασμός των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση δοκιμίων σύμμικτων πλακών που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας και

Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό της αντοχής των σύμμικτων πλακών που αστοχούν λόγω σχετικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια των δύο υλικών χάλυβα-σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια πλακών προσομοιώματα αμφιέριστων πλακών.

Πιο συγκεκριμένα στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το διατιθέμενο θεωρητικό υπόβαθρο που προτείνεται από τους εκάστοτε κανονισμούς για την ανάλυση και την πειραματική διερεύνηση των σύμμικτων πλακών.

Στο **κεφάλαιο 2** παρατίθεται η πειραματική διαδικασία που προτείνει ο Ευρωκώδικας 4.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων των πλακών από το καλούπωμα μέχρι τη σκυροδέτηση. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και εργαστηριακοί έλεγχοι αντοχής χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Γίνεται περιγραφή του σερβουϋδραυλικού συστήματος επιβολής φορτίου και του μετρητικού συστήματος αισθητήρων.

Στο **κεφάλαιο 4** υπολογίζονται αναλυτικά οι αντοχές (για κάθε μορφή αστοχίας) των υπό εξέταση δοκιμίων κάνοντας χρήση των εξισώσεων που προτείνει ο Ευρωκώδικας 4.

Στο **κεφάλαιο 5** γίνεται σχολιασμός των παραμέτρων που εξετάστηκαν στα συγκεκριμένα πειράματα και παρατίθενται λεπτομερώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε πείραμα: Διαγράμματα Συνολικού φορτίου-μέγιστου βέλους κάμψης, Διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου, Διαγράμματα φορτίου-σχετικής ολίσθησης, Διαγράμματα φορτίου – ανηγμένων παραμορφώσεων.

Στο **κεφάλαιο 6** γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα με τα αποτελέσματα αντίστοιχων πειραμάτων που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία. Γίνεται σχολιασμός της συμπεριφοράς επί του συνόλου των δοκιμών των πλακών. Και τέλος συγκρίνονται οι αντοχές που προέκυψαν από τα πειράματα με τις αντίστοιχες που προκύπτουν με την εφαρμογή των εξισώσεων που προτείνει ο EC4.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ Φίλιππο Περδικάρη που χωρίς την καθοδήγηση του και τις απαραίτητες συστάσεις που μας έκανε δεν θα μπορούσαμε να την φέρουμε εις πέρας. Επίσης να ευχαριστήσουμε τους συνεπιβλέποντες καθηγητές κ Ευριπίδη Μυστακίδη και την κα Μαρίνα Μωρέττη και τον για τις επισημάνσεις τους και τους κυρίους Αλέκο Κουσελίνη, Δημήτρη Καραμπερόπουλο και Ηλία Παππά για την τεχνική υποστήριξή τους στην εκτέλεση των πειραμάτων. Τέλος την συνάδερφο Ελένη Ταρναρά για την βοήθειά της στην εύρεση της απαραίτητης βιβλιογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 - Ιστορική αναδρομή

Τα σύμμικτα δομικά στοιχεία εμφανίζονται για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1920 στην Ιαπωνία, όπου ηλωτές δικτυωτές δοκοί και ηλωτά υποστυλώματα σύνθετων διατομών από γωνιακά εγκιβωτίζονταν σε σκυρόδεμα. Στην Ευρώπη, η χρήση σύμμικτων δοκών ξεκίνησε στη Γερμανία στα τέλη του 1940, σε μια εποχή έλλειψης του χάλυβα.

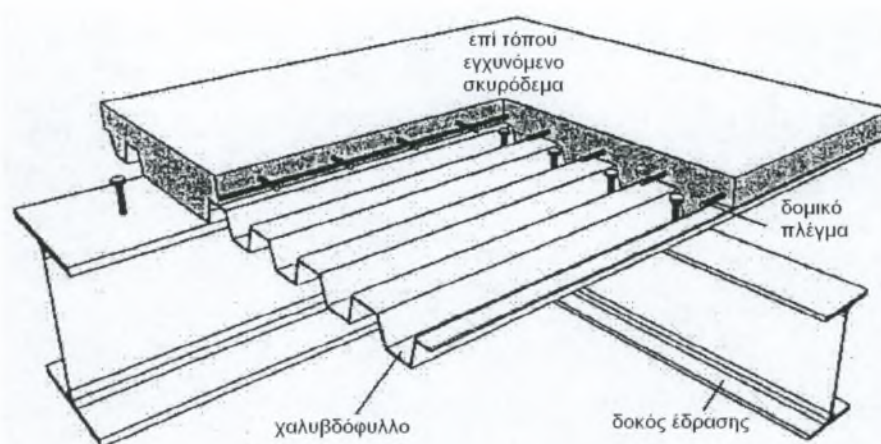
Το 1956 εκδόθηκε και ο πρώτος σχετικός κανονισμός DIN 4239 «Σύμμικτες δοκοί σε κτίρια» βασιζόμενος στην ελαστική θεωρία και την μέθοδο των επιτρεπομένων τάσεων. Η χρήση όμως σύμμικτων στοιχείων σε κτίρια, γνώρισε μεγάλη άνθηση κυρίως στη δεκαετία του '80 με προεξέχουσα τη Μεγάλη Βρετανία, όπου οι κατασκευές αυτές κατέχουν το 60% της αγοράς σε κτιριακά έργα. Στην Ιαπωνία, τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 64%, στις Η.Π.Α. 50%, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη περίπου 33%.

Σήμερα, έχει συνταχθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (C.E.N.), ο Ευροκώδικας 4 (EC4), που αφορά αποκλειστικά τις σύμμικτες κατασκευές και περιέχει τους κανόνες σχεδιασμού και εκτέλεσης δομικών έργων από σύμμικτα στοιχεία. Πρόκειται για έναν Κανονισμό, στον οποίο έχει ενσωματωθεί η γνώση και η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών, τεχνικών και επιστημόνων που έχουν ασχοληθεί με τέτοιου είδους κατασκευές.

Στον ελλαδικό χώρο οι σύμμικτες κατασκευές δεν είναι τόσο διαδεδομένες κυρίως γιατί μέχρι τώρα δεν υπήρχε γνώση και εμπειρία στον τομέα αυτό. Λόγω όμως της λειτουργικότητας, της ταχύτητας ανέγερσης και της οικονομίας των σύμμικτων κατασκευών το είδος αυτό των κατασκευών αναμένεται να γνωρίσει σύντομα και στην Ελλάδα την αποδοχή που έχει όχι μόνο στην υπόλοιπη Ευρώπη και και σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.2 – Σύμμικτες Πλάκες

Οι σύμμικτες πλάκες σκυροδέματος αποτελούνται από χαλυβδόφυλλο τυποποιημένης διατομής και από επί τόπου εγχυόμενο σκυρόδεμα. Κατασκευαστικά χρησιμοποιείται δομικό πλέγμα για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά την μεταφορά (αν πρόκειται για προκατασκευασμένες πλάκες) και λόγω συστολής ξήρανσης. Πρόσθετα στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ήλοι υψηλής αντοχής σε διάτμηση για την ενίσχυση του φέροντος στοιχείου στη λειτουργία του ως σύμμικτο. (Σχήμα 1.2.1)



Σχήμα 1.2.1 – Σύμμικτη πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη σε μεταλλική κατασκευή.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύμμικτων πλακών είναι ότι :

- Περιορίζουν τη δαπάνη εργασίας στο εργοτάξιο, διότι τα χαλυβδόφυλλα τοποθετούνται γρήγορα στη θέση τους
- Απαλείφουν τελείως τη χρήση ξυλότυπου διότι η έγχυση του σκυροδέματος γίνεται κατευθείαν πάνω στην προσφερόμενη από τα πτυχωτά χαλυβδόφυλλα επιφάνεια.
- Η επιφάνεια των χαλυβδόφυλλων προσφέρεται ως επιφάνεια εργασίας αμέσως μετά την τοποθέτησή τους.
- Οι πτυχώσεις του χαλυβδόφυλλου στην κάτω παρειά της πλάκας αποτελούν έτοιμες “φωλιές” για ενσωμάτωση εγκαταστάσεων.

- Από τη συνεργασία των δύο υλικών αυξάνει η αντοχή της πλάκας ή αντίστοιχα μειώνεται το υλικό και το νεκρό φορτίο της κατασκευής, με άμεση συνέπεια στη διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων και της θεμελίωσης και γενικότερα στην οικονομία του έργου.
- Επιταχύνεται ο ρυθμός εργασίας καθόσον δεν χρειάζεται να περιμένει κανείς να αποκτήσει ορισμένη αντοχή η πλάκα δαπέδου για να προχωρήσει το έργο στον επόμενο όροφο, διότι δεν στηρίζεται επί της άλλης.
- Προσφέρεται αμέσως ελεύθερος χώρος για συνέχιση των εργασιών.

Για να μπορεί κανείς να έχει αντικειμενική εκτίμηση στην επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου πρέπει να αναφερθούν και ορισμένα μειονεκτήματα που προκύπτουν κυρίως από την ύπαρξη των πτυχωτών χαλυβδόφυλλων :

- Για να εξασφαλισθεί η προβλεπόμενη συνεργασία σκυροδέματος και χαλυβδόφυλλου μέσω συνάφειας, πρέπει η επιφάνεια των πτυχωτών χαλυβδόφυλλων να είναι τελείως απαλλαγμένη από σκόνες και λιπαρές ουσίες. Η απομάκρυνση τους, όταν υπάρχουν, έχει δυσκολίες.
- Βρεγμένο ή και λαδωμένο κατάστρωμα σημαίνει αυξημένο κίνδυνο ατυχημάτων λόγω ολισθηρότητας, που τείνει πολλές φορές να απαλείψει κάθε άλλο κατασκευαστικό πλεονέκτημα.
- Η απαιτούμενη ανάγκη εκτεταμένων και συγχρόνως δαπανηρών δοκιμών για εξακρίβωση της αντοχής τους.
- Η ύπαρξη του πτυχωτού χαλυβδόφυλλου μπορεί να γίνει μειονέκτημα εάν παρατηρηθούν τοπικές ή εκτεταμένες καταστροφές των πτυχώσεων του, λόγω της κίνησης ή της προσωρινής αποθήκευσης βαρειών υλικών μεμονωμένων φορτίων (όπως παλέτες με οπτόπλινθους).

1.3 – Η σπουδαιότητα της συνάφειας σκυροδέματος χαλυβδόφυλλου

Η συνεργασία των δυο υλικών σημαίνει αλληλεπίδραση μεταξύ τους και μεταφορά διατμητικών δυνάμεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος χαλυβδόφυλλου. Κατά συνέπεια εξασφάλιση της συνεργασίας σημαίνει και ασφαλή σύνδεση μεταξύ των δυο υλικών. Για τον σκοπό αυτό τοποθετούνται ειδικής μορφής χαλύβδινες προεξοχές στην χαλύβδινη επιφάνεια επαφής ώστε να επιτευχθούν οι εξής δύο στόχοι :

- Η ασφαλής ανάληψη της διατμητικής ροής μεταξύ των επιφανειών επαφής (χάλυβας - σκυρόδεμα) για να εξασφαλισθεί η συνεργασία των δυο υλικών και έτσι να περιορισθεί η σχετική ολίσθησή τους.
- Η παρεμπόδιση της απομάκρυνσης των επιφανειών μεταξύ τους ώστε να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των δυο υλικών.

Η σπουδαιότητα της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χαλυβδόφυλλου γίνεται πιο κατανοητή συγκρίνοντας πειραματικά τις συμπεριφορές σύμμικτων δοκών όπου τα δυο υλικά συνδέονται στη μία περίπτωση μόνο με τη συνάφεια και στην άλλη χρησιμοποιώντας μεταλλικά βλήτρα.

1.4 – Συμπεριφορά και τύποι αστοχίας

Οι σύμμικτες πλάκες πρέπει να είναι σχεδιασμένες επαρκώς έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα αστοχήσουν λόγω των παρακάτω μορφών αστοχίας:

1. Σε καμπτική αστοχία (κρίσιμη διατομή I στο μέσον του ανοίγματος για αμφιέριστη πλάκα, Σχήμα 1.4.1).

Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας θα είναι κρίσιμη εφόσον έχει επιτευχθεί πλήρης διατμητική σύνδεση στην διεπιφάνεια των δύο υλικών. Καμπτική αντοχή της διατομής κατά τον κανονισμό ορίζεται ως $M_{pl,rd}$.

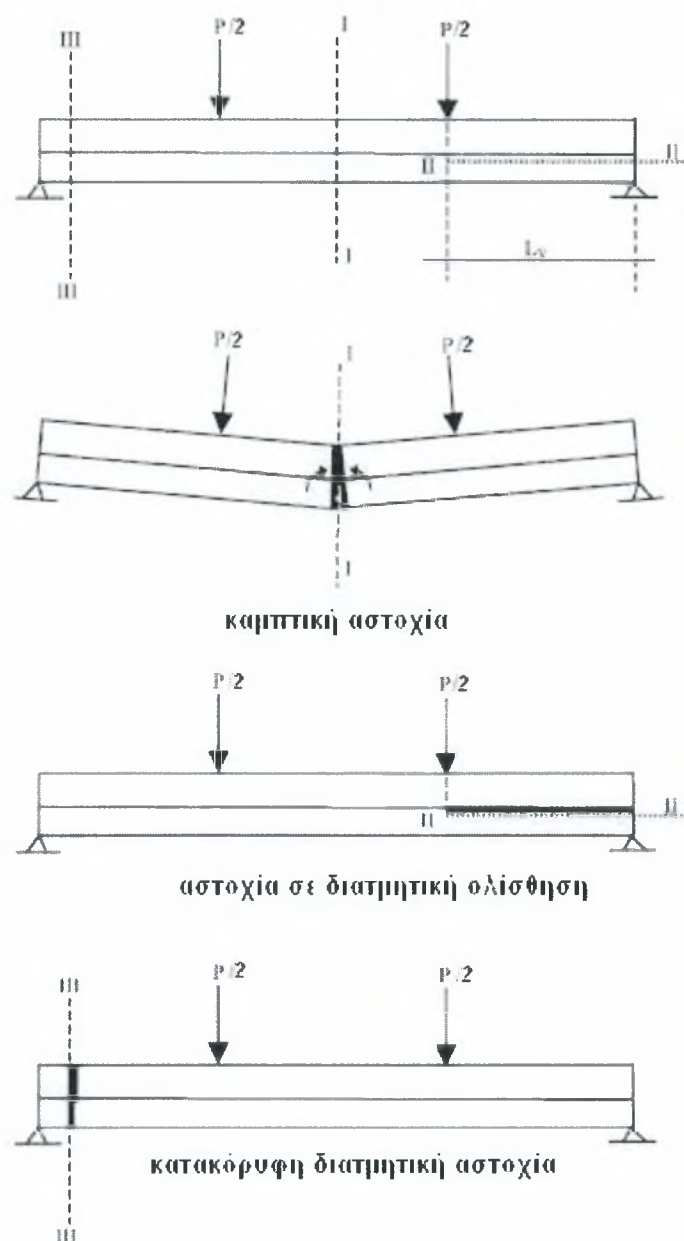
Κατά την καμπτική αστοχία παρατηρούνται κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές (κάθετα στις κύριες εφελκυστικές τάσεις) στο μέσον του ανοίγματος.

2. Σε διατμητική αστοχία κατά μήκος της διεπιφάνειας του σκυροδέματος και του χαλυβδόφυλλου (κρίσιμη διατομή II κοντά σε μια από τις στηρίξεις, Σχήμα 1.4.1).

Στη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας το μέγιστο φορτίο προσδιορίζεται από την αντοχή της διατμητικής σύνδεσης και όχι από την καμπτική αντοχή της, (δηλαδή στη διατομή I δεν φτάνουμε στο όριο της καμπτικής αντοχής $M_{pl,rd}$). Διατμητική αντοχή κατά μήκος της διεπιφάνειας ορίζεται κατά τον Κανονισμό EC4 ως $V_{I,rd}$.

Η διατμητική αστοχία κατά μήκος της διεπιφάνειας εκδηλώνεται ως σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών (χαλυβδόφυλλο, σκυρόδεμα) στις άκρες του δοκιμίου της πλάκας, για φορτίο μικρότερο αυτού που προκαλεί καμπτική αστοχία.

Η απουσία σχετικής ολίσθησης δηλώνει πλήρη διατμητική σύνδεση και καμπτική αστοχία (I).



Σχήμα 1.4.1 - Κρίσιμη διατομή ανάλογα με τον τύπο αστοχίας σε σύμμικτες πλάκες σκυροδέματος.

3. Σε διατμητική αστοχία (κρίσιμη διατομή III σε μια από τις στηρίξεις, Σχήμα 1.4.1).

Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας θεωρείται κρίσιμη σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε μεγάλου πάχους και μικρού ανοίγματος πλάκες με σχετικά μεγάλο μεγέθους φορτία. Διατμητική και αντοχή σε διάτρηση κατά τον Κανονισμό EC4 ορίζεται ως $V_{v,rd}$ και $V_{p,rd}$.

1.5 – Διατμητική αντοχή πλακών χωρίς ακραία αγκύρωση

Η μέγιστη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-χαλυβδόφυλλου προκύπτει από την ακόλουθη ημιεμπειρική σχέση :

$$V_{l,rd} = \frac{b \cdot d_p}{\gamma_{vs}} \cdot \left[\left(\frac{A_p}{b \cdot L_s} \right) \cdot m + k \right]$$

Όπου b (mm) : πλάτος της σύμμικτης πλάκας

A_p (mm²) : εμβαδόν της ενεργούς, στην ανάληψη εφελκυσμού, διατομής του χαλυβδόφυλλου

d_p (mm) : απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου από την άνω ίνα της πλάκας σκυροδέματος

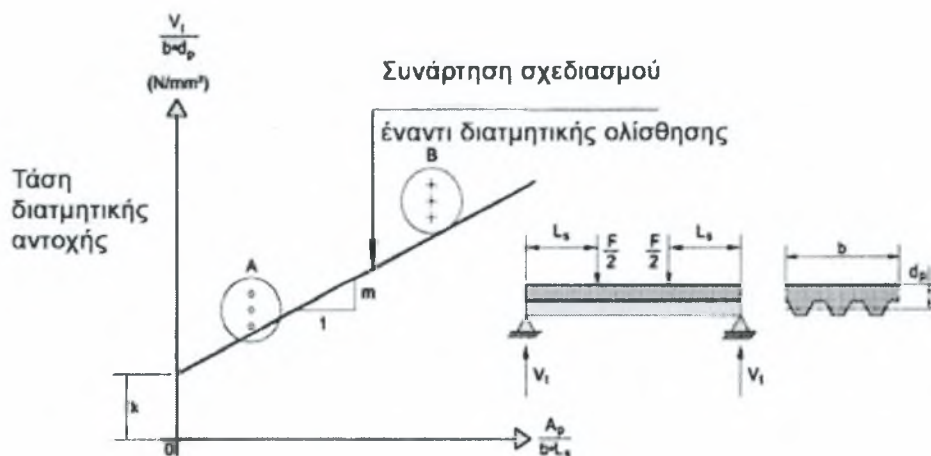
L_s (mm) : κρίσιμο διατμητικό μήκος

m, k (N/mm²) : πειραματικές σταθερές που προκύπτουν από την πειραματική εξέταση δοκιμίων πλακών πραγματικών διαστάσεων σύμφωνα με την μέθοδο m-k (§1.6)

γ_{vs} : συντελεστής ασφαλείας (=1.25).

1.6 – Μέθοδος m-k

Σύμφωνα με τη μέθοδο m-k , πραγματοποιείται μια σειρά πειραμάτων από τα οποία προκύπτει το φορτίο αντοχής της κάθε πλάκας. Χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διατομής της πλάκας κατασκευάζεται το διάγραμμα μέσω του οποίου θα προσδιοριστούν οι συντελεστές **m**, **k**. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6.1, στον άξονα των τεταγμένων τοποθετούμε την τιμή του λόγου $\frac{V_t}{b * d_p}$, όπου V_t είναι η αντίδραση στη στήριξη για το μέγιστο φορτίο συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους της πλάκας, **b** το πλάτος της πλάκας και d_p η απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου από την άνω ίνα της πλάκας, και στον άξονα των τετμημένων παριστάνεται η τιμή του λόγου $\frac{A_p}{b * L_s}$, όπου A_p το εμβαδόν της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου στην ανάληψη εφελκυσμού και L_s το «κρίσιμο διατμητικό μήκος» για κάθε δοκίμιο πλάκας. Από τα σημεία που προκύπτουν σύμφωνα με τα παραπάνω ,εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή φέρουμε την ευθεία της μορφής $y=mx+k$. (Σχήμα 1.6.1).



Σχήμα 1.6.1 – Διάγραμμα μεθόδου m - k

Οι διαστάσεις των δοκιμών πλάκων επιλέγονται έτσι ώστε τα αποτελέσματα των πειραμάτων να δίνουν τιμές μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου, $P = 2V_t$, όσο το δυνατόν πιο απομακρυσμένες μεταξύ τους ώστε να

μπορεί να προσδιοριστεί με αξιοπιστία η ευθεία, $y=mx+k$. Για το λόγο αυτό με βάση τον Κανονισμό EC4, επιλέγονται κατ' ελάχιστο τρία (3) δοκίμια πλακών με όσο το δυνατόν μικρότερο άνοιγμα που δίνουν τιμές κατά μήκος διατμητικής αντοχής στην περιοχή **B** και τρία (3) δοκίμια πλακών, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο άνοιγμα που δίνουν τιμές διατμητικής αντοχής στην περιοχή **A**.

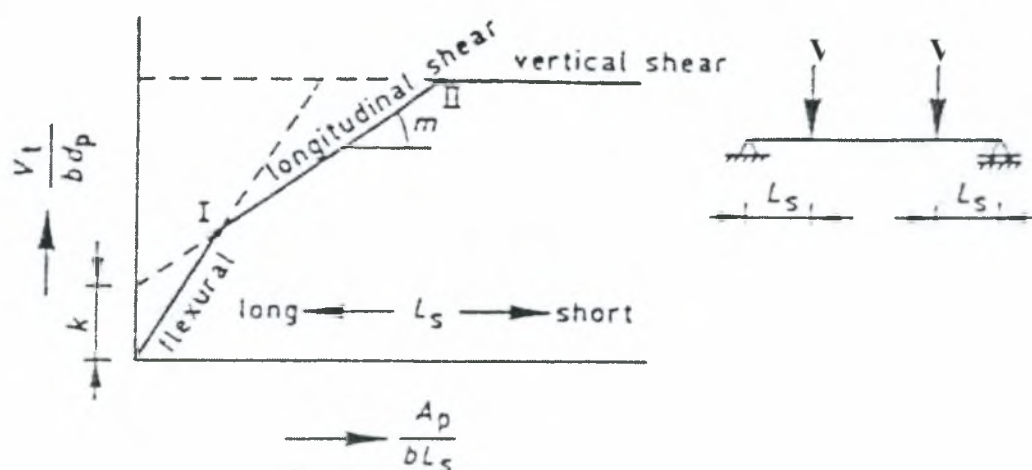
Τα δοκίμια των σύμμικτων πλακών με μικρό σχετικά άνοιγμα μπορούν να φέρουν ως γνωστό μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας με αποτέλεσμα αφενός μεν να αυξάνει ο λόγος $\frac{V_t}{b * d_p}$, αφετέρου δε λόγω του μικρού ανοίγματος να έχουμε μικρότερο «κρίσιμο διατμητικό μήκος», L_s , με άμεση συνέπεια την αύξηση του λόγου, $\frac{A_p}{b * L_s}$. Παρατηρούμε λοιπόν ότι όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της πλάκας οι τιμές του διαγράμματος μετατοπίζονται δεξιότερα στην ευθεία $y=mx+k$ (Σχήμα 1.6.2). Μεγάλο φορτίο σε μικρό μήκος συνεπάγεται μεγάλη τέμνουσα δύναμη οπότε και μεγάλη διατμητική καταπόνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο πλάκες μικρού ανοίγματος παρουσιάζουν κυρίως αστοχία λόγω σχετικής ολίσθησης των δύο υλικών στη διεπιφάνεια.

Τα δοκίμια για την περιοχή B θα πρέπει να επιλεγούν με όσο το δυνατόν μικρότερο άνοιγμα αλλά με την προϋπόθεση ότι δεν θα αστοχήσουν σε κατακόρυφη τέμνουσα (δεξιά της περιοχής II, Σχήμα 1.6.2)

Στα δοκίμια των πλακών με σχετικά μεγάλο μήκος ανοίγματος, το φορτίο αστοχίας είναι μικρότερο των αντίστοιχων δοκιμίων μικρού μήκους ανοίγματος με άμεση συνέπεια τη μείωση της διατμητικής αντοχής, δηλαδή μείωση του λόγου, $\frac{V_t}{b * d_p}$ και τη μείωση του λόγου, $\frac{A_p}{b * L_s}$ λόγω αύξησης του μήκους, L_s .

Παρατηρούμε ότι οι τιμές στο διάγραμμα, $y=mx+k$ μετατοπίζονται αριστερότερα. Με την αύξηση του μήκους του ανοίγματος αυξάνει η καμπτική ροπή λόγω της αύξησης του ίδιου βάρους αλλά μειώνεται η τέμνουσα που οφείλεται στο επιβαλλόμενο φορτίο. Επίσης με τη αύξηση του μήκους του ανοίγματος αυξάνει το κρίσιμο διατμητικό μήκος L_s , έτσι έχουμε μεγαλύτερο μήκος για να αναπτυχθεί ο μηχανισμός της τριβής. Το φορτίο στη διεπιφάνεια είναι ήδη μειωμένο λόγω του μικρότερου φορτίου αστοχίας, άρα η αντίσταση

που επιστρατεύει η σύμμικτη πλάκα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος - χαλυβδόφυλλου θα είναι πιθανότερα μεγαλύτερη από την επιβαλλόμενη δράση. Αυτοί είναι οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους οι σύμμικτες πλάκες με μεγαλύτερο μήκος παρουσιάζουν καμπτική αστοχία (αν βέβαια έχει εξασφαλιστεί επαρκώς η συνάφεια των δύο υλικών) (βλέπε Σχήμα 1.6.2).



Σχήμα 1.6.2 – Σχηματικό διάγραμμα μορφών αστοχίας σε σχέση με το άνοιγμα των πλακών.

Εν κατακλείδι, δοκίμια με μικρό μήκος ανοίγματος παρουσιάζουν αστοχία λόγω σχετικής ολίσθησης στην διεπιφάνεια των δύο υλικών περιοχή μεταξύ των σημείων I και II (Σχήμα 1.6.2). Λαμβάνοντας υπόψη πάντα την ύπαρξη ενός άνω ορίου στο σημείο II λόγω διατμητικής αστοχίας σε κατακόρυφη τέμνουσα που οφείλεται στο πολύ μικρό μήκος της πλάκας (μικρό μήκος συνεπάγεται μεγάλο φορτίο αστοχίας άρα και μεγάλη τέμνουσα δύναμη στην πλάκα). Σε αντίθεση όσο αυξάνει το μήκος της πλάκας τόσο ο μηχανισμός πλησιάζει αυτόν της καμπτικής αστοχίας. Στην περιοχή I έχουμε ταυτόχρονη δράση και των δύο μηχανισμών.

Όπου:

$M_{pl,Rm}$, είναι η μειωμένη πλαστική ροπή αντοχής της διατομής του χαλυβδόφυλλου (ο δείκτης m δηλώνει ότι αναφερόμαστε σε μετρημένο μέγεθος και όχι σε απομειωμένο μέγεθος σχεδιασμού)

M_{test} , είναι η επιβαλλόμενη καμπτική ροπή στο δοκίμιο της σύμμικτης πλάκας που προκύπτει ως άθροισμα της ροπής που οφείλεται στο επιβαλλόμενο φορτίο, ίδιο βάρος και το βάρος των μεταλλικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την επιβολή του φορτίου.

N_{cf} , είναι η τιμή της δύναμης που αναπτύσσεται στο χαλυβδόφυλλο κατά την διαρροή του (μετρημένη ανηγμένη αξονική παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο άνω του 2‰).

N_c , είναι η δύναμη που ασκείται στην διεπιφάνεια των δύο υλικών (χαλυβδόφυλλο – σκυρόδεμα) κατά την επιβολή του φορτίου

Ο βαθμός διατμητικής σύνδεσης, n , ορίζεται ως το αδιάστατο πηλίκο $\frac{N_c}{N_{cf}}$ και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Ο λόγος εκφράζει σε ποσοστό τη δύναμη που ασκείται στην διεπιφάνεια του χαλυβδόφυλλου με το σκυρόδεμα σε σχέση με τη μέγιστη δύναμη που αναπτύσσει το χαλυβδόφυλλο κατά τη διαρροή του.

Η τελική τιμή της διατμητικής αντοχής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$t_u = \frac{n \cdot N_{cf}}{b \cdot (L_s + L_0)},$$

Όπου L_0 το μήκος του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας που επεκτείνεται πέρα από τις στηρίξεις.

Η χαρακτηριστική τιμή της διατμητικής αντοχής, $t_{u,Rk}$, λαμβάνεται μειωμένη κατά 10% .

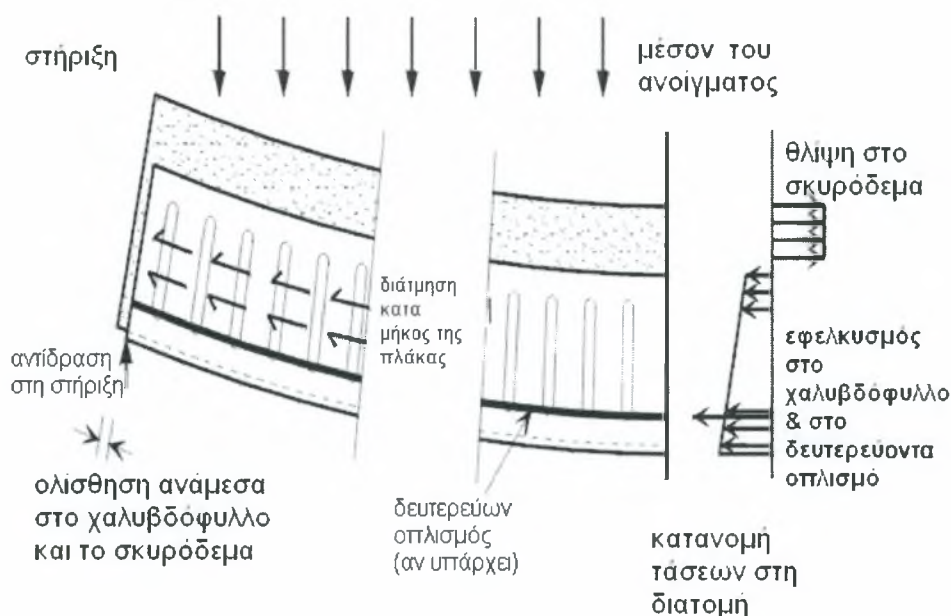
Για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής σχεδιασμού, $t_{u,Rd}$, η παραπάνω τιμή διαιρείται με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.25, δηλαδή

$$t_{u,Rd} = \frac{t_{u,Rk}}{1.25}$$

1.8 – Κρίσιμο διατμητικό μήκος, L_s

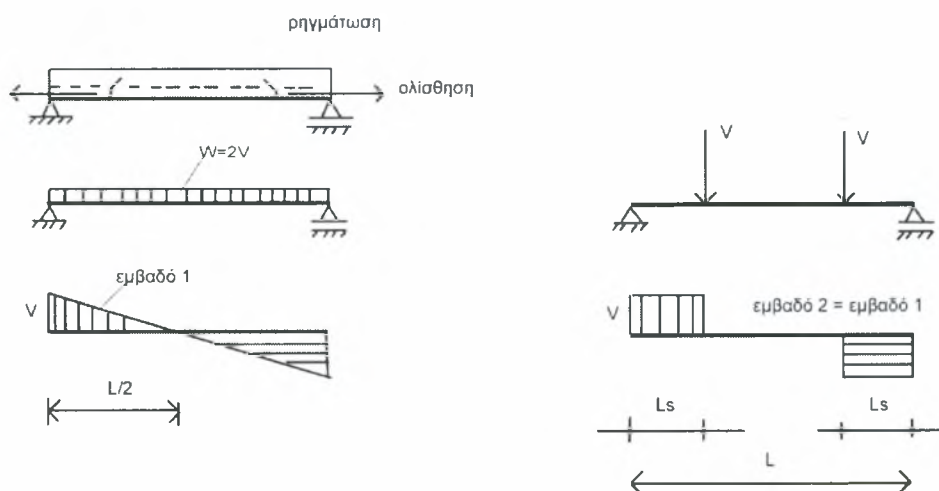
Το «κρίσιμο διατμητικό μήκος», L_s , λαμβάνεται ως η απόσταση:

- $L/4$ από τις στηρίξεις της πλάκας όταν η πλάκα φορτίζεται με κατανεμημένο φορτίο
- Η απόσταση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου και της πλησιέστερης στήριξης όταν πρόκειται για δυο ίσα και συμμετρικά τοποθετημένα φορτία.
- Για διαφορετικές διατάξεις επιβολής του φορτίου, συμπεριλαμβανομένης της περιπτώσεως συνδυασμού κατανεμημένου φορτίου με μη συμμετρικά συγκεντρωμένα φορτία, η εκτίμηση του «κρίσιμου διατμητικού μήκους», L_s , θα προκύπτει ως αποτέλεσμα πειραμάτων ή ως αποτέλεσμα θεωρητικών υπολογισμών.



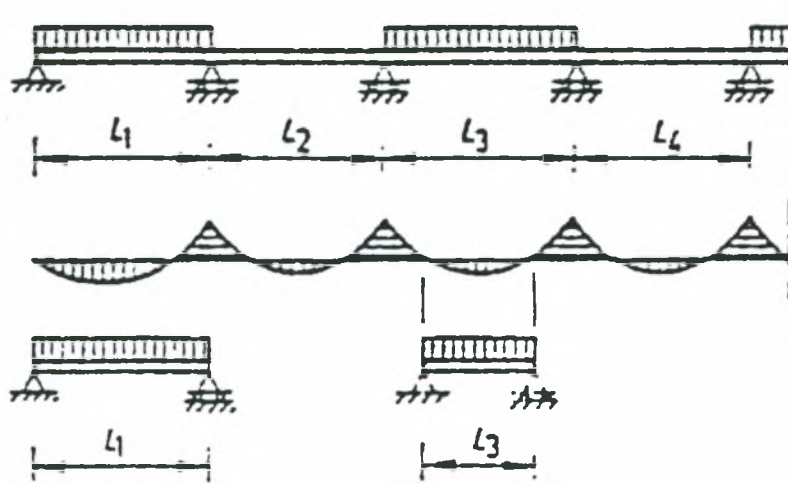
Σχήμα 1.8.1 - Κατανομή των τάσεων στο επίπεδο της διατομής

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κρίσιμο διατμητικό μήκος για την περίπτωση του ομοιόμορφου κατανεμημένου φορτίου προκύπτει εξισώνοντας το εμβαδό του διαγράμματος της τέμνουσας V , με το αντίστοιχο διάγραμμα που προκύπτει από την επιβολή δυο ίσων συμμετρικά τοποθετημένων φορτίων. (Σχήμα 1.8.1). Δηλαδή, $\frac{VL}{4} = V \cdot L_s$ ή $L_s = \frac{L}{4}$.



Σχήμα 1.8.1 - Προσδιορισμός κρίσιμου διατμητικού μήκους, L_s .

Σε στατικά συστήματα πολλαπλών ανοιγμάτων επιτρέπεται για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής να χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο μήκος αμφίερευστης πλάκας, $\alpha \cdot l$, μεταξύ των σημείων μηδενισμού του διαγράμματος των καμπτικών ροπών, όπου l το μήκος του ανοίγματος της πλάκας και συντελεστής $\alpha=0,6$ (για εσωτερικά ανοίγματα). Ωστόσο, για τα εξωτερικά ανοίγματα θα πρέπει να χρησιμοποιείται ολόκληρο το μήκος του ανοίγματος. (Σχήμα 1.8.2)

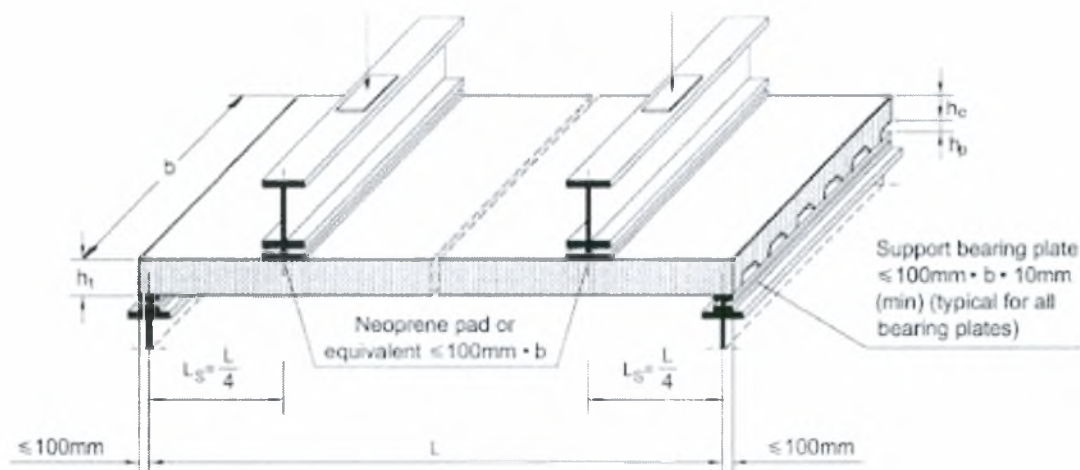


Σχήμα 1.8.2 - Προσδιορισμός L_s σε συνεχές στατικό σύστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 - Πειραματική διάταξη

- 1) Η στατική προσομοίωση των δοκιμών θα είναι αυτή των αμφιέριστων πλακών.
- 2) Η πειραματική διάταξη θα είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.1.1.



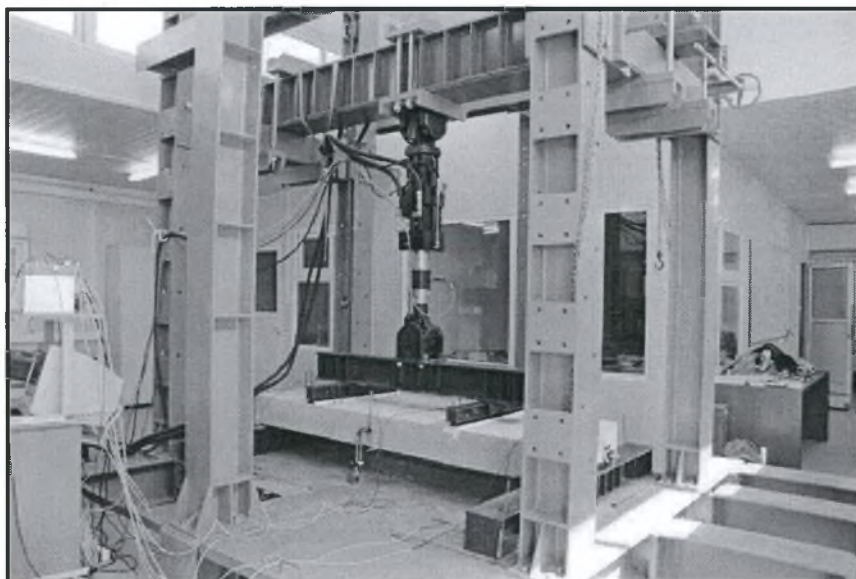
Σχήμα 2.1.1 – Σύμμικτη πλάκα σε μεταλλική κατασκευή

- 3) Δύο συγκεντρωμένα γραμμικά κατανεμημένα (κατά το πλάτος) φορτία, θα εφαρμοστούν συμμετρικά στο δοκίμιο σε αποστάσεις $L/4$ και $3L/4$ του ανοίγματος, αντίστοιχα.
- 4) Η απόσταση μεταξύ του άξονα της στήριξης και του άκρου της πλάκας δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100 mm.
- 5) Το πλάτος της μεταλλικής πλάκας μέσω της οποίας μεταβιβάζεται το γραμμικό φορτίο στο δοκίμιο δεν πρέπει να υπερβαίνει σε πλάτος τα 100 mm.
- 6) Όταν τα πειράματα γίνονται για να προσδιοριστούν οι συντελεστές m και k , για κάθε μεταβλητή πρέπει να εξεταστούν δύο ομάδες τριών (3)

δοκιμίων (Σχήμα 1.6.1, περιοχή **A** και περιοχή **B**) ή να εκτελεστούν πειράματα τριών ομάδων με δυο δοκίμια στη κάθε ομάδα.

Για τα δοκίμια στην περιοχή **A**, το «κρίσιμο διατμητικό μήκος» L_s πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εξασφαλίζοντας πάντα ότι θα έχουμε αστοχία λόγω διαμήκουσ ολίσθησης και όχι λόγω κκατακόρυφης διάτμησης.

Για τα δοκίμια στην περιοχή **B**, το «κρίσιμο διατμητικό μήκος», L_s , πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο (όχι μικρότερο από $3h_t$) εξασφαλίζοντας πάντα ότι θα έχουμε αστοχία λόγω ολίσθησης και όχι λόγω κάμψης.



Σχήμα 2.1.2 – Πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, που χρησιμοποιήθηκε για τις καμπτικές δοκιμές.

- 7) Όταν τα πειράματα γίνονται για να προσδιοριστεί η διατμητική αντοχή $\tau_{u,Rd}$ μέσω της μεθόδου «μερικής» διατμητικής σύνδεσης, για κάθε τύπο χαλυβδόφυλλου και κάθε τύπο σκυροδέματος πρέπει να εκτελεστούν τουλάχιστον έξι (6) πειράματα σε δοκίμια χωρίς πρόσθετο διαμήκη οπλισμό ή ακραία αγκύρια. Τα δοκίμια πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε οι πληροφορίες που θα προκύψουν να είναι αντιπροσωπευτικές ολόκληρου του πεδίου τιμών του βαθμού διατμητικής σύνδεσης ($n \leq 1.0$) (βλέπε §1.7). Το μήκος του ανοίγματος και το πάχος της πλάκας

μπορούν να ποικίλουν αρκεί τουλάχιστον τρία (3) πειράματα να δίνουν **τιμές βαθμού διατμητικής σύνδεσης n** μεταξύ 0.7 και 1.0.

Εφόσον υπάρχει αρκετή εμπειρία από τον εκτελεστή των πειραμάτων ώστε να αποδείξει ότι η συμπεριφορά των δοκιμίων είναι όλκιμη, ο αριθμός των πειραμάτων μπορεί να μειωθεί σε τρία (3) που θα έχουν τιμές n μεταξύ 0.7 και 1.0. Η επιρροή του πάχους του χαλυβδόφυλλου μπορεί να προσδιοριστεί εκτελώντας τρία (3) επιπλέον πειράματα κάμψης 4 σημείων, για κάθε πάχος χαλυβδόφυλλου που θα εξεταστεί. Από τα τρία δοκίμια, το ένα δοκίμιο πρέπει να έχει «κρίσιμο διατμητικό μήκος» L_s ίσο με $3h_t$ ενώ τα άλλα δυο να δίνουν τιμές n μεταξύ 0.7 και 1.0.

- 8) Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος «μερικής» διατμητικής σύνδεσης για να προσδιορίσουμε τη συνεισφορά της ακραίας αγκύρωσης, πρέπει να εκτελεστούν τρία (3) επιπλέον πειράματα κάμψης 4 σημείων. Το ένα δοκίμιο πρέπει να έχει «κρίσιμο διατμητικό μήκος» L_s ίσο με $3h_t$ ενώ τα άλλα δύο να δίνουν τιμές n μεταξύ 0.7 και 1.0.
- 9) Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος «μερικής» διατμητικής σύνδεσης για να προσδιορίσουμε τη συνεισφορά του πρόσθετου σπλισμού, πρέπει να εκτελεστούν τρία (3) επιπλέον πειράματα κάμψης 4 σημείων. Το ένα δοκίμιο πρέπει να έχει «κρίσιμο διατμητικό μήκος» L_s ίσο με $3h_t$ ενώ τα άλλα δύο να δίνουν τιμές n μεταξύ 0.7 και 1.0.

2.2– Προετοιμασία δοκιμίων πλακών

1. Η επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου πρέπει να είναι σε κατάσταση παρόμοια με αυτή που μας παρέχει το εργοστάσιο κατασκευής τους.
2. Το σχήμα και οι ειδικά διαμορφωμένες νευρώσεις του χαλυβδόφυλλου θα πρέπει να αντιστοιχούν σε ότι θα χρησιμοποιηθεί στην πραγματική κατασκευή. Οι μετρηθείσες τιμές των αποστάσεων και του ύψους του

χαλυβδόφυλλου δεν πρέπει να αποκλίνουν από τις ονομαστικές τιμές περισσότερο από 5% και 10%, αντίστοιχα.

3. Λεπτά μεταλλικά ελάσματα “προρηγμάτωσης” πρέπει να τοποθετηθούν στα σημεία όπου θα επιβληθεί το φορτίο έτσι ώστε να καλύπτουν ολόκληρο το ύψος και το πλάτος της πλάκας. Έχουν σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό του «κρίσιμου διατμητικού μήκους», L_s , καθώς και η επίτευξη της πρακτικά μηδενικής εφελκυστικής συνεισφοράς του σκυροδέματος.
4. Επιτρέπεται να περιοριστούν τα εξωτερικά ελάσματα της σύμμικτης πλάκας για να λειτουργήσουν όπως θα λειτουργούσαν στις πλάκες με σχετικά μεγάλο πλάτος.
5. Το πλάτος b των δοκιμίων των πλακών δεν πρέπει να είναι μικρότερο από :
 - τρεις (3) φορές το ολικό ύψος της πλάκας
 - 600 mm
 - το πλάτος του χαλυβδόφυλλου
6. Τα δοκίμια πρέπει να σκυροδετηθούν σε συνθήκες πλήρους στήριξης. Έτσι θα έχουμε δυσμενέστερη κατάσταση για την αστοχία λόγω ολίσθησης .
7. Μπορεί να τοποθετηθεί οπλισμός πλέγματος ,για την ενίσχυση της πλάκας έναντι συστολής ξήρανσης, για αποφυγή ρωγμών κατά τη μεταφορά της κ.α. Εάν τοποθετηθεί θα πρέπει να εγκατασταθεί έτσι ώστε να βρίσκεται υπό συνθήκες θλίψης σε κατάσταση λειτουργίας.
8. Το σκυρόδεμα για όλα τα δοκίμια, που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη μεταβλητή, πρέπει να είναι από το ίδιο μείγμα και τα δοκίμια να λαμβάνουν τις ίδιες συνθήκες συντήρησης.

9. Για κάθε ομάδα δοκιμών για τα οποία πρόκειται να ακολουθηθεί η πειραματική διαδικασία μέσα σε 48 ώρες ,απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα (4) δοκίμια σκυροδέματος (κυβικά ή κυλινδρικά) για να προσδιοριστεί η αντοχή του σκυροδέματος. Τα δοκίμια θα πρέπει να προέρχονται από το ίδιο μείγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για τη σκυροδέτηση των πλακών.

Η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, f_{cm} ,για κάθε ομάδα θα προκύπτει από το μέσο όρο των θλιπτικών αντοχών εφόσον η απόκλιση από τη μέση τιμή δεν ξεπερνά το 10% .

Όταν η απόκλιση της θλιπτικής αντοχής ξεπερνά το 10% της μέσης τιμής, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος θα λαμβάνεται ίση με την μέγιστη μετρηθείσα τιμή.

10. Η εφελκυστική αντοχή και το όριο διαρροής του χαλυβδόφυλλου θα λαμβάνονται κατόπιν αντίστοιχων πειραμάτων σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

2.3– Διαδικασία φόρτισης

1. Η διαδικασία της φόρτισης κατά τη διάρκεια του πειράματος πρέπει να αντιπροσωπεύει επιβαλλόμενη φόρτιση μεγάλης χρονικής περιόδου. Θα αποτελείται από δύο μέρη. Αρχικά η πλάκα θα υποβληθεί σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση και στη συνέχεια σε μονοτονική στατική φόρτιση μέχρι να προσδιοριστεί το φορτίο αστοχίας.

2. Εάν χρησιμοποιηθούν δυο ομάδες από τρία (3) δοκίμια, σε ένα από τα τρία πειράματα για κάθε ομάδα μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μονοτονική στατική φόρτιση ώστε να προσδιορίσουμε το φορτίο της επαναλαμβανόμενης φόρτισης για τα άλλα δύο (2) πειράματα.

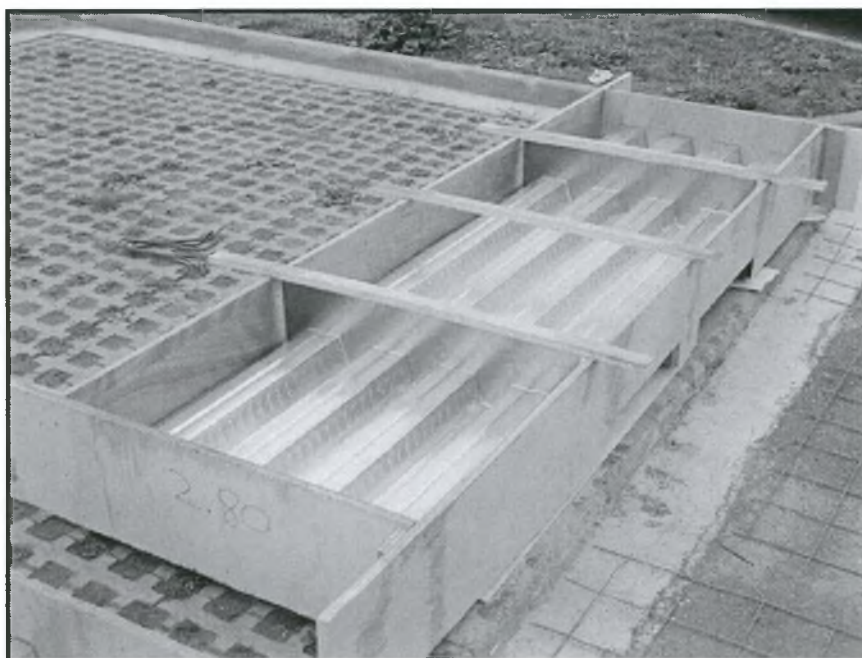
3. 1^ο στάδιο φόρτισης: η πλάκα θα υποβληθεί σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση, όπου το φορτίο θα μεταβάλλεται από τη χαμηλότερη τιμή $0,5W_q$ μέχρι την ανώτατη τιμή $1,5W_q$, $W_q=0,4 W_t$ και W_t είναι το φορτίο αστοχίας που προκύπτει από το πείραμα στο οποίο το δοκίμιο της πλάκας υποβάλλεται σε μονοτονική στατική φόρτιση.
Το παραπάνω θα επιβληθεί σε 5000 κύκλους φόρτισης και σε χρόνο κατ' ελάχιστο 3 ώρες.
4. 2^ο στάδιο φόρτισης: μετά το τέλος του 1^{ου} σταδίου φόρτισης, η πλάκα θα υποβληθεί σε στατική φόρτιση, όπου το φορτίο θα αυξάνει προοδευτικά, έτσι ώστε η αστοχία να επιτευχθεί μετά από 1 ώρα.
5. Στο 2^ο στάδιο φόρτισης το πείραμα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ελέγχοντας την τιμή του φορτίου είτε ελέγχοντας την τιμή της μετακίνησης του εμβόλου επιβολής του φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 – Κατασκευή των δοκιμών σύμμικτων πλακών σκυροδέματος

3.1.1 Ξυλότυπος

Οι ξυλότυποι των δοκιμών κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ξυλεία τύπου beton forme. (Σχήμα 3.1.1). Τα πλευρικά τοιχώματα του ξυλότυπου κατά μήκος της πλάκας ενισχύθηκαν εγκάρσια με ξύλινα πηχάκια 5x3 cm. Αφού κατασκευάστηκαν οι ξυλότυποι, τοποθετήθηκαν τα χαλυβδόφυλλα, καθώς επίσης και τα χαλύβδινα ελάσματα «προρηγμάτωσης». Τα τελευταία στην 1η σειρά δοκιμών τοποθετήθηκαν σε όλο το ύψος της διατομής ενώ στη 2η σειρά μέχρι 1cm από την πάνω παρειά του χαλυβδόφυλλου.



Σχήμα 3.1.1 Ξυλότυπος δοκιμίου πλάκας διαστάσεων 2,80x0,83x0,20 m.

Πριν την σκυροδέτηση έγινε επικάλυψη των καλουπιών με ειδικό υγρό για την εύκολη αποκόλλησή τους από το σκυρόδεμα, αλλά και για την προστασία του καλουπιού (γιατί επρόκειτο να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή παρόμοιων δοκιμών με διαφορετικά χαρακτηριστικά). Επίσης εξασφαλίστηκε η οριζοντιότητα όλων των καλουπιών.

3.1.2 Σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση της 1ης σειράς των δοκιμίων σύμμικτων πλακών έγινε στις 26 Ιανουαρίου 2005, ενώ της 2ης στις 28 Απριλίου 2005 στον προαύλιο χώρο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος. Για τη διάστρωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε φορητός ηλεκτρικός δονητής. Στα 10 cm από την πάνω παρειά της πλάκας τοποθετήσαμε πλέγμα οπλισμού τυποποιημένης διατομής για την αποφυγή ρωγμών λόγω συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής τύπου Sikament 150S για την αύξηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος.



Σχήμα 3.1.2 Χρήση ηλεκτρικού δονητή για την αποτελεσματικότερη διάστρωση του σκυροδέματος.

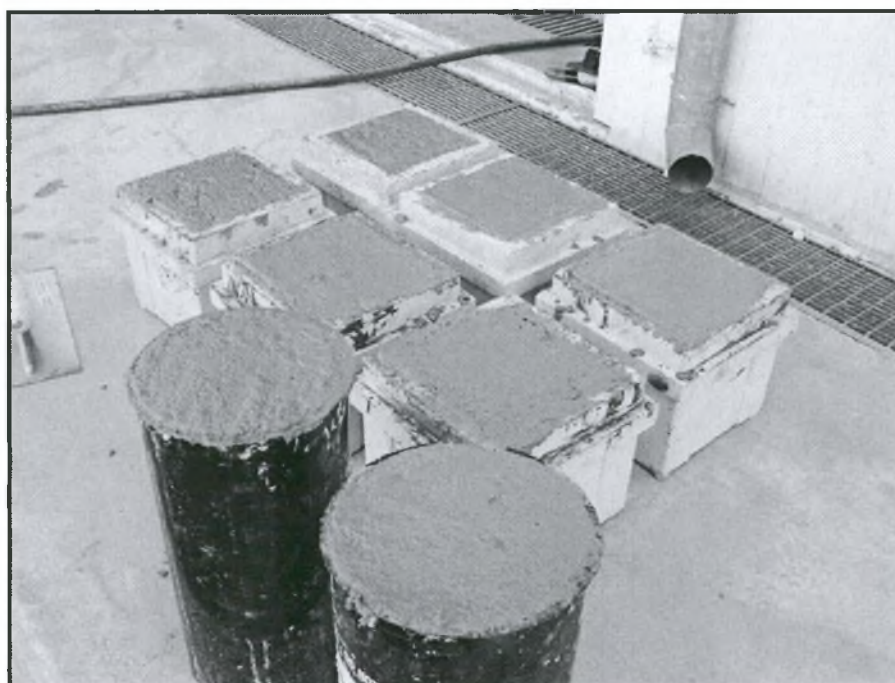


Σχήμα 3.1.3 Τοποθέτηση πλέγματος οπλισμού στο πάνω μέρος της πλάκας.



Σχήμα 3.1.4 Διαμόρφωση της επιπεδότητας της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου.

Παράλληλα με τη σκυροδέτηση των δοκιμίων των πλακών ελήφθησαν έξι (6) κυβικά και έξι (6) κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής. Η σκυροδέτηση των δοκιμίων έγινε με βάση τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Η έγχυση του σκυροδέματος μέσα στα πλαστικά καλούπια έγινε σε τρεις στρώσεις με συμπίκνωση της κάθε μίας στρώσης με επαναλαμβανόμενη έμπυση σε αυτήν 25 φορές με μεταλλική ράβδο ($\Phi 20$). Με την πλήρωση των καλουπιών η άνω επιφάνεια επιπεδώνονταν με προσοχή και το δοκίμιο τοποθετούνταν σε ασφαλές μέρος. Τα κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια είχαν διαστάσεις: 15x15x15 cm και τα κυλινδρικά 6x12 in (διάμετρο x ύψος), αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1.5 Δοκίμια σκυροδέματος

3.2 – Συντήρηση

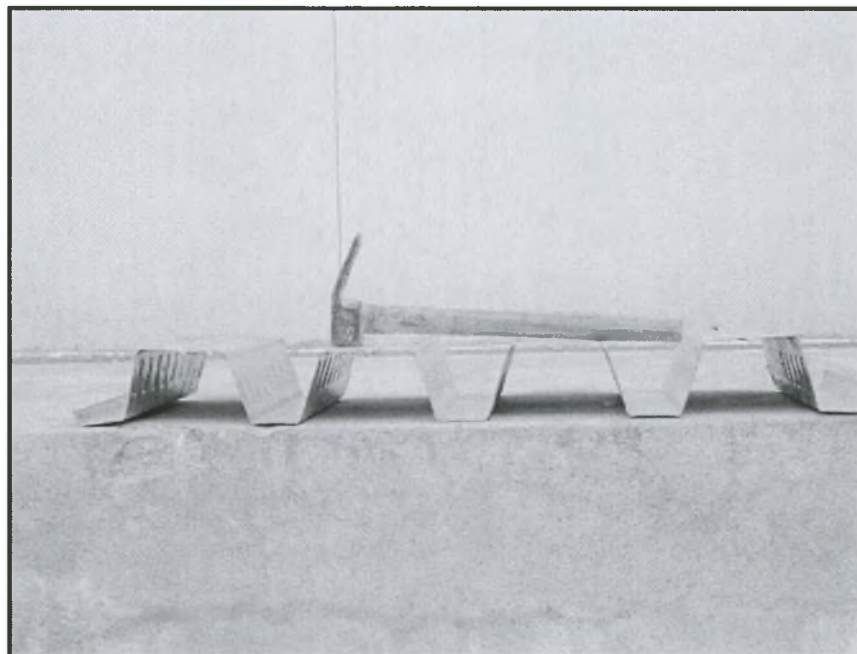
Η συντήρηση των δοκιμών ξεκίνησε αμέσως μετά τη σκυροδέτηση για να αποφευχθεί η διάνοιξη ρωγμών λόγω της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος. Τοποθετήθηκε «λινάτσα» σε όλα τα δοκίμια η οποία διαβρέχονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η «λινάτσα» είναι ένα υλικό το οποίο επιβραδύνει την εξάτμιση της υγρασίας ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη συντήρηση των δοκιμών. Η διαβροχή έγινε με ειδικό ψεκαστήρα τύπου τζετ. Η διαδικασία συνεχίστηκε για περίπου τριάντα (30) ημέρες.



Σχήμα 3.2.1 Συντήρηση δοκιμών πλακών.

3.3 – Υλικά

3.3.1 Χαλυβδόφυλλο

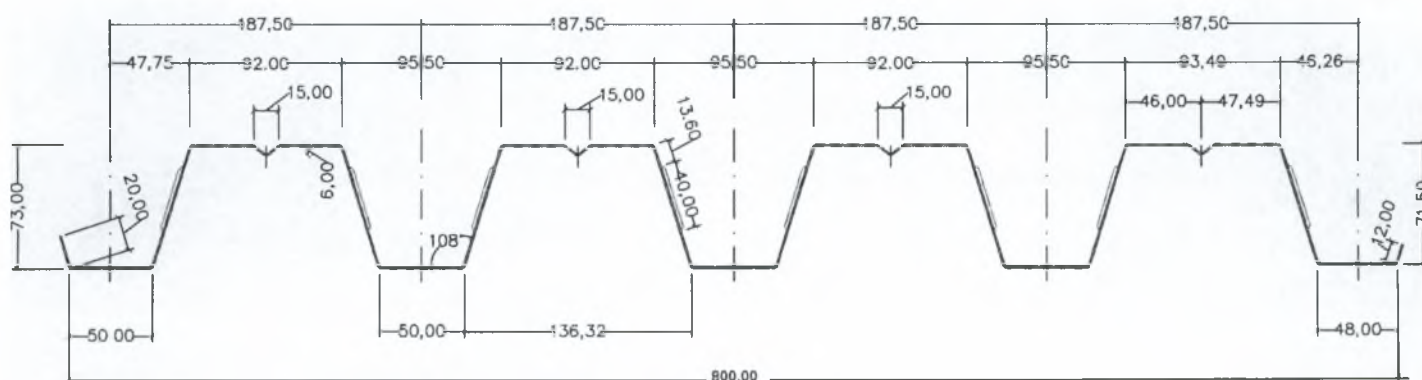


Σχήμα 3.3.1 Διατομή του χαλυβδόφυλλου που εξετάστηκε.

Χαρακτηριστικά χαλυβδόφυλλου

Τύπος χαλυβδόφυλλου : 73/187.5 SYM DECK

Η ονομαστική ποιότητα χάλυβα είναι **Fe320G**, η τάση διαρροής του 320 MPa και είναι γαλβανισμένος.

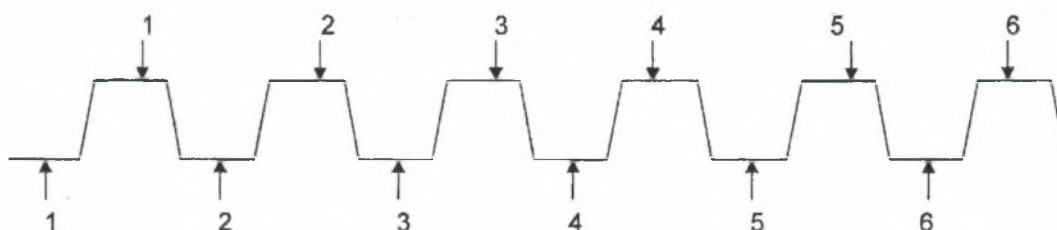


Σχήμα 3.3.2 Διαστάσεις διατομής του χαλυβδόφυλλου (σε mm).

Ονομαστικό πάχος, t (mm)	0.75
Ίδιο βάρος, G (kg/m)	7.36
Εμβαδόν, A (cm ²)	9.52
Ροπή αδρανείας προς τον άξονα y , I_y (cm ⁴)	80.55
Ροπή αντίστασης προς τον άξονα y , W_y (cm ³)	20.16
Ροπή αντίστασης προς τον άξονα z , W_z (cm ³)	23.15

Πίνακας 3.3.3 Γεωμετρικά & αδρανειακά χαρακτηριστικά του χαλυβδόφυλλου

Πειραματικά αποτελέσματα εφελκυστικής αντοχής του χαλυβδόφυλλου



Σχήμα 3.3.4 Σκαρίφημα του χαλυβδόφυλλου με απεικόνιση των περιοχών προέλευσης των ελασμάτων για τη δοκιμή εφελκυσμού.

ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ $R_{p0,2}$ (N/mm ²)	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ R_m (N/mm ²)	ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ (%)
2	ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΕΛΑΣΜΑ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	365	457	36,5
2		365	456	36,5
3		372	464	37,2
3		358	464	35,8
4		371	459	37,1
4		366	462	36,6

Πίνακας 3.3.5 Πειραματικά αποτελέσματα εφελκυστικής αντοχής του χαλυβδόφυλλου

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού που εκτελέστηκε στο εργαστήριο της ΕΒΕΤΑΜ παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.5. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέση τιμή της τάσης διαρροής του χαλυβδόφυλλου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 366,16 MPa. Στον Πίνακα 3.3.6 δίνονται τα αποτελέσματα παχυμέτρησης των δοκιμίων εφελκυσμού. Η μέση τιμή πάχους του χαλυβδόφυλλου είναι ίση με 0,77 mm.

ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (βλέπε Σχήμα 3.3.3)	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (mm)
1	ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΕΛΑΣΜΑ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	0.76-0.77
1		0.77-0.79
2		0.76-0.78
2		0.76-0.77
3		0.77-0.79
3		0.76-0.77
4		0.77-0.78
4		0.76-0.77
5		0.77-0.78
5		0.77-0.78
6		0.78-0.79
6		0.77-0.79

Πίνακας 3.3.6 Αποτελέσματα παχυμέτρησης της διατομής του χαλυβδόφυλλου

3.3.2 - Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή των δοκιμών πλακών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο σκυρόδεμα κατόπιν παραγγελίας από την εταιρία Lafarge. Την ημέρα της σκυροδέτησης (28 Απριλίου 2005) ελήφθησαν συνολικά δώδεκα (12) δοκίμια σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα έξι (6) κυλινδρικά δοκίμια (15.24 cm διάμετρο x 30.48 cm ύψος) και έξι (6) κυβικά (15x15x15 cm) για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν στις ίδιες συνθήκες με τα δοκίμια των πλακών.

Στις 27 Μαΐου 2005 (28 μέρες μετά τη σκυροδέτηση) έγινε ο έλεγχος σε μονοαξονική θλίψη τριών (3) κυβικών δοκιμών και στις 13 Ιουλίου 2005 (75 μέρες μετά τη σκυροδέτηση) τριών (3) κυβικών και έξι (6) κυλινδρικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

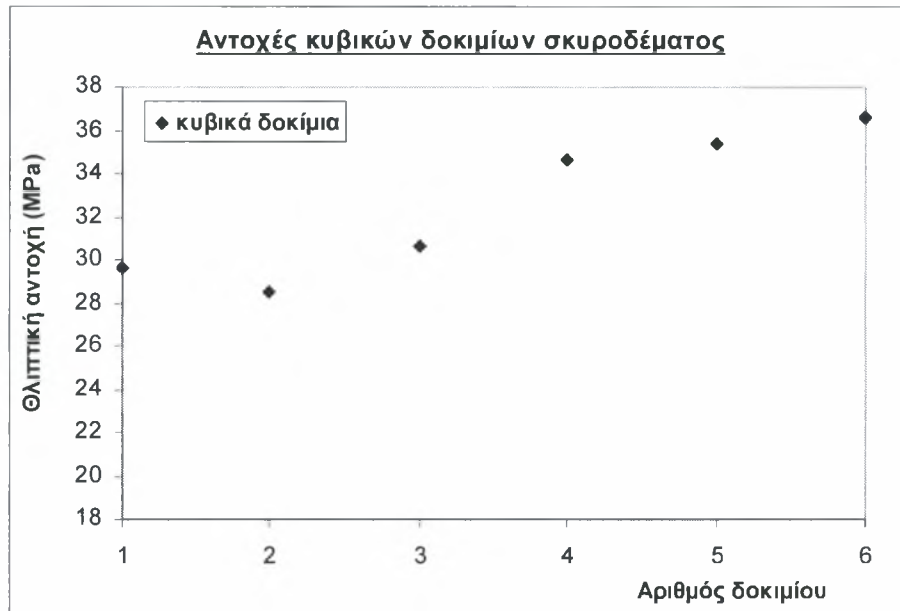
Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.7

Δοκίμιο	Ημερομηνία εξέτασης	Θλιπτική αντοχή, f_c (MPa)	Θλιπτική αντοχή, f_{cm} (MPa)
Κυβικό 1	27 Μαΐου 2005	29,61	29,61
Κυβικό 2	27 Μαΐου 2005	28,53	
Κυβικό 3	27 Μαΐου 2005	30,68	
Κυβικό 4	13 Ιουλίου 2005	34,67	35,57
Κυβικό 5	13 Ιουλίου 2005	35,42	
Κυβικό 6	13 Ιουλίου 2005	36,60	
Κυλινδρικό 1	13 Ιουλίου 2005	25,61	24,69
Κυλινδρικό 2	13 Ιουλίου 2005	23,66	
Κυλινδρικό 3	13 Ιουλίου 2005	23,27	
Κυλινδρικό 4	13 Ιουλίου 2005	25,61	
Κυλινδρικό 5	13 Ιουλίου 2005	23,66	
Κυλινδρικό 6	13 Ιουλίου 2005	26,33	

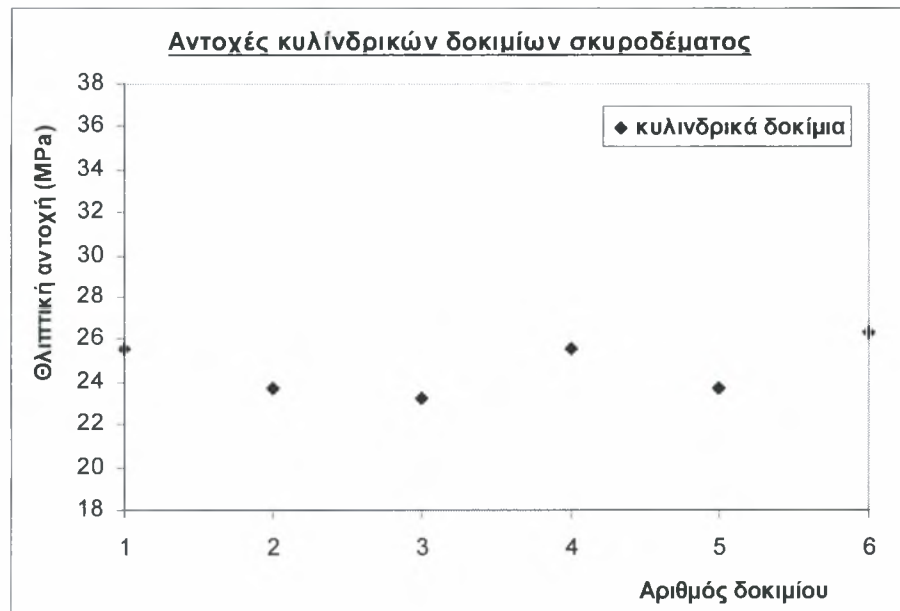
Πίνακας 3.3.7 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.3.7 προκύπτει περίπου κατηγορία σκυροδέματος C25/30.

Στα Σχήματα 3.3.8 & 3.3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Στο Σχήμα 3.3.8 είναι εμφανής η διαφορά της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών που ελέγχθηκαν σε 28 μέρες και αυτών που ελέγχθηκαν σε 75 μέρες από τη σκυροδέτηση.



Σχήμα 3.3.8 Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών σκυροδέματος.

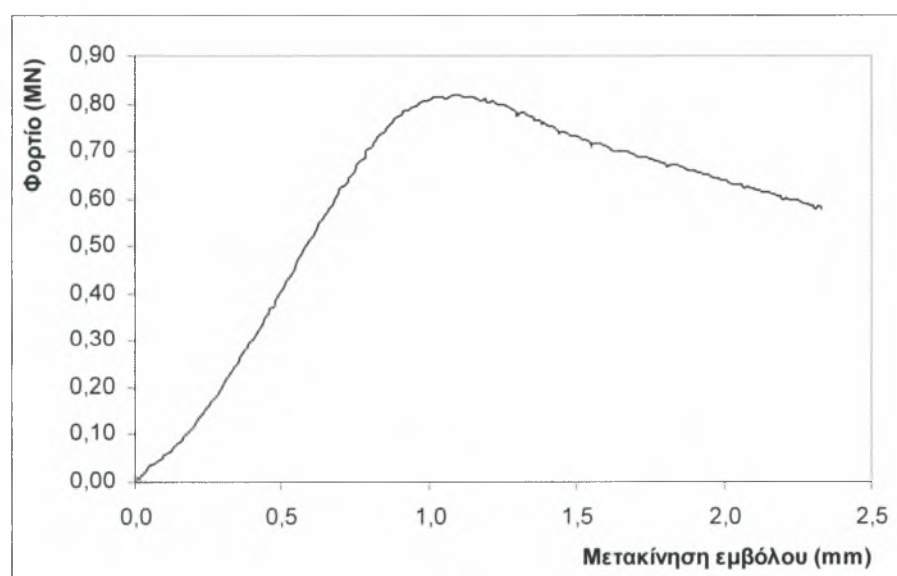


Σχήμα 3.3.9 Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος.

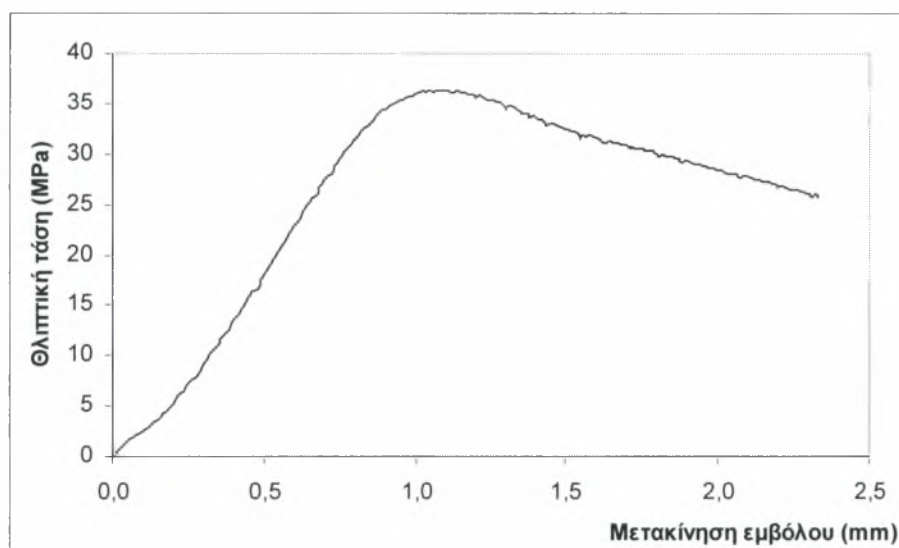
Πριν από την έναρξη των δοκιμών σε μοναξονική θλίψη, τα κυλινδρικά δοκίμια έπρεπε να προετοιμαστούν κατάλληλα. Η προετοιμασία περιλάμβανε το «καπέλωμα» (capping) των δοκιμίων με ειδική τσιμεντοκονία. Το «καπέλωμα» των άκρων των κυλινδρικών δοκιμίων που εμφάνιζαν σχετικά ανώμαλη επιφάνεια με ειδική τσιμεντοκονία για τις δοκιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής επιβάλλεται λόγω της μη επιπεδότητας των άκρων τους ώστε να εξασφαλιστεί η καλή ομοιόμορφη επαφή των εμβόλων της «πρέσας» με τα άκρα των κυλινδρικών δοκιμίων.

Για τη διαμόρφωση λείας και επίπεδης επιφάνειας τοποθετήθηκε τσιμεντοκονίαμα το οποίο επιπεδώνονταν με την χρήση στάθμης και πλακών γυαλιού που αφαιρέθηκαν μετά τη σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος.

Η επιβολή του θλιπτικού φορτίου για τις δοκιμές θλιπτικής αντοχής έγινε ελέγχοντας τη μετακίνηση του εμβόλου της «πρέσας». Στο Σχήμα 3.3.10 δίνεται ενδεικτικά το διάγραμμα θλιπτικού φορτίου – μετακίνησης εμβόλου της «πρέσας» ενός κυβικού δοκιμίου που ελέγχθηκε 75 μέρες μετά τη σκυροδέτηση.

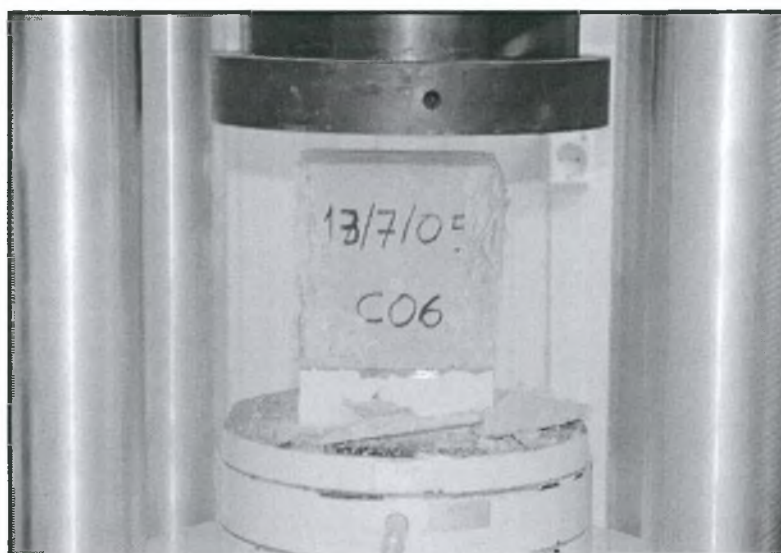


Σχήμα 3.3.10 Αντιπροσωπευτικό Διάγραμμα Φορτίου – μετακίνησης εμβόλου «πρέσας» για τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής του δοκιμίου Νο 6.



Σχήμα 3.3.11 Διάγραμμα θλιπτικής τάσης – μετακίνησης εμβόλου «πρέσας» δοκιμίου σκυροδέματος No 6

Στο σχήμα 3.3.12 φαίνεται ένα από τα κυβικά δοκίμια το οποίο έχει αστοχήσει σε μονοαξονική θλίψη.

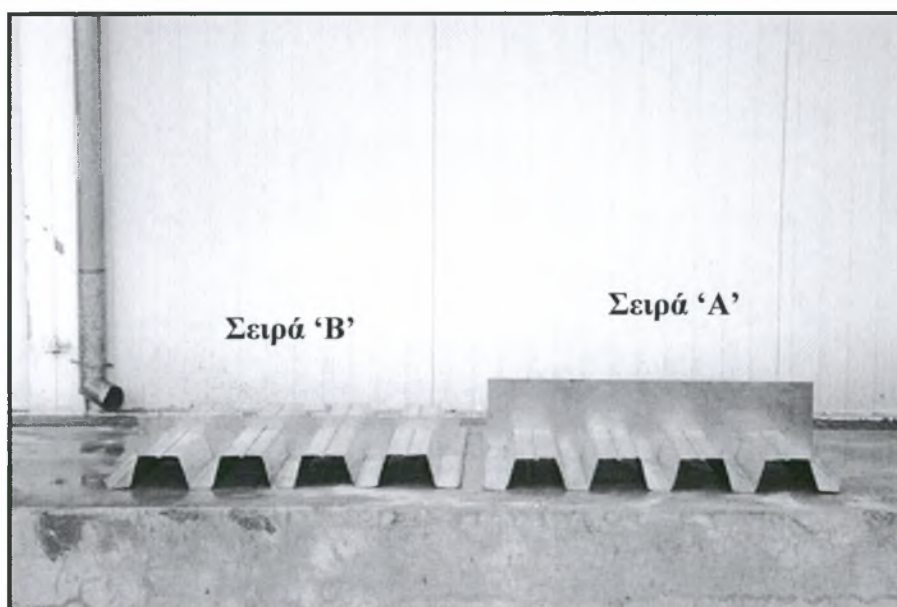


Σχήμα 3.3.12 Κυβικό δοκίμιο No 6 μετά την αστοχία στη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη

3.4 – Ελάσματα προρηγμάτωσης πλακών

Ελάσματα “προρηγμάτωσης” τοποθετήθηκαν σε απόσταση από τις δύο στηρίξεις ίση με το διατμητικό μήκος, L_s με σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό του «κρίσιμου διατμητικού μήκους» δημιουργώντας ένα είδος ασυνέχειας στην περιοχή, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό την διάνοιξη ρωγμής στις προκαθορισμένες διατομές που απέχουν $\frac{L}{4}$ από τις στηρίξεις. Τα ελάσματα “προρηγμάτωσης” έχουν ως αποτέλεσμα πρακτικά τον μηδενισμό της εφελκυστικής συνεισφοράς του σκυροδέματος.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ελασμάτων “προρηγμάτωσης”. Στην σειρά δοκιμών **A** το ύψος του ελάσματος κάλυπτε ολόκληρο το ύψος και το πλάτος της διατομής της σύμμικτης πλάκας σύμφωνα με τον EC4 (Σχήμα2.3.3). Το κρίσιμο φορτίο που προέκυψε από τη σειρά **A** ήταν υπερβολικά χαμηλό (ακολουθεί σχολιασμός στην παρ. 6.1) και ο κρίσιμος παράγοντας θεωρήθηκε ότι ήταν το υπερβολικό ύψος των ελασμάτων προρηγμάτωσης. Ως αποτέλεσμα, στη σειρά δοκιμών **B** το ύψος των ελασμάτων μειώθηκε ώστε να προεξέχει μόνο 1 cm από την πάνω παρειά του χαλυβδόφυλλου. (Σχήμα2.3.3).



Σχήμα 2.3.3 : Τυπικά ελάσματα «προρηγμάτωσης».

2.5 – Περιγραφή πειραματικής διάταξης

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 (Ο/Σ). Το εργαστήριο βοηθάει αφενός στη διδασκαλία των σχετικών μαθημάτων, αφετέρου στο ερευνητικό έργο για την πειραματική μελέτη της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών (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

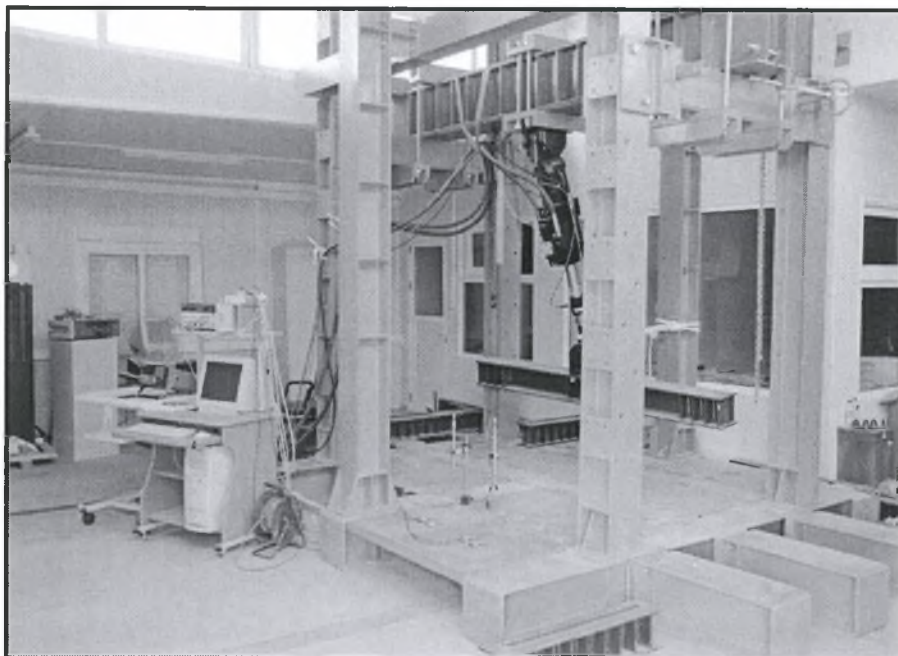
(β) Πειραματικών Μεθόδων και Δοκιμών Κατασκευών Ο/Σ

(γ) Σταθμού Αυτόματων Συστημάτων Καταγραφής Μετρήσεων με Η/Υ.

Ο σταθμός 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.

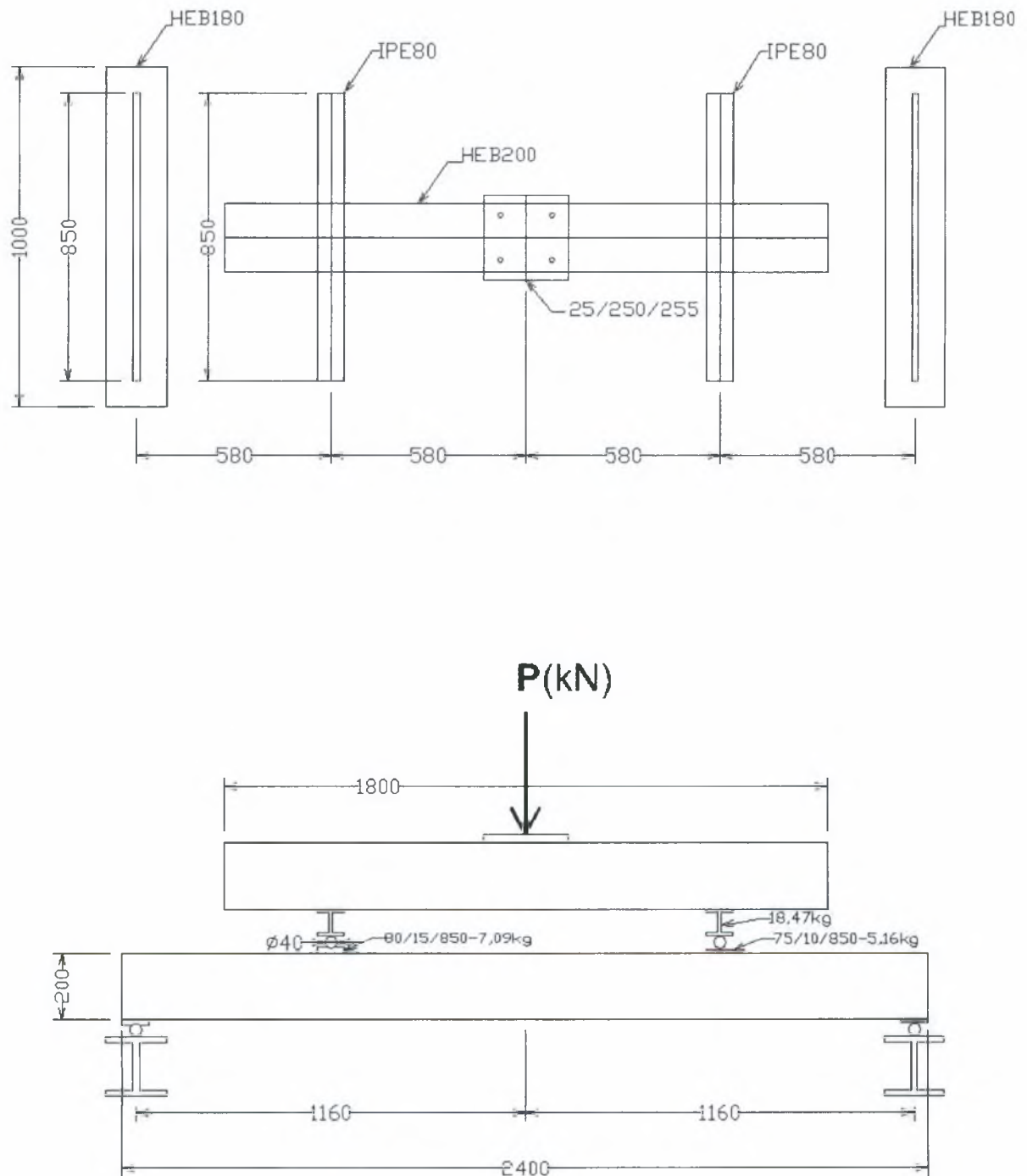
2.5.1 Περιγραφή σερβοϋδραυλικού συστήματος επιβολής φορτίου

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές των σύμμικτων πλακών περιλαμβάνει μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης 3 m (πλάτος) x 3 m (μήκος) x 4 m (ύψος) για την επιβολή φορτίων, ενεργοποιητή φορτίου MTS ± 250 kN ελεγχόμενο από ψηφιακό σερβοϋδραυλικό σύστημα λειτουργίας MTS 407, αντλία υδραυλικής ισχύος 40 lpm και αυτόματο σύστημα καταγραφής μετρήσεων (Σχήμα 2.5.1).

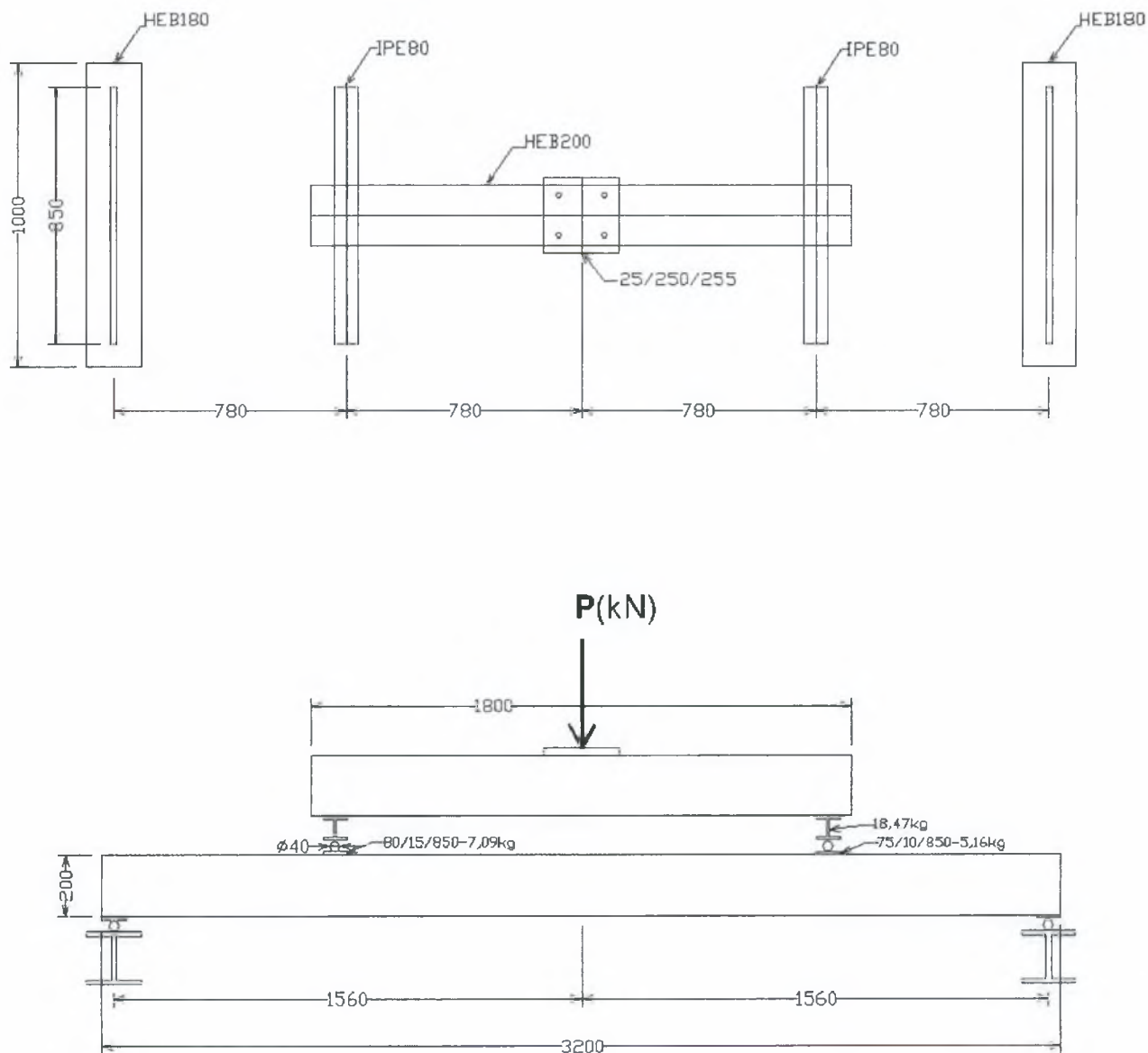


Σχήμα 2.5.1 : Σερβουδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος.

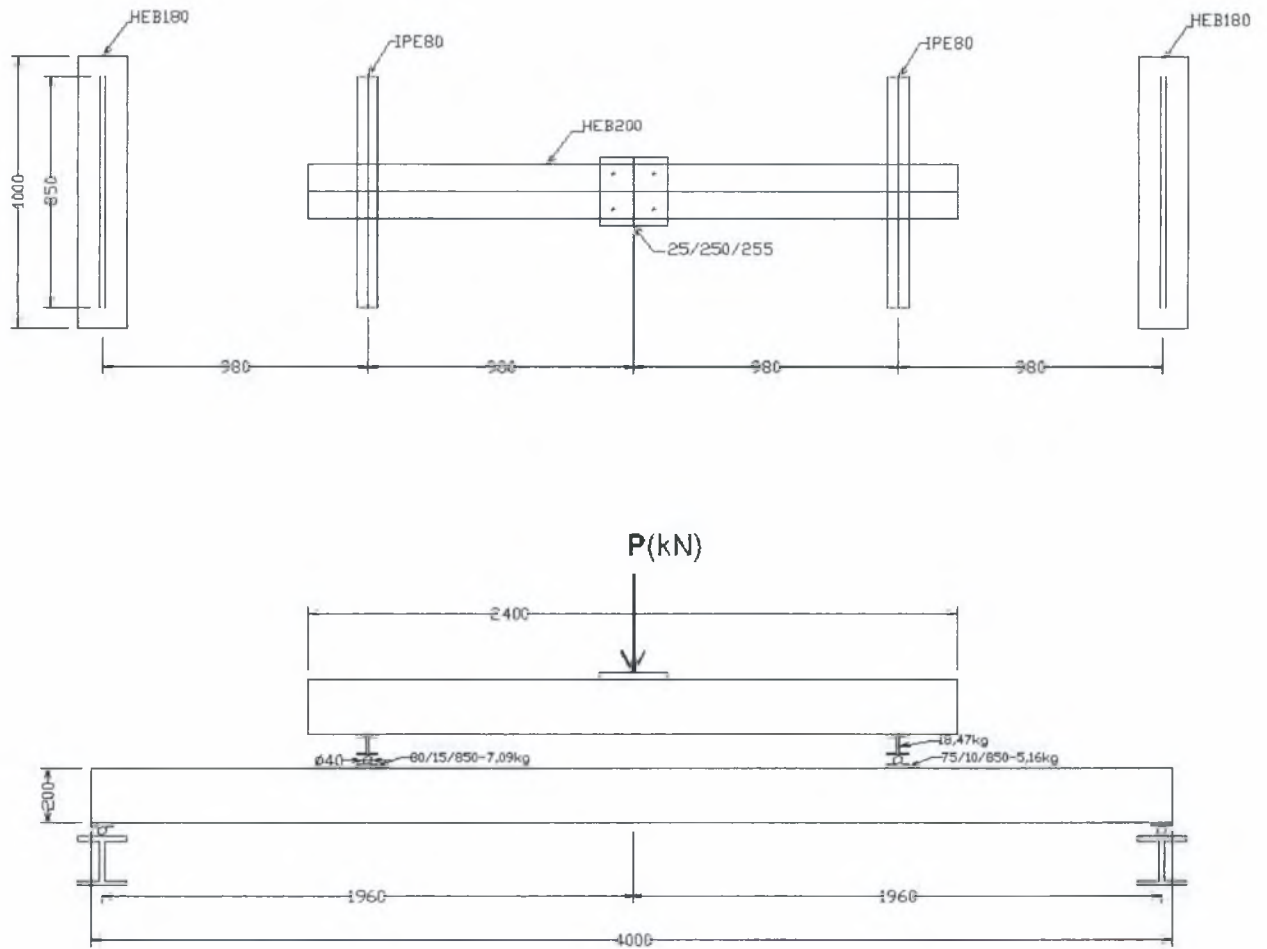
2.5.2 Χαρακτηριστικά σιδηροδοκών φόρτισης και στήριξης των δοκιμών των σύμμικτων πλακών



Σχήμα 2.5.2 : Πειραματική διάταξη πειράματος Β1 (σύμμικτη πλάκα.2.40m)



Σχήμα 2.5.2 : Πειραματική διάταξη πειράματος B2 (σύμμικτη πλάκα 3.20m)

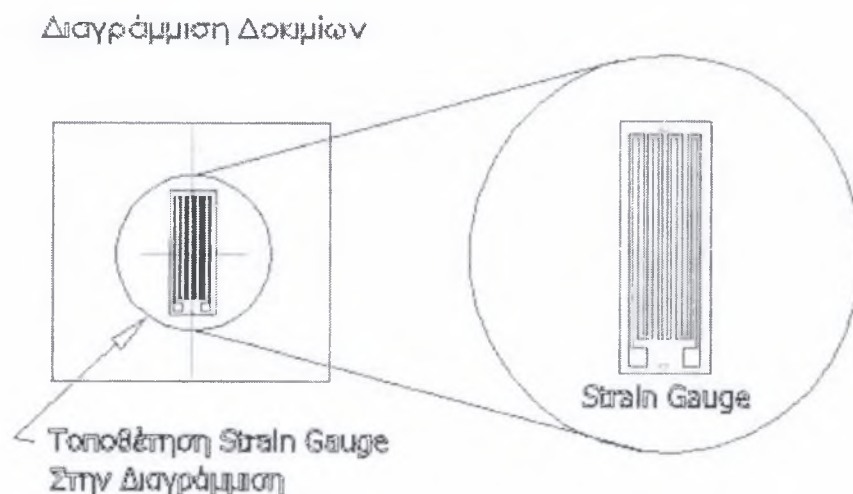


Σχήμα 2.5.2 : Πειραματική διάταξη πειράματος Β3 (σύμμικτη πλάκα.4.00m)

2.5.3 Περιγραφή μετρητικού συστήματος-αισθητήρων

2.5.3.1 Ηλεκτρομηκυσιόμετρα (strain gauges)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν επιθυμητή η καταγραφή των ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων των πλακών. Για να επιτευχθεί αυτό τοποθετήθηκε στα δοκίμια ορισμένος αριθμός ηλεκτρομηκυσιομέτρων (strain gauges) της Micro-Measurements. Στο δοκίμιο B1 αποφασίστηκε να τοποθετηθούν δύο (2) strain gauges στο χαλυβδόφυλλο, στο μέσο του ανοίγματος στο κάτω μέρος της πλάκας το ένα στην κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου και το άλλο στην άνω. Στο δοκίμιο B2 τοποθετήθηκαν δύο (2) strain gauges στην άνω επιφάνεια του σκυροδέματος της σύμμικτης πλάκας (αντιδιαμετρικά από τα αντίστοιχα ηλεκτρομηκυσιόμετρα που τοποθετήθηκαν στο χαλυβδόφυλλο) για τη μέτρηση της ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος κατά μήκος του δοκιμίου της πλάκας. Για την τοποθέτηση των ηλεκτρομηκυσιομέτρων προηγήθηκε ο επακριβής προσδιορισμός των θέσεων τους.



Σχήμα 2.5.2 Τοποθέτηση ηλεκτρομηκυσιομέτρου στο δοκίμιο.

Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα συγκολλήθηκαν στην επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου ή του σκυροδέματος με τη χρήση ειδικής εποξειδικής ρητίνης. Μετά την τοποθέτηση τους αφήνονταν να στεγνώσουν για μία μέρα τουλάχιστον και στην συνέχεια ολοκληρωνόταν η ένωση τους μέσω καλωδίου με το αυτόματο καταγραφικό σύστημα Η/Υ (data acquisition system) της πειραματικής διάταξης. Η διαδικασία τοποθέτησης των μηκυσιομέτρων περιγράφεται ως εξής:

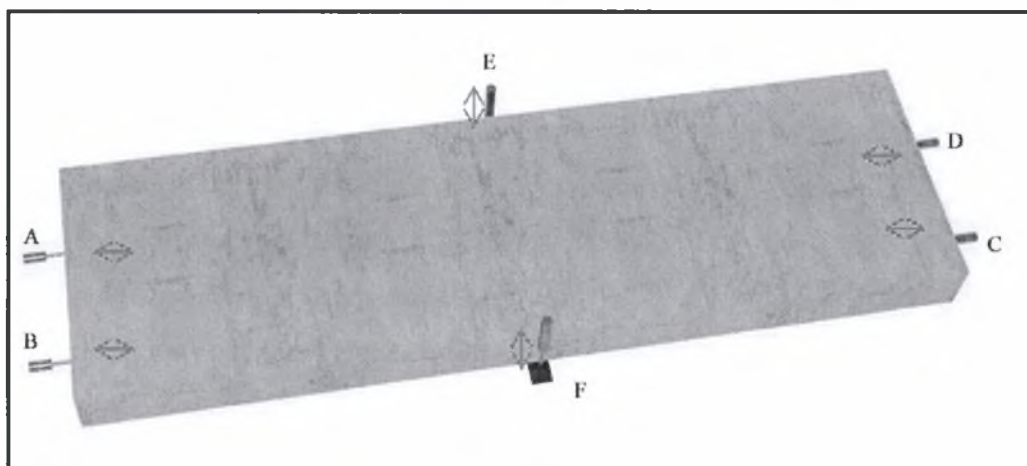
1. Προσεκτικός καθαρισμός επιφάνειας χαλυβδόφυλλου – σκυροδέματος
2. Προσδιορισμός αξόνων ηλεκτρομηκυσιομέτρων
3. Συγκόλληση στην επιφάνεια
4. Χρονική περίοδος ωρίμανσης συγκολλητικής ουσίας
5. Ένωση μέσω καλωδίων με DAC

Το ηλεκτρομηκυσιόμετρο είναι ένα λεπτό μεταλλικό κύκλωμα δεδομένης αντίστασης που επικολλάται στην υπό εξέταση επιφάνεια σώματος ενός υλικού. Όταν το σώμα υποστεί μία καταπόνηση, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, μεταφέρονται στο μεταλλικό πλέγμα και προκαλούν λόγω της μεταβολής του μήκους του, 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 για την κατασκευή του μεταλλικού πλέγματος του μηκυσιομέτρου.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η αλλαγή της αντίστασης του μηκυσιομέτρου συνδέεται ως αντίσταση σε μία γέφυρα Wheatstone. Εάν θέλουμε την παραμόρφωση από ένα μόνο μηκυσιόμετρο 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 ηλεκτρομηκυσιομέτρων φτάνει μέχρι και το ένα εκατομμυριοστό σε ανηγμένη παραμόρφωση (10^{-6} m/m).

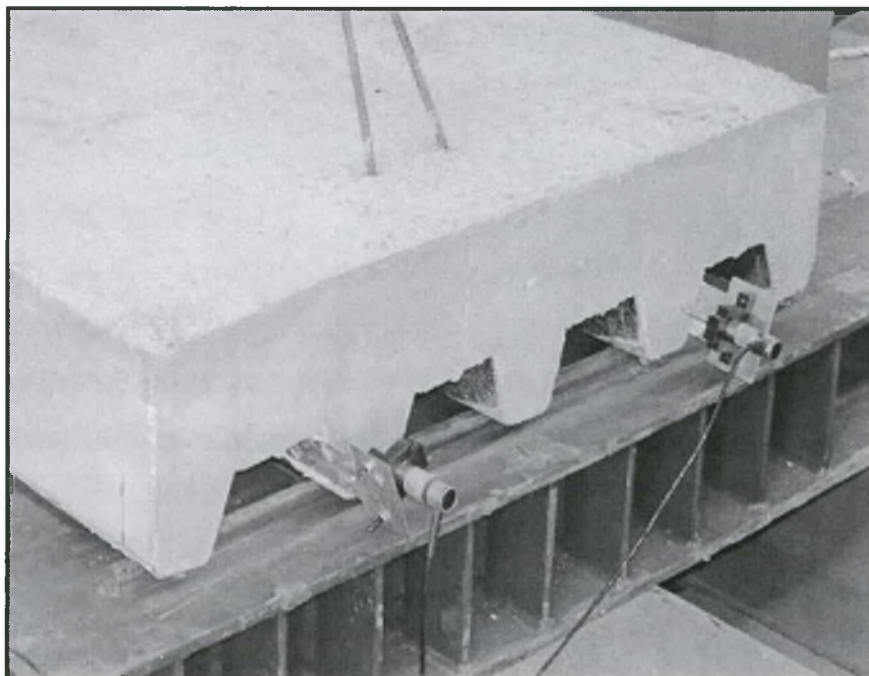
2.5.3.2 Μηκυνσιόμετρα (DCDT)

Στα δοκίμια των πλακών τοποθετήθηκαν έξι (6) μηκυνσιόμετρα (DCDT) της εταιρίας RDP Group για τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης στο μέσο του ανοίγματος και της σχετικής ολίσθησης μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκαν δύο (2) μηκυνσιόμετρα σε κάθε άκρη της πλάκας και δύο στο μέσο του ανοίγματος (Σχήμα 2.5.4). Ο λόγος για τον οποίο τοποθετήθηκαν δύο μηκυνσιόμετρα σε κάθε θέση είναι η εξασφάλιση της ασφαλούς καταγραφής των δεδομένων σε περίπτωση απώλειας κάποιου μηκυνσιόμετρου ή μη συμμετρικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.5.4 Θέσεις μηκυνσιομέτρων στο δοκίμιο της πλάκας.

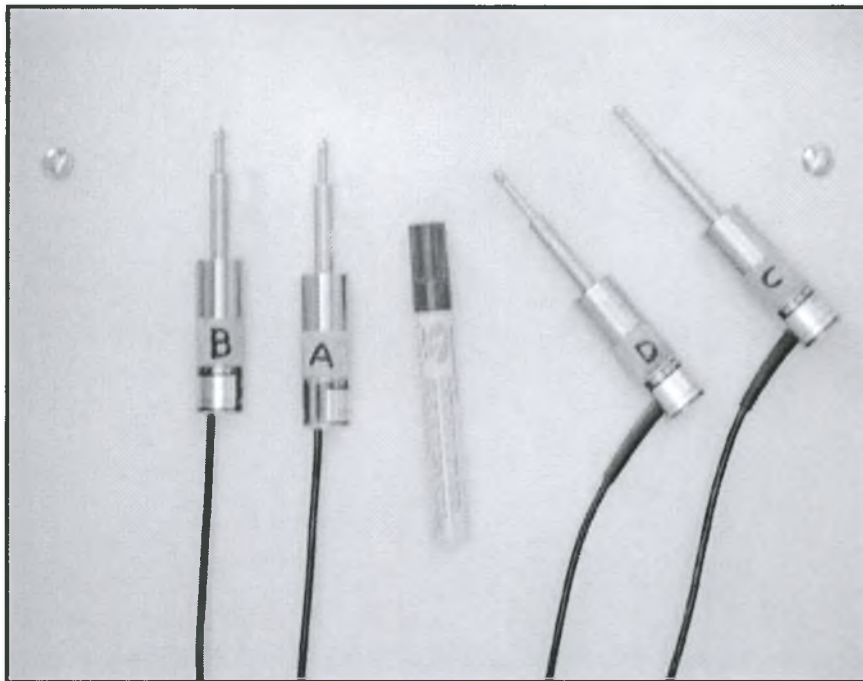
Στη αριστερή στήριξη των δοκιμίων της πλάκας τοποθετήθηκαν τα μηκυνσιόμετρα με κωδική ονομασία **A**, **B** με δυνατότητα καταγραφής μετακίνησης μέχρι 10 mm (Σχήμα 2.5.4). Για την τοποθέτησή τους κατασκευάστηκε ειδική διάταξη (Σχήμα 2.5.5) μέσω της οποίας το μηκυνσιόμετρο στηριζόταν μέσα σε πλαστικό στεφάνι τοποθετημένο σε λεπτό μεταλλικό έλασμα. Στη συνέχεια το μεταλλικό έλασμα συγκολλούνταν πάνω στο χαλυβδόφυλλο (με χρήση ρητίνης δυο συστατικών) επιτρέποντας την ακμή του μηκυνσιόμετρου να αγγίζει το σκυρόδεμα ώστε να μπορεί να καταγράψει την σχετική ολίσθηση μεταξύ των δυο υλικών.



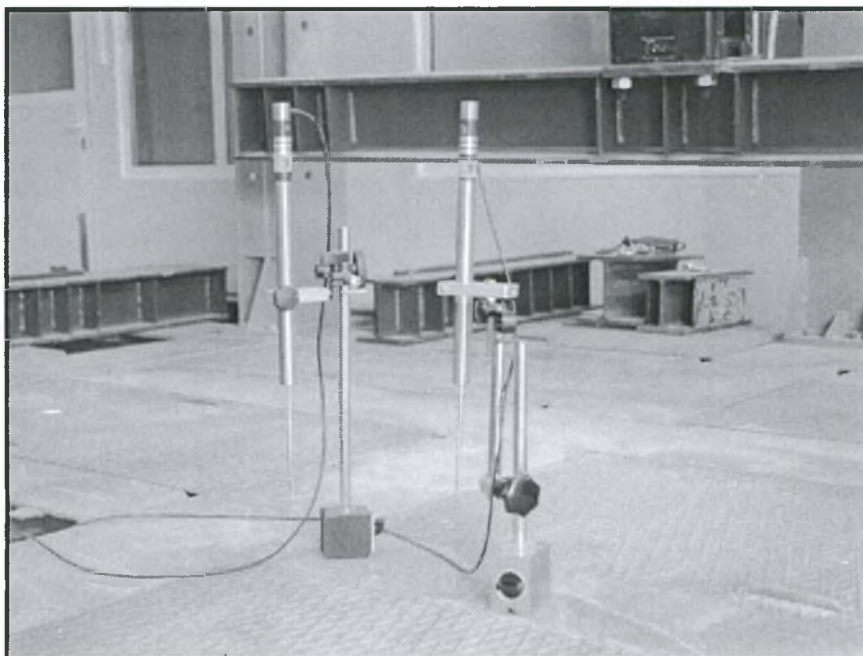
Σχήμα 2.5.5 Θέσεις μηκυνσιομέτρων στο δοκίμιο της πλάκας.

Στη δεξιά στήριξη των δοκιμίων της πλάκας τοποθετήθηκαν τα μηκυνσιόμετρα με κωδική ονομασία **C, D** με δυνατότητα καταγραφής μετακίνησης μέχρι 15 mm. Η τοποθέτηση έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που τοποθετήθηκαν τα **A, B**.

Στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων της πλάκας τοποθετήθηκαν τα μηκυνσιόμετρα με κωδική ονομασία **E, F** με δυνατότητα καταγραφής μετακίνησης, μέχρι 100 mm. Για την τοποθέτησή τους χρησιμοποιήθηκαν ειδικά μεταλλικά στηρίγματα (Σχήμα 2.5.7). Για τη μέτρηση της μετακίνησης της κάτω παρειάς της πλάκας βιδώθηκαν και συγκολήθηκαν πάνω στο χαλυβδόφυλλο μεταλλικά ελάσματα ώστε να μετρηθεί η σχετική μετακίνηση του κάτω μέρους της πλάκας και του πλαισίου φέρνοντας σε επαφή την άκρη του στελέχους με το μεταλλικό έλασμα το οποίο ήταν στο ίδιο επίπεδο με την κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου.



Σχήμα 2.5.6 Μηκυσιόμετρα A,B,C,D.

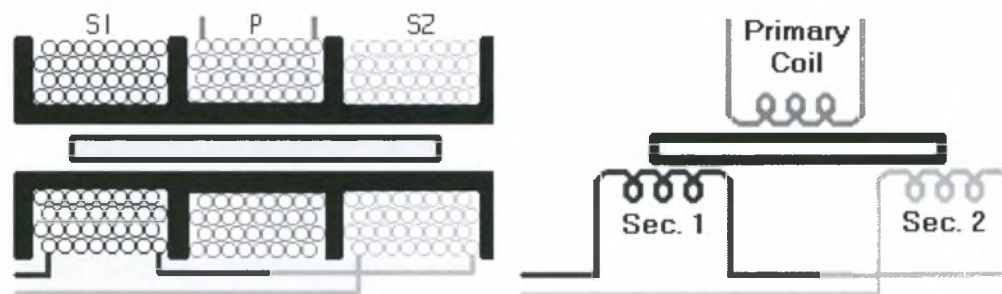


Σχήμα 2.5.7 Μηκυσιόμετρα E, F.

Χαρακτηριστικά μηκυνσιόμετρων

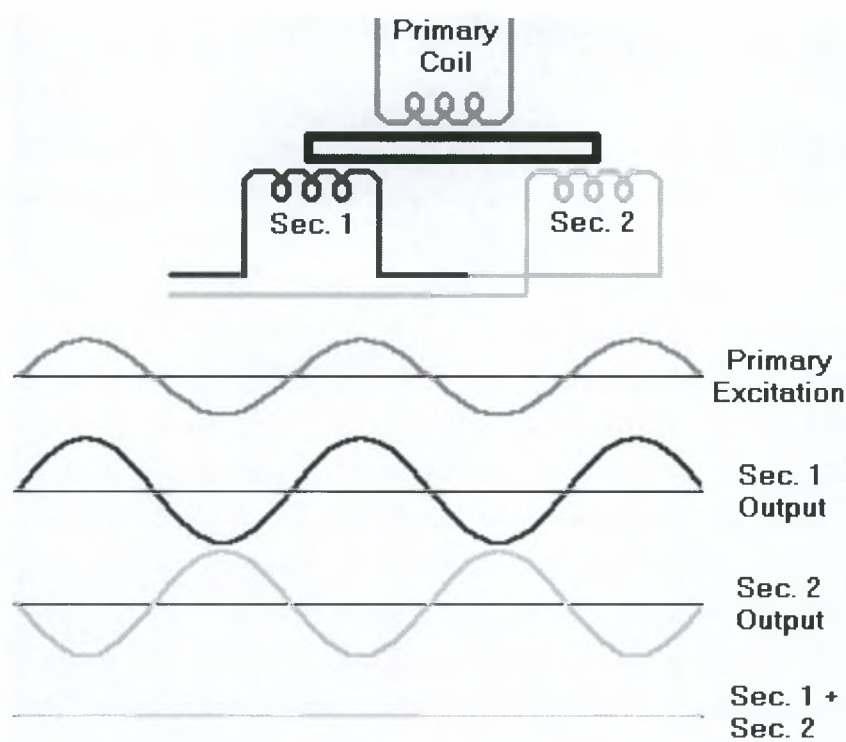
Το κύριο πλεονέκτημα των LVDT (Linear Variable Differential Transformer) σε σχέση με τους άλλους τύπους μετατροπών μετακίνησης είναι ο υψηλός βαθμός ανθεκτικότητάς τους. Αυτό προέρχεται από την ίδια την αρχή λειτουργίας τους στην οποία δεν υπάρχει καμία φυσική επαφή πέρα από το αισθητήριο στοιχείο.

Η αρχή λειτουργίας των LVDT βασίζεται στην μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή ακρίβεια καταγραφής μετακίνησης.



Σχήμα 2.5.8: Αρχή λειτουργίας LVDT ή DCDT

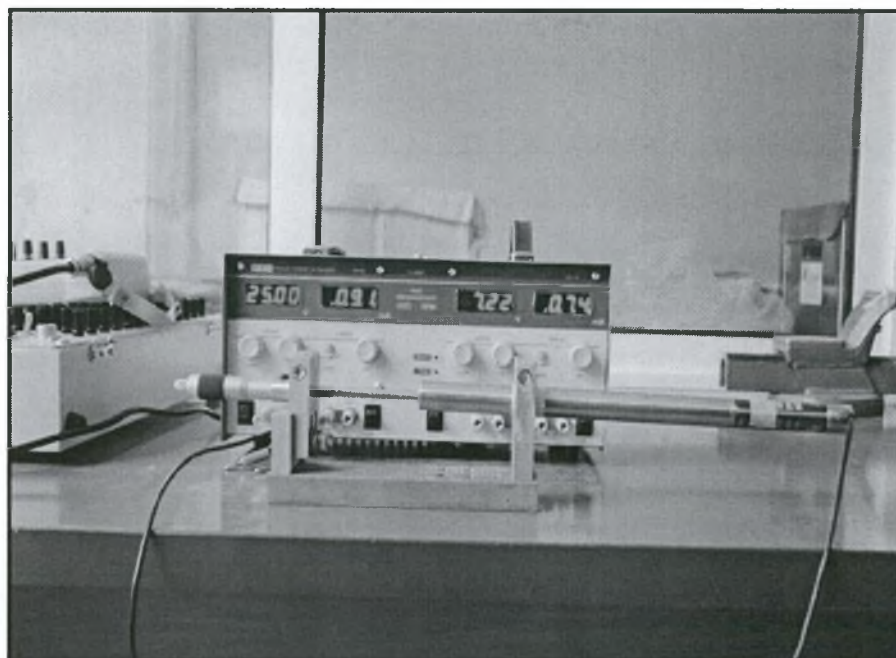
Ένα μηκυνσιόμετρο αποτελείται από ένα πηνίο που περιλαμβάνει στο εσωτερικό τρία ακόμη πηνία και ένα κινούμενο μέρος στο εσωτερικό των πηνίων που μεταβάλλει το μαγνητικό πεδίο. Ένα πρωτεύον πηνίο και δυο δευτερεύοντα. Το πρωτεύον πηνίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Τα άλλα δύο πηνία (δευτερεύοντα) τροφοδοτούνται με ίδια τιμή τάσης αλλά με αντίθετη φάση έτσι ώστε όταν το κινούμενο μέρος βρίσκεται στο μέσο των τριών πηνίων τα δυο δευτερεύοντα έχουν ίδια τάση με διαφορά φάσης 180° οπότε αλληλοαναιρούνται. Το κινούμενο μέρος ή ο ολισθαίνων ρυθμιστής του μετατροπέα μετατοπίσεων βοηθά την επαγωγή του ρεύματος στις δευτεροβάθμιες σπείρες SEC. 1 και SEC. 2. Το κινούμενο μέρος αποτελείται από ένα ειδικό μαγνητικό υλικό και συνδέεται συχνά με μια ράβδος ώθησης που δεν είναι μαγνητική. Η ράβδος ώθησης συνδέει το κινούμενο μέρος με το δοκίμιο.



Σχήμα 2.5.9: Αρχή λειτουργίας LVDT ή DCDT.

Βασισμένοι στην αρχή λειτουργίας του μηκυσιόμετρου ακολουθήθηκε η διαδικασία βαθμονόμησης του κάθε μηκυσιόμετρου. Σύμφωνα με την οποία προκύπτει η εξίσωση που συνδέει την μεταβολή της εξερχόμενης τάσης σε σχέση με την μετακίνηση που επιβάλλεται σε κάθε μηκυσιόμετρο.

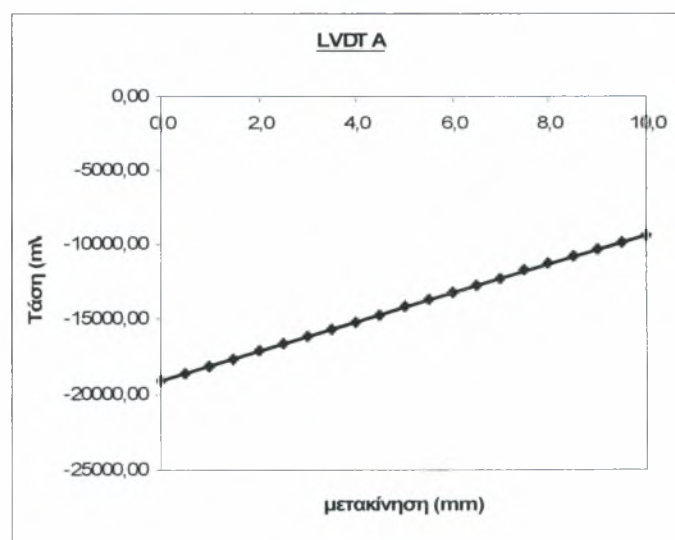
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής. Κάθε μηκυσιόμετρο που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί, συνδέθηκε με μια πηγή σταθερής τάσης συνεχούς ρεύματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση 25V) και έχοντας τοποθετήσει το μηκυσιόμετρο σε ειδική διάταξη που περιελάμβανε μικρόμετρο (Σχήμα 2.5.10) επιβλήθηκε γνωστή μετακίνηση βήματος 0,50 mm. Στη συνέχεια έχοντας συνδέσει την έξοδο του μηκυσιόμετρου με μετρητικό σύστημα καταγράφηκε η μεταβολή της τάσης εξόδου. Κάνοντας χρήση των παραπάνω τιμών προέκυπτε το διάγραμμα τάσης - μετακίνησης από το οποίο μπορούμε να προσδιορίσουμε την συνάρτηση τάσης- μετακίνησης.



Σχήμα 2.5.10: Διάταξη βαθμονόμησης μηκυσιομέτρων.

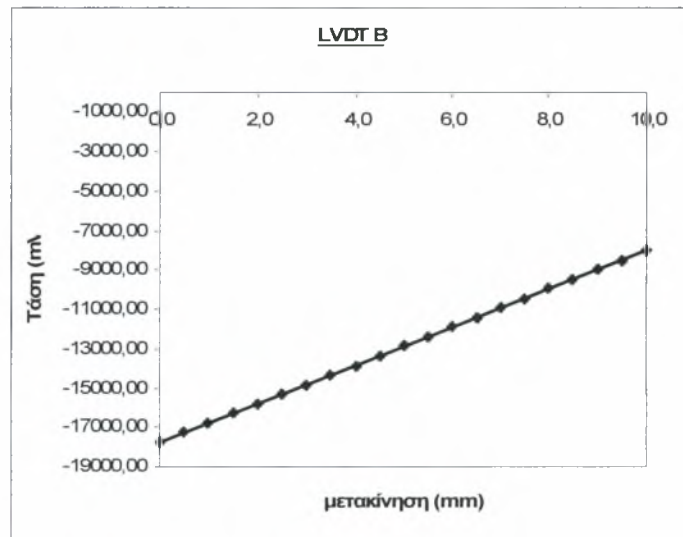
Βαθμονόμηση μηκυσιομέτρου A

Τύπος	DCTH200AG
Εύρος μετακίνησης:	10 mm
Ευαισθησία:	970,93 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



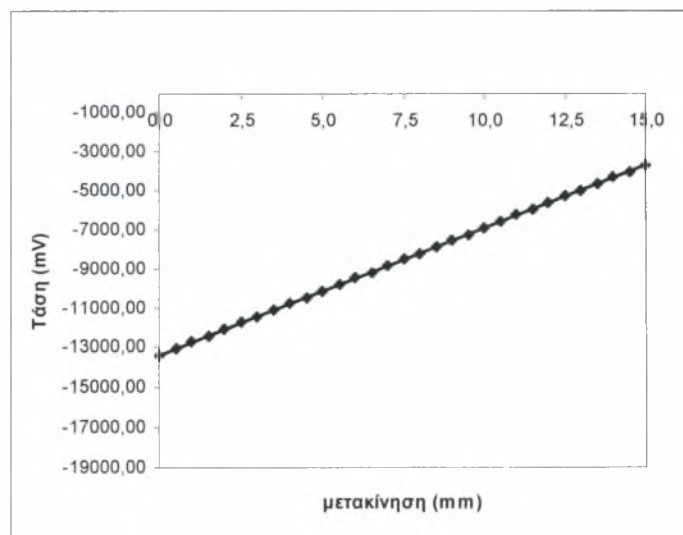
Βαθμονόμηση μηκυσιόμετρου Β

Τύπος	DCTH200AG
Εύρος μετακίνησης:	10 mm
Ευαισθησία:	972,44 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



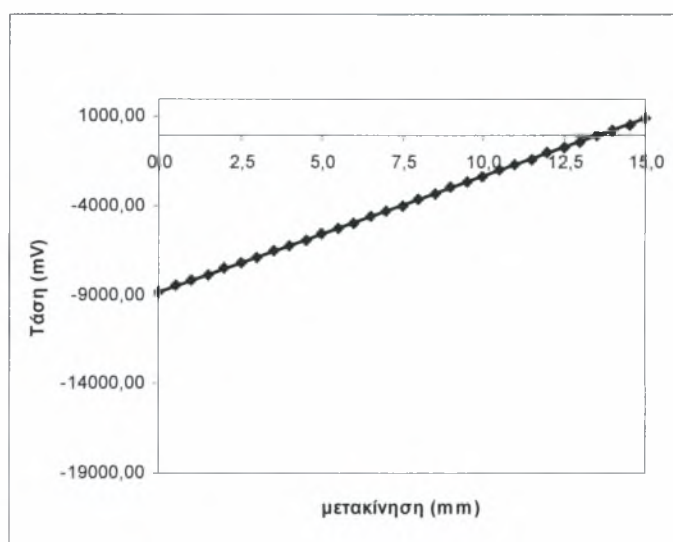
Βαθμονόμηση μηκυσιόμετρου C

Τύπος	DCTH300AGRA
Εύρος μετακίνησης:	15 mm
Ευαισθησία:	646,97 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



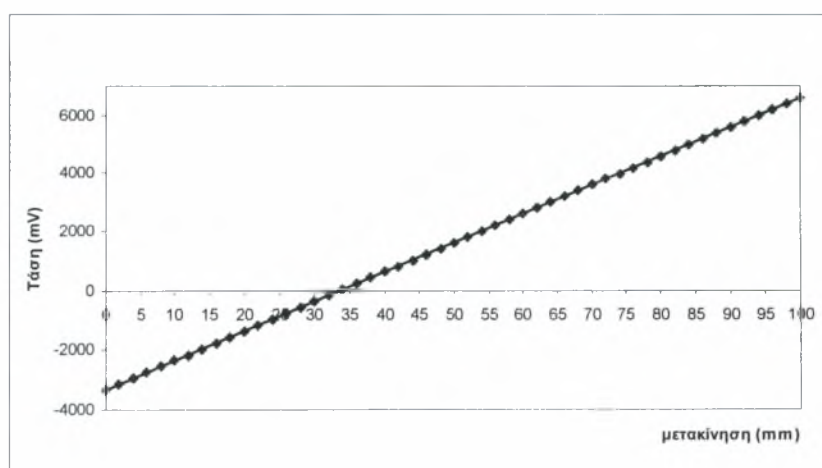
Βαθμονόμηση μηκυσιόμετρου D

Τύπος	DCTH300AGRA
Εύρος μετακίνησης:	15 mm
Ευαισθησία:	647,76 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



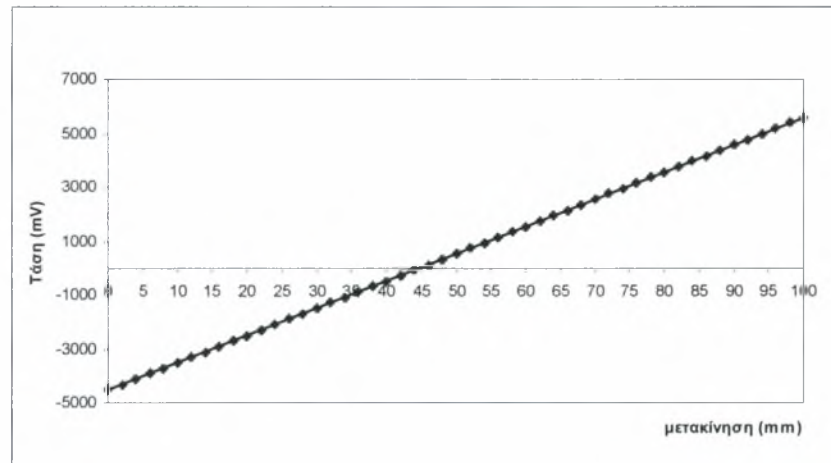
Βαθμονόμηση μηκυσιόμετρου E

Τύπος	DCTH2000A
Εύρος μετακίνησης:	100 mm
Ευαισθησία:	99,29 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



Βαθμονόμηση μηκυσιόμετρου F

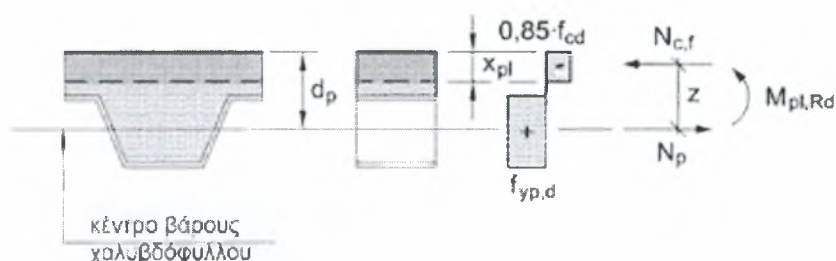
Τύπος	DCTH2000A
Εύρος μετακίνησης:	100 mm
Ευαισθησία:	101,21 mV/mm
Τάση βαθμονόμησης:	25V



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Υπολογισμός καμπτικής ροπής αντοχής

Με βάση το διάγραμμα τάσεων στη διατομή της σύμμικτης πλάκας του Σχ4.1, στην οριακή κατάσταση αστοχίας υπολογίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσεων στη διατομή της σύμμικτης πλάκας στη οριακή Κατάσταση αστοχίας σε κάμψη

α) Εφελκυστική δύναμη χαλυβδόφυλλου : $N_p = A_p \cdot f_{yp}$,

όπου f_{yp} η τάση διαρροής του χαλυβδόφυλλου με βάση εργαστηριακή δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού, $f_{yp} \cong 366 MPa$ (βλέπε Κεφ3) και $A_p = 7.12 cm^2$ (το εμβαδό της διατομής του χαλυβδόφυλλου χωρίς τα εντυπώματα).

β) Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος, $N_{c,f} = 0.85 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_{pl}$

όπου f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, με βάση εργαστηριακές δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη, $f_{cm} = 24.7 MPa$, b το πλάτος της διατομής της σύμμικτης πλάκας που λήφθηκε στους υπολογισμούς ίσο με 83 cm και x_{pl} το βάθος της θλιβόμενης ζώνης κατά τη στιγμή της αστοχίας σε κάμψη, δηλαδή σύνθλιψη του σκυροδέματος στην άνω ίνα και ταυτόχρονη διαρροή του χαλυβδόφυλλου.

Με βάση την ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων και ισοδυναμία εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών στη διατομή καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του βάθους της θλιβόμενης ζώνης:

$$N = 0 \Leftrightarrow N_{cf} = N_p \Rightarrow 0.85 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_{pl} = A_p \cdot f_{yp} \Rightarrow$$

$$x_{pl} = \frac{f_{yp} \cdot A_p}{0.85 \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Με αντικατάσταση των δεδομένων υπολογίζεται $x_{pl} = 1.5cm$

Άρα η οριακή αντοχή σε κάμψη της διατομής των δοκιμίων σύμμικτων πλακών που μελετήθηκε η πειραματική τους συμπεριφορά υπολογίζεται ως:

$$M_{pl} = A_p \cdot f_{yp} \cdot \left(d_p - \frac{x_{pl}}{2} \right) = 39.04kNm$$

Όπου $d_p = 15.725cm$ το στατικό ύψος της πλάκας που ορίζεται ως η απόσταση της άνω παρειάς της σύμμικτης πλάκας από το κέντρο βάρους της διατομής του χαλυβδόφυλλου.

4.2 Υπολογισμός αντοχής σε κατακόρυφη διάτμηση

Για τον υπολογισμό της αντοχής μιας σύμμικτης πλάκας σε κατακόρυφη διάτμηση ο EC4 προτείνει την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{v,rd} = b_0 \cdot d_p \cdot t_{rd} \cdot k_v \cdot (1.2 + 40\rho_l)$$

Όπου το χαλυβδόφυλλο συμβάλλει ως διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός ενώ η ισοδύναμη δοκός έχει διαστάσεις $b_0 \times d_p$. Το ενεργό πλάτος, b_0 εξαρτάται από το είδος του προφίλ του χαλυβδόφυλλου και δίνεται από το Σχήμα 4.2, δηλαδή ο EC4 μέσω αυτής της παραδοχής δέχεται ότι η αντοχή σε κατακόρυφη διάτμηση (τέμνουσα) παρέχεται κυρίως από το σκυρόδεμα ανάμεσα στις κατακόρυφες πλευρές του χαλυβδόφυλλου.

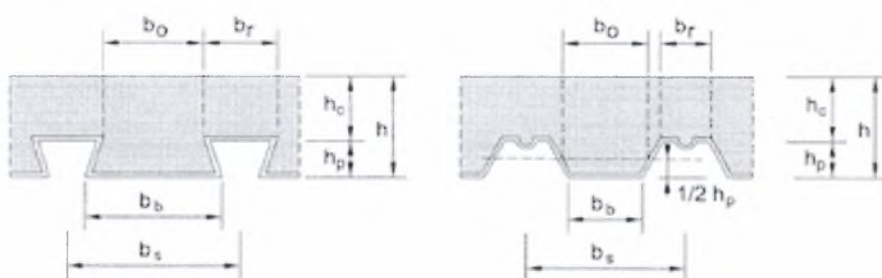
- b_0 από το Σχήμα 4.2
- d_p στατικό ύψος της πλάκας
- $t_{rd} = 0.25 \cdot \frac{f_{ctk0.05}}{\gamma_c}$
- $\rho = \frac{A_p}{b_0 \cdot d_p} \leq 0.02$
- $k_v = (1.6 - d_p) \geq 1.00$, όπου d_p σε m

Ως εμβαδόν A_p του χαλυβδόφυλλου θεωρείται η ενεργός επιφάνειά του, αμελώντας τα εντυπώματα, η οποία περιέχεται όμως μέσα στο πλάτος b_0 . Με αντικατάσταση προκύπτει ότι η αντοχή σε τέμνουσα ανά κορμό ($b_0 \times d_p$):

$$V_{v,Rd} = 0.07275 \cdot 0.15725 \cdot (0.25 \cdot 1.80) \cdot (1.6 - 0.15725) \cdot \left[1.20 + 40 \cdot \left(\frac{0.7185}{83 \cdot 15.725} \right) \right] = 10.79 kN$$

Άρα η συνολική αντοχή της σύμμικτης πλάκας πλάτους 0,83 m σε κατακόρυφη διάτμηση είναι :

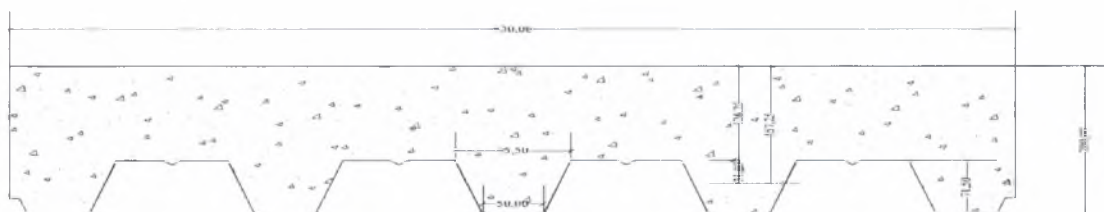
$$V_{v,Rd} = 4 \cdot 10.79 = 43.16 kN .$$



Σχήμα 4.2 Ενεργό πλάτος b_0 ανάλογα με το είδος προφίλ του χαλυβδόφυλλου

Παρακάτω υπολογίζονται οι αδρανειακές ροπές της σύμμικτης πλάκας **σταδίου I** (αρηγμάτωση διατομή) και **σταδίου II** (ρηγματωμένη διατομή) καθώς και ο υπολογισμός της ροπής ρηγμάτωσης και της τάσης του χάλυβα αμέσως μετά τη ρηγμάτωση της υπό εξέταση διατομής της σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος. Ο σχολιασμός των παρακάτω γίνεται στο Κεφάλαιο 6.

4.3 Υπολογισμός ροπής ρηγμάτωσης



Σχήμα 4.3 Σκαρίφημα διατομής σύμμικτης πλάκας που μελετήθηκε η συμπεριφορά της

A) Αρηγμάτωση διατομή (στάδιο I)

$$\text{Εμβαδόν διατομής : } A_e = A_p \cdot \eta + h_c \cdot b + 4 \cdot \frac{(b_p + b_p')}{2} \cdot h_p$$

Με αντικατάσταση στον παραπάνω τύπο έχουμε:

$$A_e = 9.52 \cdot 6.89 + 83 \cdot 12.625 + 4 \cdot \frac{(5.00 + 9.55)}{2} \cdot 7.15 = 1321.54 \text{ cm}^2$$

$$\text{Κέντρο βάρους διατομής : } z_c = \frac{A_p \cdot d_p \cdot \eta + b \cdot h_c^2 \cdot 0.5 + 2 \cdot (b_p + b_p') \cdot h_p \cdot d_p}{A_e}$$

$$z_c = \frac{9.52 \cdot 15.725 \cdot 6.89 + 83 \cdot 12.625^2 \cdot 0.5 + 2 \cdot (5.00 + 9.55) \cdot 7.15 \cdot 15.725}{1321.54} = 8.3 \text{ cm}$$

Όπου z_c είναι η απόσταση του κέντρου βάρους από την άνω ίνα της σύμμικτης πλάκας

Ροπή αδράνειας γύρω από το κέντρο βάρους :

$$I_i = I_p \cdot \eta + A_p \cdot (d_p - z_c)^2 \cdot \eta + \frac{b \cdot h_c^3}{12} + b \cdot h_c \cdot (0.5 \cdot h_c - z_c)^2 + 4 \cdot \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} + 4 \cdot \frac{(b_p + b_p')}{2} \cdot h_p \cdot (d_p - z_c)^2$$

$$I_i = 80.55 \cdot 6.89 + 9.52 \cdot (15.725 - 8.30)^2 \cdot 6.89 + \frac{83 \cdot 12.625^3}{12} + 83 \cdot 12.625 \cdot (0.5 \cdot 12.625 - 8.30)^2 + 4 \cdot \frac{7.50 \cdot 7.15^3}{12} + 4 \cdot \frac{(5.00 + 9.55)}{2} \cdot 7.15 \cdot (15.725 - 8.30)^2 = 34611.80 \text{ cm}^4$$

$$\text{Ροπή ρηγμάτωσης : } M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_i}{(h - z_c)} = \frac{2.60 \cdot 34.61180}{(20.00 - 8.30)} = 7.70 \text{ kNm}$$

B) Ρηγματωμένη διατομή (στάδιο II)

Υπολογισμός κέντρου βάρους ρηγματωμένης διατομής :

$$z_c' = \frac{\eta \cdot A_p \cdot d_p + b \cdot z_c'^2 \cdot 0.50}{\eta \cdot A_p + b \cdot z_c'} = \frac{6.89 \cdot 9.52 \cdot 15.725 + 83 \cdot z_c'^2 \cdot 0.50}{6.89 \cdot 9.52 + 83 \cdot z_c'}$$

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίστηκε $z_c' = 4.30 \text{ cm}$.

Ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής :

$$I_{ii} = \frac{83 \cdot 4.30^3}{12} + 83 \cdot 4.30^2 \cdot 0.50 + 80.55 \cdot 6.89 + 9.52 \cdot (15.725 - 4.30)^2 \cdot 6.89 = 10464.80 \text{ cm}^4$$

Υπολογισμός τάσης χάλυβα κατά την ρηγμάτωση :

$$f_s = \frac{\eta \cdot M_{cr} \cdot (h - z_c')}{I_{ii}} = \frac{6.89 \cdot 7.70 \cdot (20.00 - 4.30)}{10.46480} = 79.60 \cong 80 \text{ MPa}$$

Σημείωση : Όπου η χρησιμοποιήθηκε ο λόγος $\eta = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210}{30.50} = 6.89$. Οι

αδρανειακές ροπές υπολογίζονται σε μετασχηματισμένη διατομή σύμμικτης πλάκας σε σκυρόδεμα. Η αδρανειακή ροπή αρηγμάτωσης διατομής (σταδίου I) μετασχηματισμένης σε χάλυβα δίνεται ίση με $I_i = 5023.45 \text{ cm}^4$.

Κεφάλαιο 5

5.1. Επεξήγηση παραμέτρων πειράματος

Για να προσδιοριστεί η κατά μήκος διατμητική αντοχή της σύμμικτης πλάκας, $V_{l,rd}$, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια σύμμικτων πλακών που έχουν διαστάσεις αντίστοιχων αυτών που χρησιμοποιούνται στις πραγματικές κατασκευές.

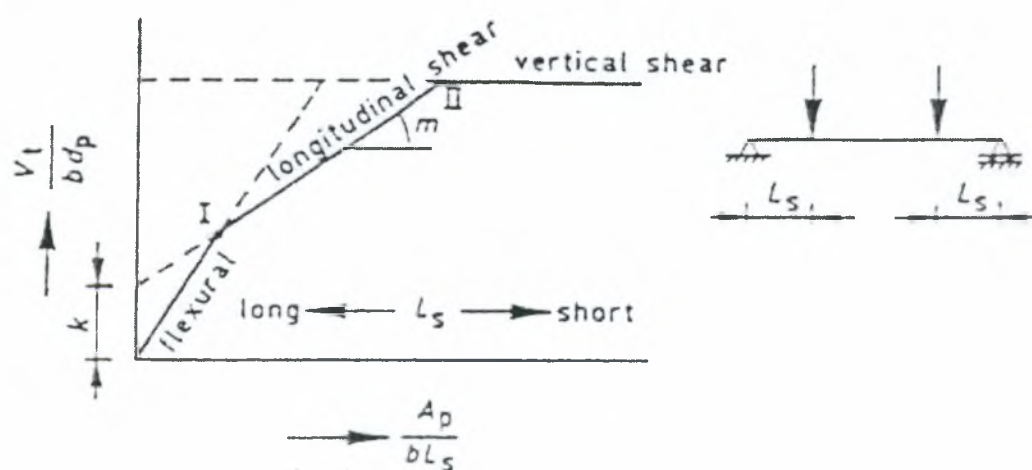
Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών μπορέσαμε να διαπιστώσουμε ποιες είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν την κατά μήκος διατμητική αντοχή. Οι παράμετροι που μπορούν να ερευνηθούν μέσω των πειραμάτων αυτών είναι το πάχος της σύμμικτης πλάκας, ο τύπος και το πάχος του χαλυβδόφυλλου, η ποιότητα και η κοκκομετρική διαβάθμιση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και το κρίσιμο διατμητικό μήκος που έχει άμεση εξάρτηση από το συνολικό άνοιγμα της σύμμικτης πλάκας.

Για τον περιορισμό του αριθμού των πειραματικών δοκιμών που χρειάζονται για να γίνει διερεύνηση όλων των παραπάνω παραμέτρων, ο EC4 προτείνει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μια σειρά πειραμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διερεύνηση διαφορετικών μεγεθών της κάθε παραμέτρου εφόσον τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν :

- Για πάχη χαλυβδόφυλλου, t , μεγαλύτερα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα
- Για πάχη σύμμικτων πλακών, h_t , μικρότερων από αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα
- Για σκυρόδεμα με χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} , όχι μικρότερη από $0,8f_{cm}$. Όπου f_{cm} ο μέσος όρος της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή δοκιμίων πλάκας των πειραμάτων
- Για χαλυβδόφυλλα με εφελκυστική τάση διαρροής, f_{yp} , όχι μικρότερη από $0,8f_{ym}$. Όπου f_{ym} ο μέσος όρος της εφελκυστικής τάσης διαρροής των χαλυβδόφυλλων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Για κάθε δοκίμιο πλάκας κατά τη διάρκεια του πειράματος γίνεται καταγραφή του φορτίου αστοχίας και του είδους της αστοχίας. Επίσης για την μελέτη και τη διερεύνηση της γενικότερης συμπεριφοράς του δοκιμίου της πλάκας καταγράφονται οι τιμές επιβαλλόμενου συνολικού φορτίου-μέγιστης μετακίνησης (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο μέσο του ανοίγματος εφόσον έχουμε το στατικό σύστημα της αμφιέριστης πλάκας) και επιβαλλόμενου συνολικού φορτίου-ολίσθησης μεταξύ των δύο υλικών, στα δύο άκρα της πλάκας.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο §1.4 τα τρία είδη της αστοχίας μπορεί να είναι: καμπτική αστοχία (περιοχή I), αστοχία λόγω σχετικής ολίσθησης των δυο υλικών (μεταξύ περιοχής I και II) και κατακόρυφη διατμητική αστοχία (περιοχή II) (Σχήμα 5.1.1). Ωστόσο για τον προσδιορισμό της κατά μήκος διατμητικής αντοχής της σύμμικτης πλάκας, το είδος της αστοχίας των δοκιμών των πλακών πρέπει να αντιστοιχεί σε αυτό της διατμητικής ολίσθησης και οι τιμές των αποτελεσμάτων να δίνουν τιμές στην περιοχή μεταξύ των σημείων I και II (Σχήμα 5.1.1).



Σχήμα 5.1.1 – Σχηματικό διάγραμμα μορφών αστοχίας σε σχέση με το άνοιγμα των πλακών

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προβήκαμε στην κατασκευή δυο σειρών δοκιμών. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι στη πρώτη σειρά δοκιμών πλακών (**Σειρά Α**) για τον προσδιορισμό του φορτίου αστοχίας χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα προρηγμάτωσης που κάλυπταν ολόκληρο το ύψος της διατομής της πλάκας ενώ στη **Σειρά Β** τα ελάσματα προρηγμάτωσης που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος της διατομής έτσι ώστε να προεξέχουν μόλις μόνο 1cm από την πάνω παρειά του χαλυβδόφυλλου. Η συγκεκριμένη αλλαγή κρίθηκε σκόπιμη γιατί το φορτίο αστοχίας που προέκυψε από τη σειρά **Α** ήταν υπερβολικά μικρό και μη ρεαλιστικό (ακολουθεί σχολιασμός στο Κεφάλαιο 6 του παρόντος). Κατά συνέπεια ο κρίσιμος παράγοντας θεωρήθηκε ότι ήταν οι διαστάσεις των ελασμάτων προρηγμάτωσης.

Στις πειραματικές δοκιμές που ακολούθησαν για τη διερεύνηση της αντοχής των σύμμικτων πλακών η μόνη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν το μήκος του ανοίγματος.

- Το πάχος των δοκιμών των πλακών επιλέχτηκε 200 mm ώστε να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα για τη μελέτη σύμμικτων πλακών με πάχη μικρότερα από 200 mm .
- Το πάχος του χαλυβδόφυλλου 0.75 mm (το μικρότερο που μπορούσε να μας παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία των χαλυβδόφυλλων) ώστε να μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για τη διερεύνηση σύμμικτων πλακών με πάχη χαλυβδόφυλλων μεγαλύτερων του 0.75 mm.
- Το πλάτος των δοκιμών επιλέχθηκε να είναι ίσο με 80 cm δηλαδή το πλάτος που καλύπτει ένα χαλυβδόφυλλο.

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	f_{ck} (MPa)	Άνοιγμα (mm)	Ls (mm)
SLAB_240A	830	24,69	2400	580
SLAB_280A	830	24,69	2800	680
SLAB_240B	830	24,69	2400	580
SLAB_320B	830	24,69	3200	780
SLAB_400B	830	24,69	4000	980

Πίνακας 5.1.1 Χαρακτηριστικά δοκιμών πλακών

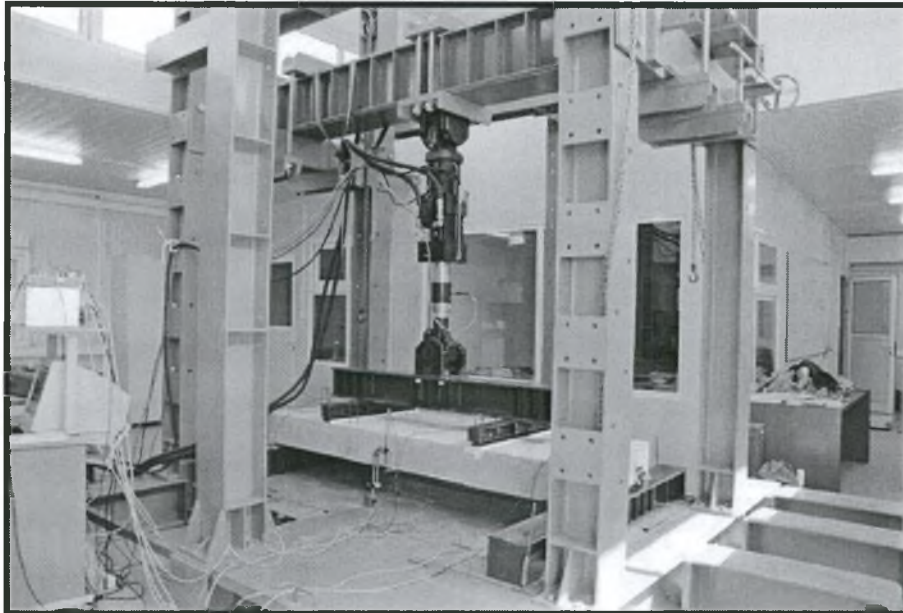
Για την ευκολότερη αναφορά σε κάθε δοκίμιο πλάκας δώσαμε σε κάθε δοκίμιο κωδική ονομασία της μορφής “**SLAB_«μήκος σε cm»«Σειρά δοκιμίων»**” π.χ. SLAB_240A όπου η λέξη slab αποτελεί μετάφραση της ελληνικής λέξης «πλάκα» στην αγγλική γλώσσα, 240 είναι το μήκος ανοίγματος του συγκεκριμένου δοκιμίου και το γράμμα **A** δηλώνει ότι το δοκίμιο αντιστοιχεί στη σειρά δοκιμίων **A**.

Για κάθε πείραμα σύμμικτης πλάκας οι πληροφορίες που καταγράφηκαν ήταν:

- ✦ Περιγραφή της πειραματικής διάταξης
- ✦ Θέση επιβαλλόμενου φορτίου.
- ✦ Διαμητικό μήκος, L_s
- ✦ Μήκος ανοίγματος δοκιμίου
- ✦ Θέση, διαστάσεις ελασμάτων προρηγμάτωσης
- ✦ Προεξέχων τμήμα της σύμμικτης πλάκας από τις στηρίξεις
- ✦ Βάρος μεταλλικών δοκών φόρτισης
- ✦ Το ίδιο βάρος της σύμμικτης πλάκας
- ✦ Ρυθμός επιβολής του φορτίου
- ✦ Τύπος φόρτισης
- ✦ Μέγιστη μετακίνηση στο μέσον του ανοίγματος
- ✦ Μετακίνηση εμβόλου επιβολής φορτίου
- ✦ Σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών
- ✦ Θέσεις ρωγμών

5.2 Πείραμα Α1 (δοκίμιο πλάκας L=2.40 m, b=0.83 m)

Κωδικός Πειράματος : SLAB_240A

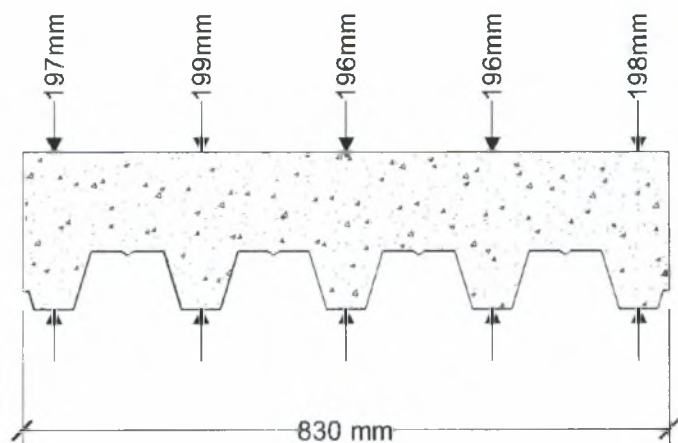


Ημερομηνία σκυροδέτησης : 26 Ιανουαρίου 2005
 Ημερομηνία πειράματος: 8 Απριλίου 2005
 Ηλικία δοκιμίου πλάκας: 73 ημέρες
 Διάρκεια πειράματος : 20 min
 Είδος φόρτισης : Κάμψη 4 σημείων

Διαστάσεις Δοκιμίου:

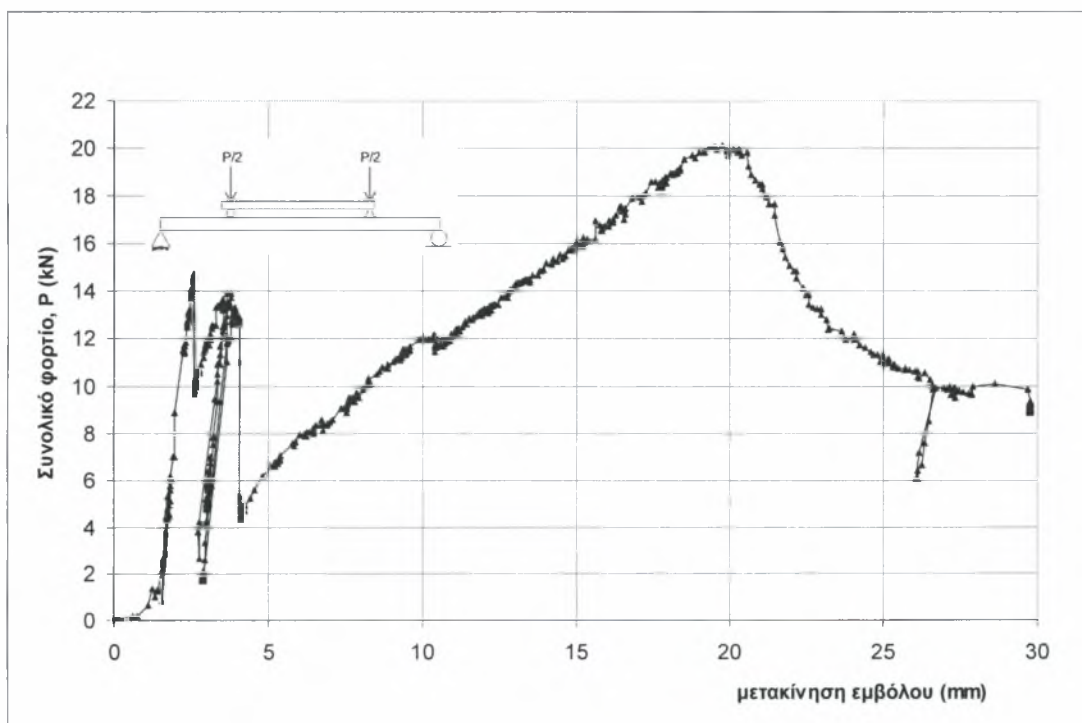
Μήκος 2400 mm
 Μέσο πλάτος 830 mm
 Μέσο πάχος 197 mm

Βάρος δοκιμίου πλάκας : 788 Kg



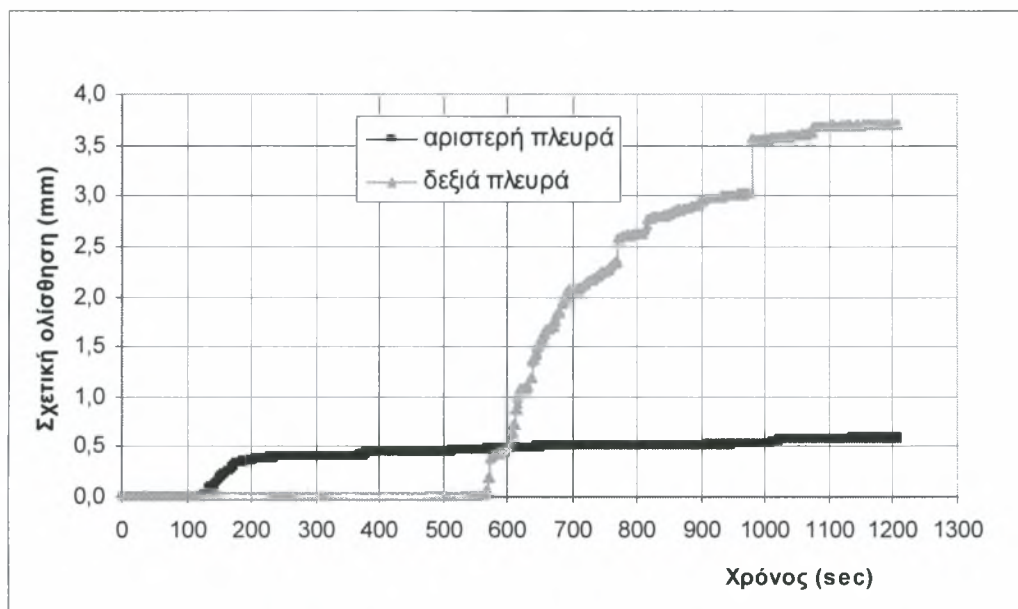
Το δοκίμιο υπεβλήθη σε στατική φόρτιση κάμψης 4 σημείων. Το φορτίο υπεβλήθη ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβουδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με την πλάκα σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο 20,14 kN. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγμάτωσης (crack inducers), δηλαδή στις θέσεις $L/4$ και $3L/4$ από την αριστερή στήριξη του δοκιμίου.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή σύμφωνα με τον EC4 καθώς το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος στο φορτίο αστοχίας του δοκιμίου ήταν μικρότερο της προκαθορισμένης τιμής του $L/50$ ($= 232/50 = 4,6$ cm).



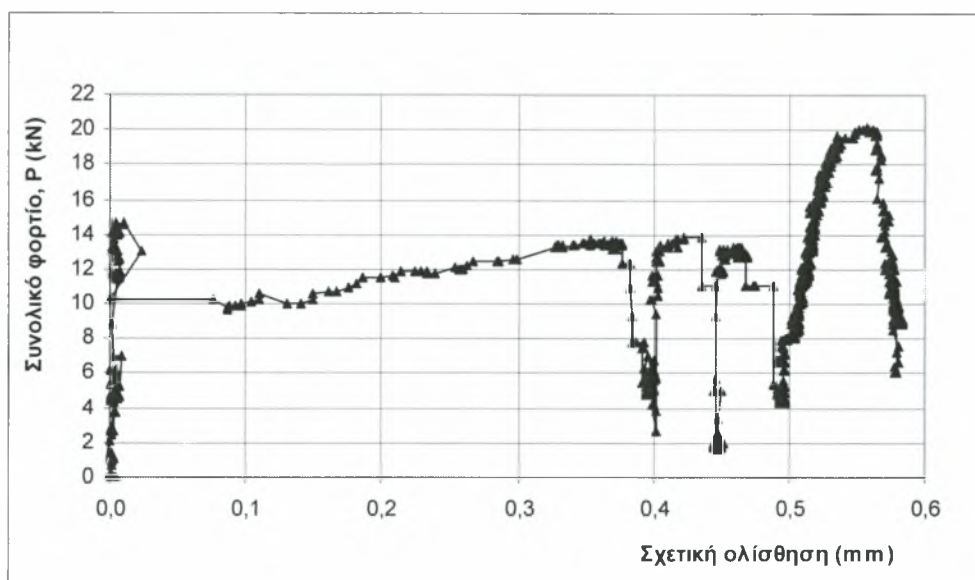
Σχήμα 5.2.1 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου

Κατά την αστοχία σημειώθηκε σχετική ολίσθηση αρχικά στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου και στη συνέχεια στη δεξιά όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα σχετικής ολίσθησης – χρόνου (Σχήμα 5.2.2).



Σχήμα 5.2.2 - Διάγραμμα σχετικής ολίσθησης χαλυβδόφυλλου – πλάκας σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

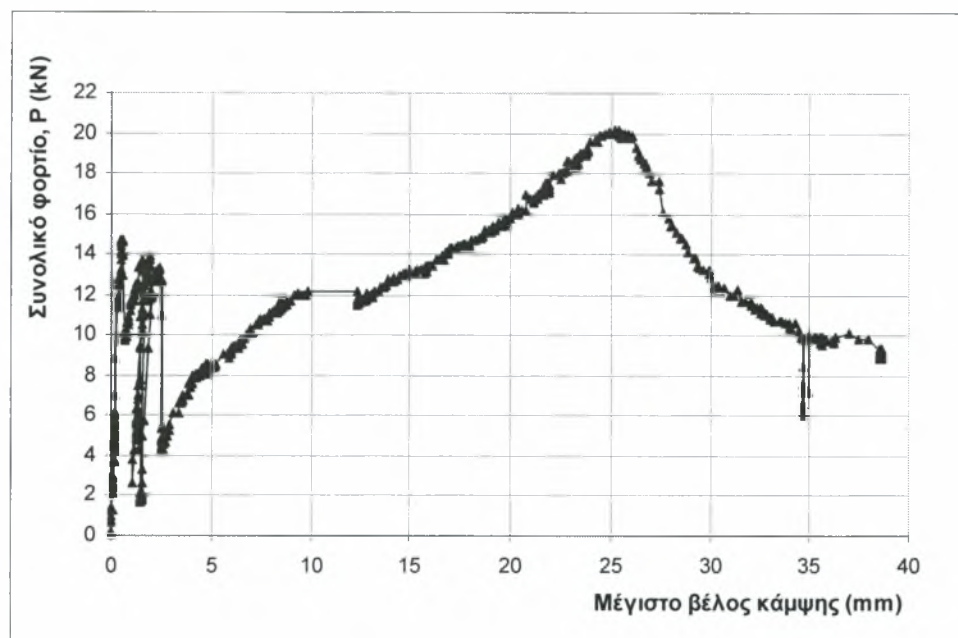
Η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η αστοχία της σύμμικτης πλάκας με την ταυτόχρονη ολίσθηση στη δεξιά πλευρά ήταν 120 δευτερόλεπτα από την αρχή του πειράματος και 450 δευτερόλεπτα αργότερα σημειώθηκε ολίσθηση στην αριστερή πλευρά της πλάκας (Σχήμα 5.2.2).



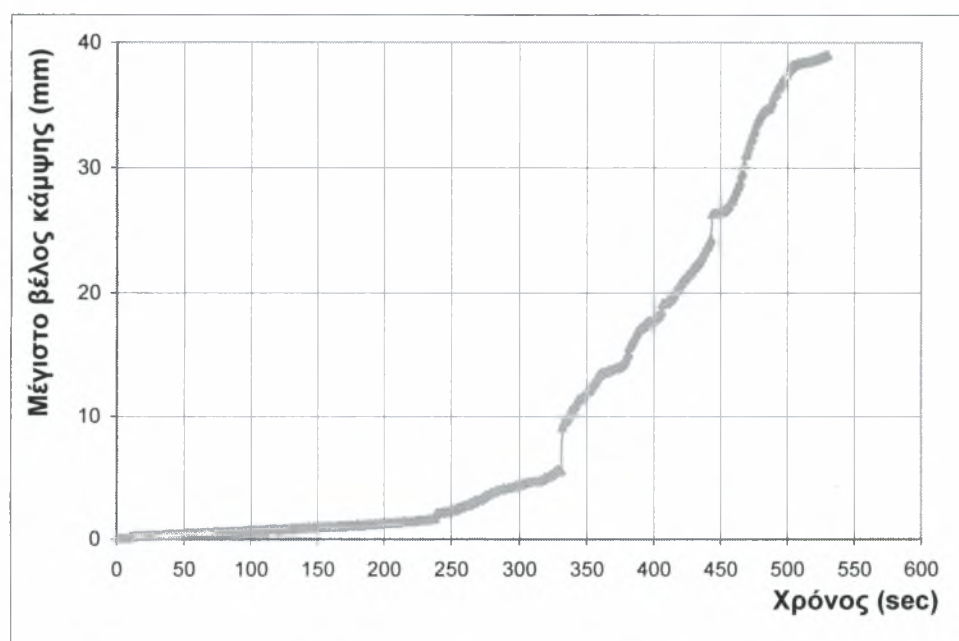
Σχήμα 5.2.3 - Διάγραμμα φορτίου –σχετικής ολίσθησης στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.2.3) γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε στο φορτίο των 15,40 kN, τιμή μικρότερη από αυτή της αστοχίας. Σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η τελική αστοχία συνέβη σε φορτίο μεγαλύτερο από αυτό στο οποίο σημειώθηκε η πρώτη σχετική ολίσθηση, στοιχείο που έχει άμεση σχέση με την επιλογή του ύψους των ελασμάτων προρηγμάτωσης. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα ελάσματα προρηγμάτωσης στη σειρά δοκιμίων Α είχαν ύψος ίσο με τη διατομή της υπό εξέταση σύμμικτης πλάκας, δηλαδή πέρα από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (την οποία καταργούμε βάσει των οδηγιών για την πειραματική διάταξη του EC4) καταργούμε και την συνεισφορά του σκυροδέματος στην ανάληψη των θλιπτικών τάσεων που δημιουργούνται από την κάμψη στη διατομή της πλάκας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.4 κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου των 20,14 kN σημειώθηκε μέγιστο βέλος κάμψης 25 mm. Η τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν τα δύο μηκυσιόμετρα (DCDT) στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας.

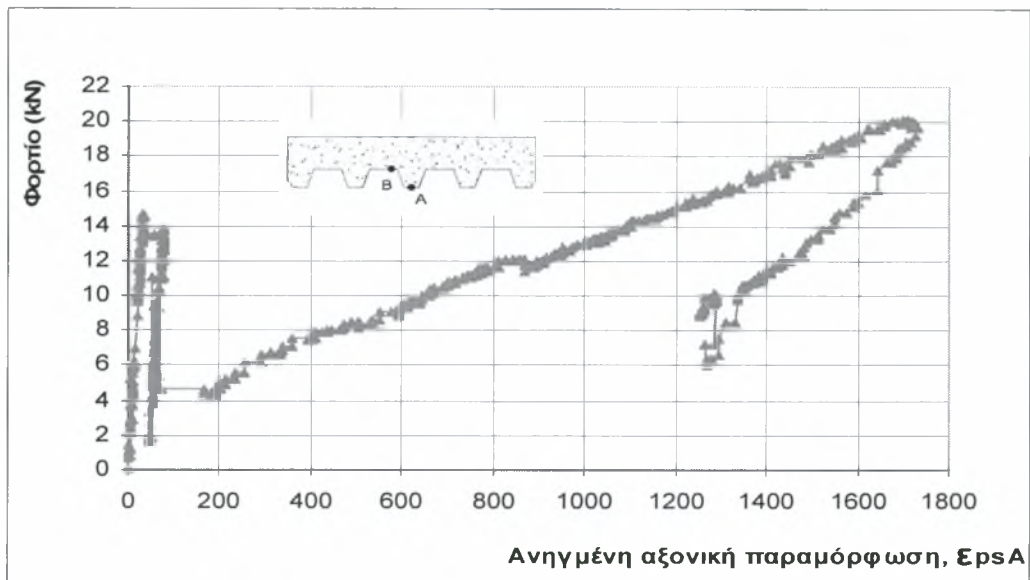


Σχήμα 5.2.4 - Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας

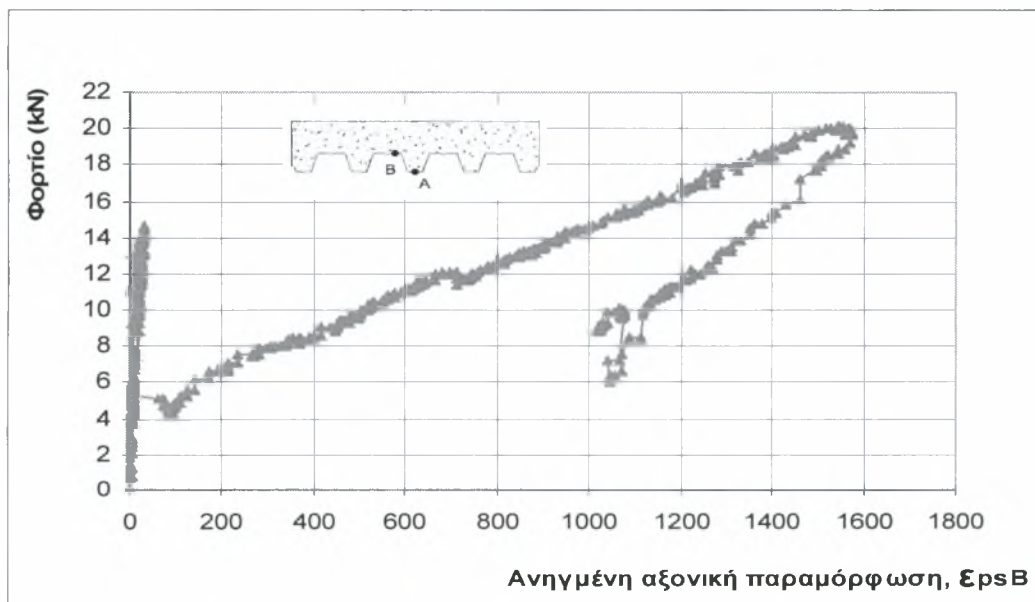


Σχήμα 5.2.5 Διάγραμμα βέλους κάμψης – χρόνου στο μέσον του ανοίγματος

Μετά την αστοχία που σημειώθηκε την χρονική στιγμή των 240 δευτερολέπτων από την έναρξη του πειράματος το μέγιστο βέλος κάμψης της πλάκας αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.5.



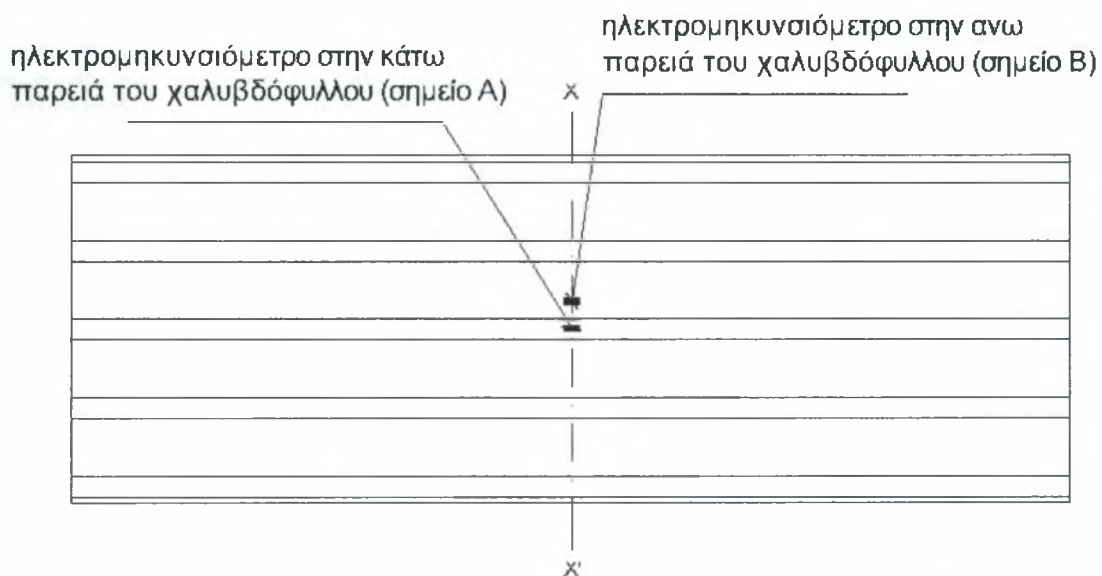
Σχήμα 5.2.6 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης παραμόρφωσης του χαλυβδόφυλλου στο μέσον του ανοίγματος στην κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο A)



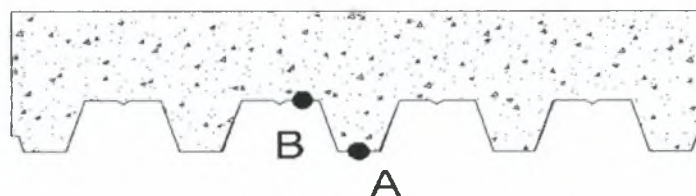
Σχήμα 5.2.7 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης παραμόρφωσης στο μέσον του ανοίγματος στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο B)

Στο πείραμα αυτό για να μετρήσουμε την ανηγμένη αξονική παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο τοποθετήσαμε δυο ηλεκτρομηκυσιομέτρα (strain gauges), το πρώτο στην κάτω και το δεύτερο στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σχήμα 4.2.11). Στο σχήμα 5.2.6 παρατηρούμε ότι η

ανηγμένη αξονική παραμόρφωση τη στιγμή της αστοχίας ήταν περίπου 1,57‰ που είναι μικρότερη από την τιμή της διαρροής του χαλυβδόφυλλου (περίπου 2‰). Το ίδιο παρατηρούμε και στο σχήμα 5.2.7.



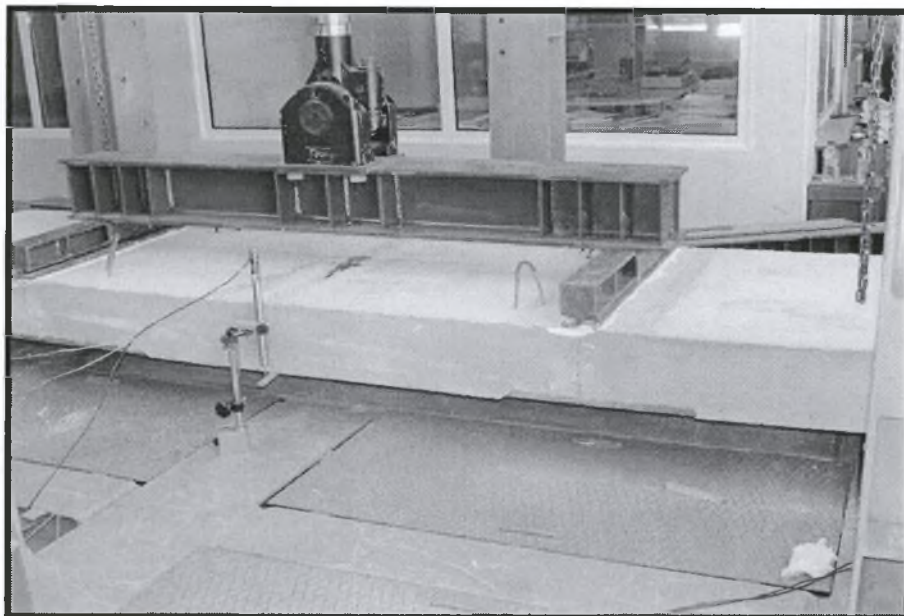
Σχήμα 5.2.8 Κάτοψη χαλυβδόφυλλου, θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων



Σχήμα 5.2.9 Τομή X X' δοκιμίου πλάκας, θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων

5.3 Πείραμα Α2 (δοκίμιο πλάκας L=2.80 m, b=0.83 m)

Κωδικός Πειράματος : SLAB_280A

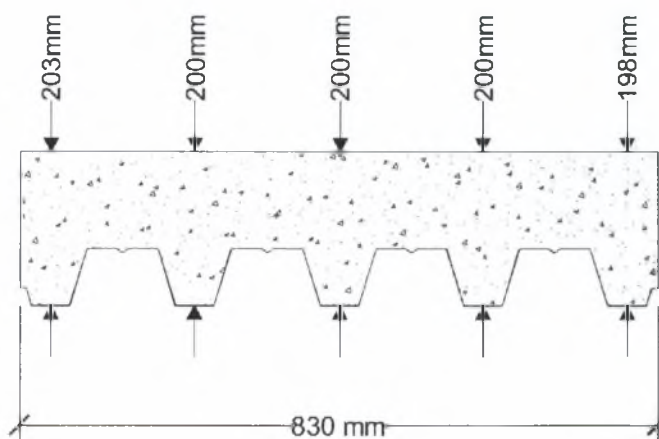


Ημερομηνία σκυροδέτησης : 26 Ιανουαρίου 2005
 Ημερομηνία πειράματος: 12 Μαΐου 2005
 Ηλικία δοκιμίου πλάκας: 107 ημέρες
 Διάρκεια πειράματος : 7,3 min
 Είδος φόρτισης : Κάμψη 4 σημείων

Διαστάσεις Δοκιμίου:

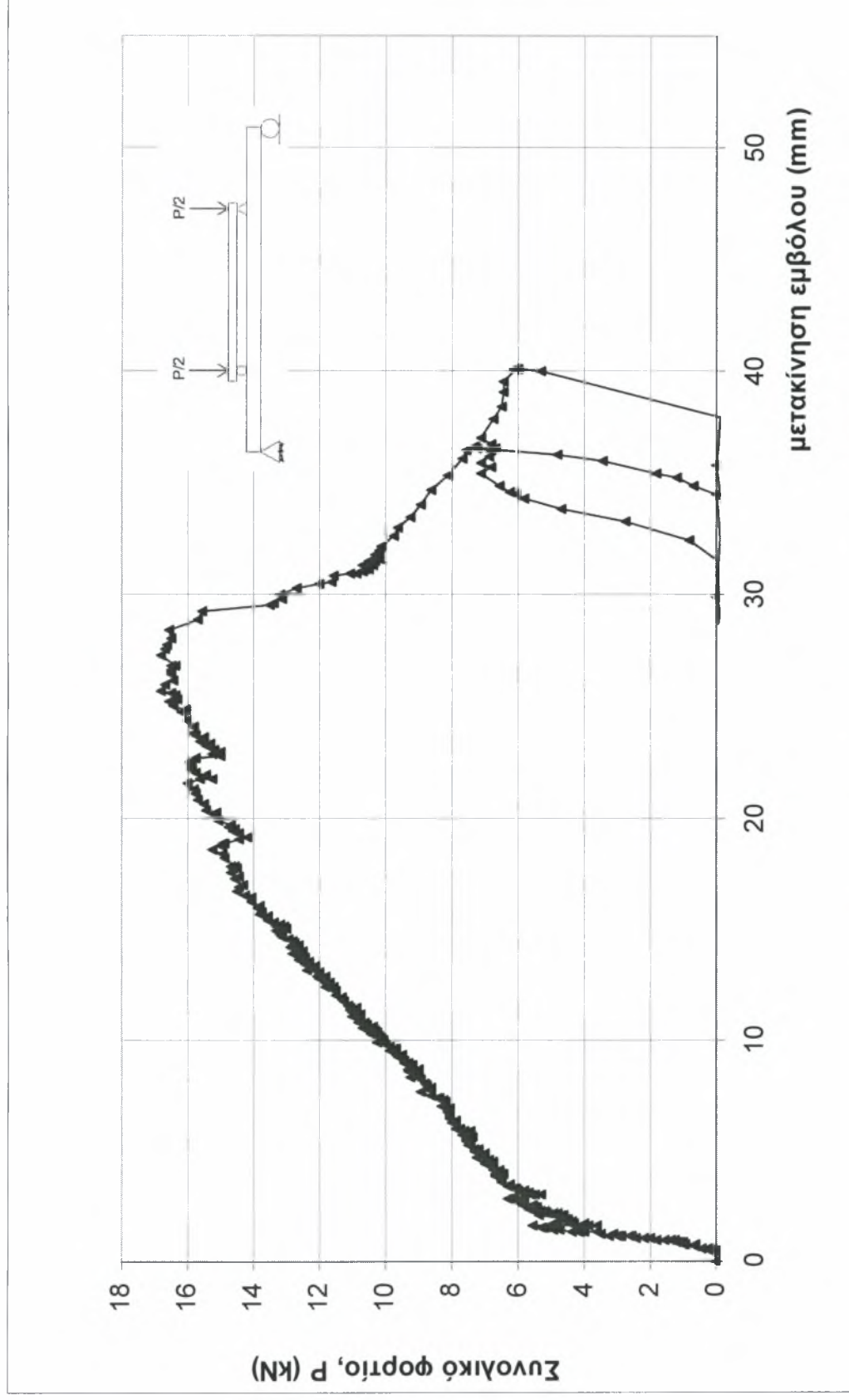
Μήκος 2800 mm
 Μέσο πλάτος 830 mm
 Μέσο πάχος 200 mm

Βάρος δοκιμίου πλάκας : 920 Kg



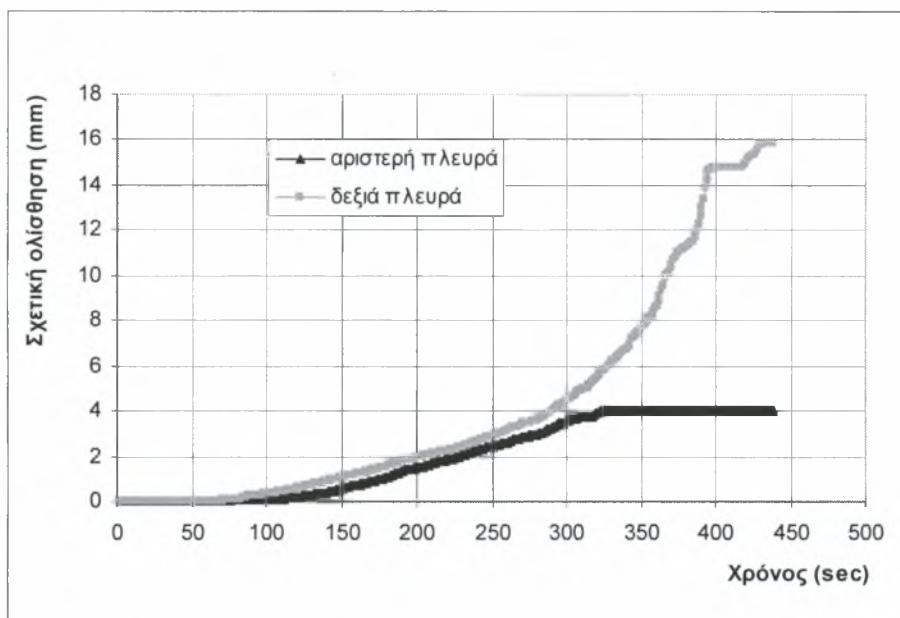
Το δοκίμιο υπεβλήθη σε μονοτονική στατική φόρτιση κάμψης 4 σημείων (Σχήμα 5.3.1). Το φορτίο υπεβλήθη με σταθερό ρυθμό φόρτισης ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβουδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με την πλάκα σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο 16,80 kN. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγμάτωσης (crack inducers) , δηλαδή στις θέσεις L/4 και 3L/4 από την αριστερή στήριξη του δοκιμίου.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή σύμφωνα με τον EC4 καθώς το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος στο φορτίο αστοχίας του δοκιμίου ήταν μικρότερο της προκαθορισμένης τιμής του L/50 (= $272/50 = 5,4$ cm). Στο συγκεκριμένο πείραμα παρατηρήθηκε μία επί πλέον αύξηση του φορτίου μετά την αστοχία από υπέρβαση της κατά μήκος διατμητικής τάσης. Ενώ το μέγιστο συνολικό φορτίο είχε την τιμή 16,80 kN το φορτίο για το οποίο παρατηρήθηκε ολίσθηση είχε τιμή 5 kN. Είναι εμφανές στο Σχήμα 5.3.1 ότι στο φορτίο των 5kN παρατηρείται μία αλλαγή στην δυσκαμψία του φορέα, στοιχείο που αποτελεί ένδειξη κάποιου είδους αστοχίας. Τελικά όμως το δοκίμιο της σύμμικτης πλάκας φέρει φορτίο μεγαλύτερο.



Σχήμα 5.3.1 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου

Κατά την αστοχία σημειώθηκε σχετική ολίσθηση η οποία ξεκίνησε σχεδόν ταυτόχρονα και από τις δύο πλευρές του δοκιμίου της πλάκας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3.2. Δηλαδή το δοκίμιο κατά την αστοχία έχει μία «συμμετρική» συμπεριφορά.

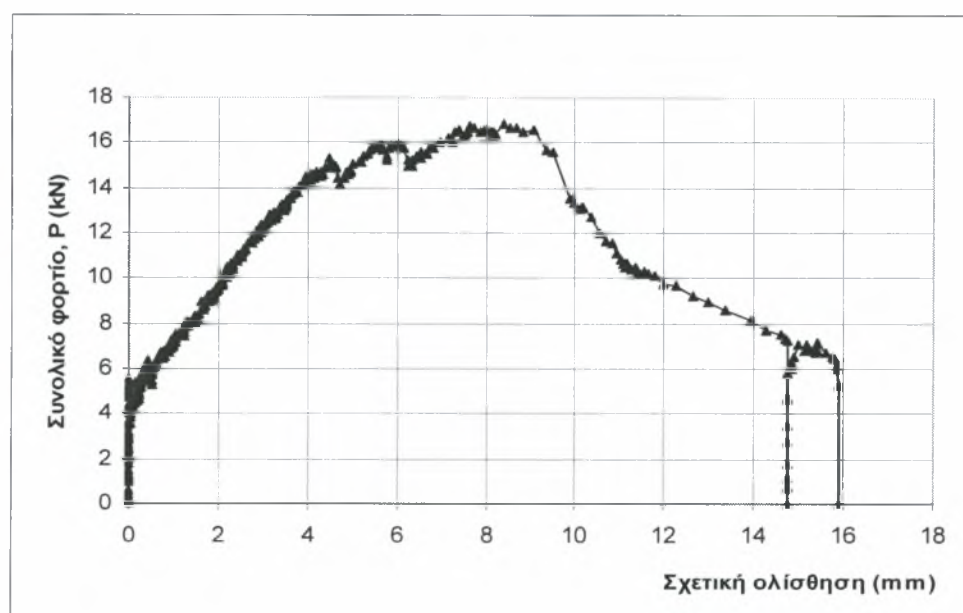


Σχήμα 5.3.2 - Διάγραμμα σχετικής ολίσθησης χαλυβδόφυλλου – πλάκας σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η αστοχία της σύμμικτης πλάκας με την ταυτόχρονη ολίσθηση ήταν 80 δευτερόλεπτα περίπου από την έναρξη του πειράματος.



Σχήμα 5.3.3 - Τελική κατάσταση της πλάκας στις στηρίξεις, μεγάλη σχετική ολίσθηση

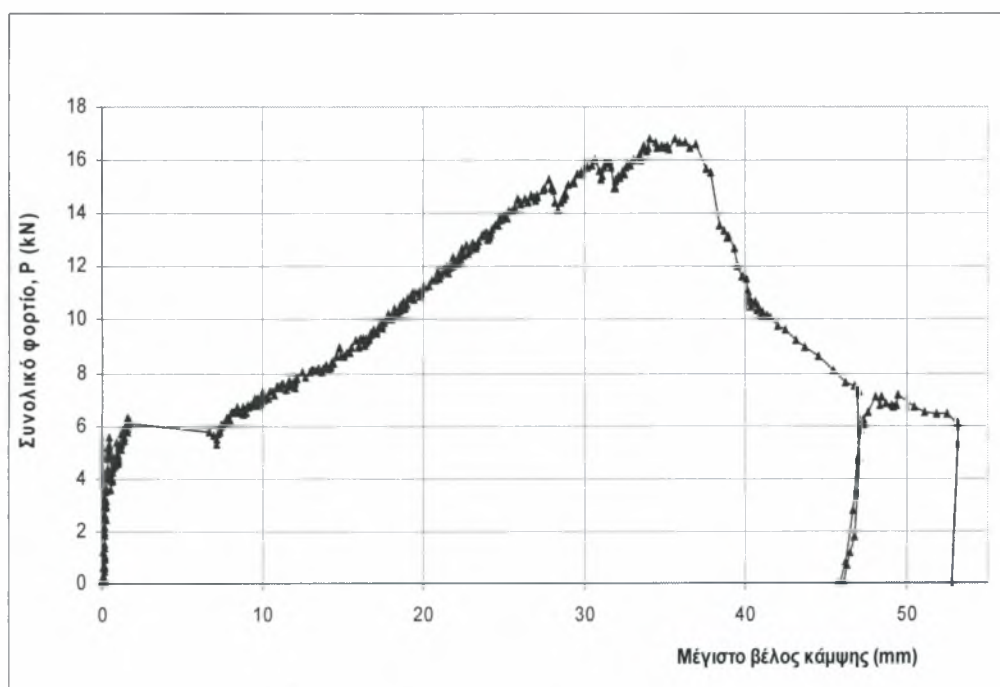


Σχήμα 5.3.4 - Διάγραμμα φορτίου –σχετικής ολίσθησης στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας

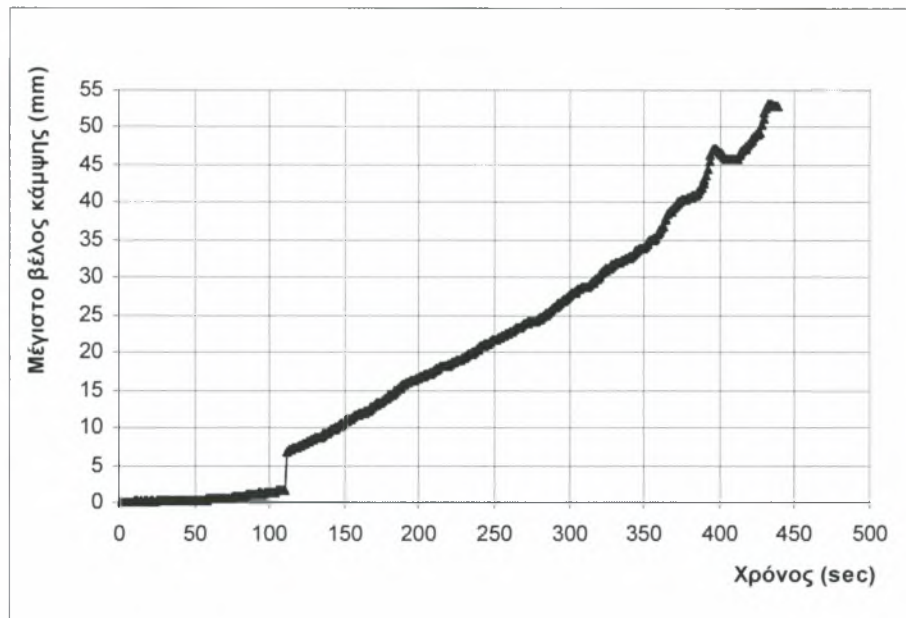
Στα παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.3.4) γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε στο φορτίο των 5 kN. Μέχρι αυτή τιμή του φορτίου δεν παρατηρήθηκε σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Στη συνέχεια

φορτίο και μετακίνηση αποκτούν γραμμική «σχέση» μεταξύ τους έως το τελικό μέγιστο φορτίο αστοχίας. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται μερικώς στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο πείραμα είχαν τοποθετηθεί ελάσματα προρηγματώσης τα οποία κάλυπταν όλο το ύψος της διατομής του δοκιμίου και μετά την ρηγμάτωση της διατομής η κατακόρυφη δύναμη του εμβόλου μεταβιβαζόταν εξ' ολοκλήρου στο χαλυβδόφυλλο μέσω του κατακόρυφου ελάσματος προρηγματώσης. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τιμή της ολίσθησης μπορεί να θεωρηθεί σωστή αφού επηρεάζεται άμεσα από το έλασμα προρηγματώσης που αυξάνει περαιτέρω την όποια ολίσθηση παρατηρείται.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.5 κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου των 16,80 kN σημειώθηκε μέγιστο βέλος κάμψης 38 mm. Η τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν τα δύο μηκυνσιόμετρα (DCDT) στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας.



Σχήμα 5.3.5 - Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας

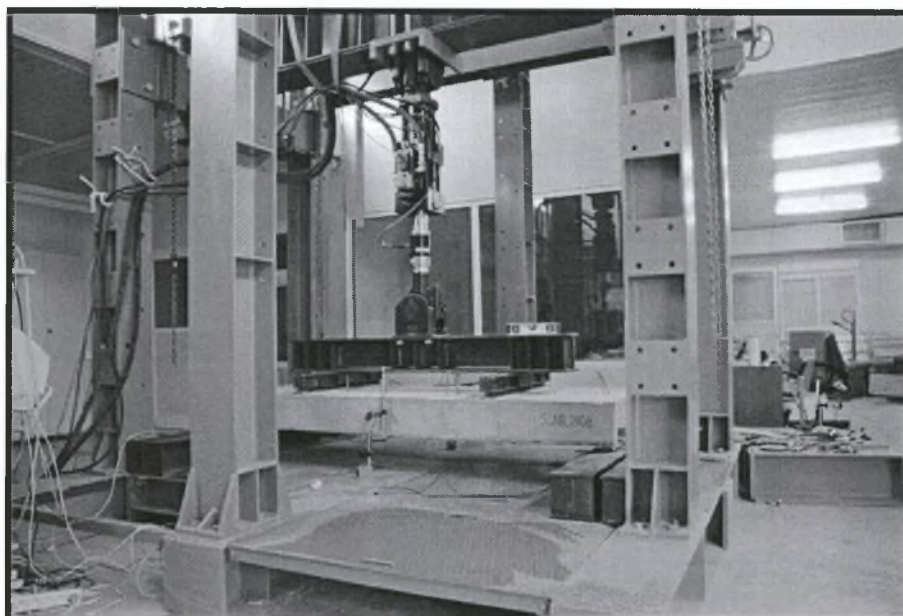


Σχήμα 5.3.6 Διάγραμμα βέλους κάμψης – χρόνου στο μέσον του ανοίγματος

Μετά την αστοχία που σημειώθηκε την χρονική στιγμή των 80 δευτερολέπτων από την έναρξη του πειράματος το μέγιστο βέλος κάμψης της πλάκας αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.6.

5.4 Πείραμα Β1 (δοκίμιο πλάκας L=2.40 m, b=0.83 m)

Κωδικός Πειράματος : SLAB_240B

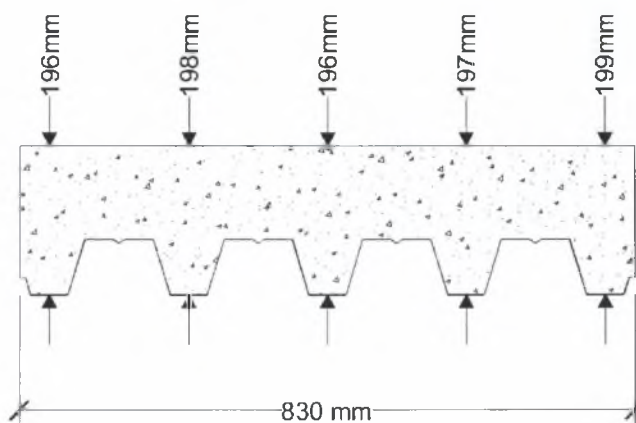


Ημερομηνία σκυροδέτησης : 28 Απριλίου 2005
 Ημερομηνία πειράματος: 31 Μαΐου 2005
 Ηλικία δοκιμίου πλάκας: 34 ημέρες
 Διάρκεια πειράματος : 8,8 min
 Είδος φόρτισης : Μονοτονική στατική κάμψη 4 σημείων

Διαστάσεις Δοκιμίου:

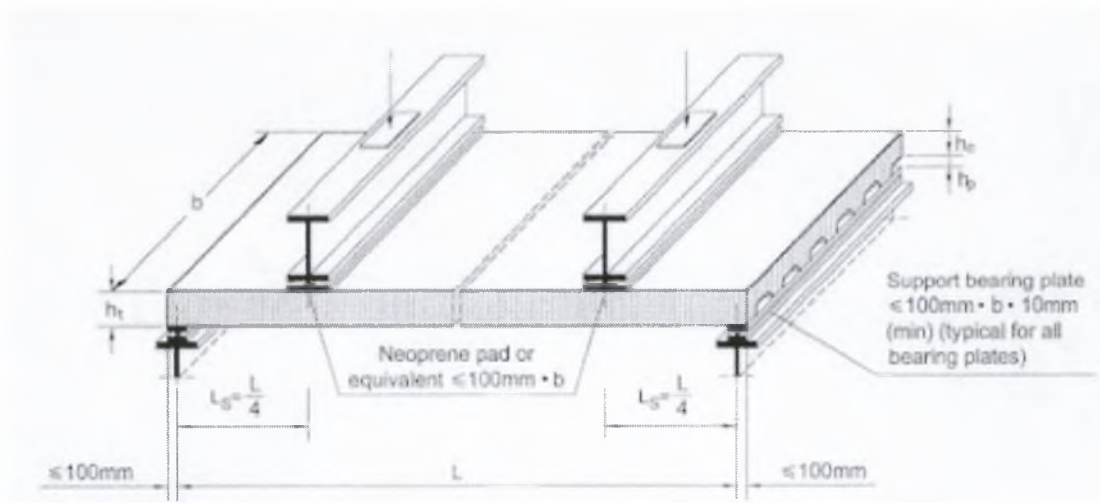
Μήκος 2400 mm
 Μέσο πλάτος 830 mm
 Μέσο πάχος 197 mm

Βάρος δοκιμίου πλάκας : 788 Kg

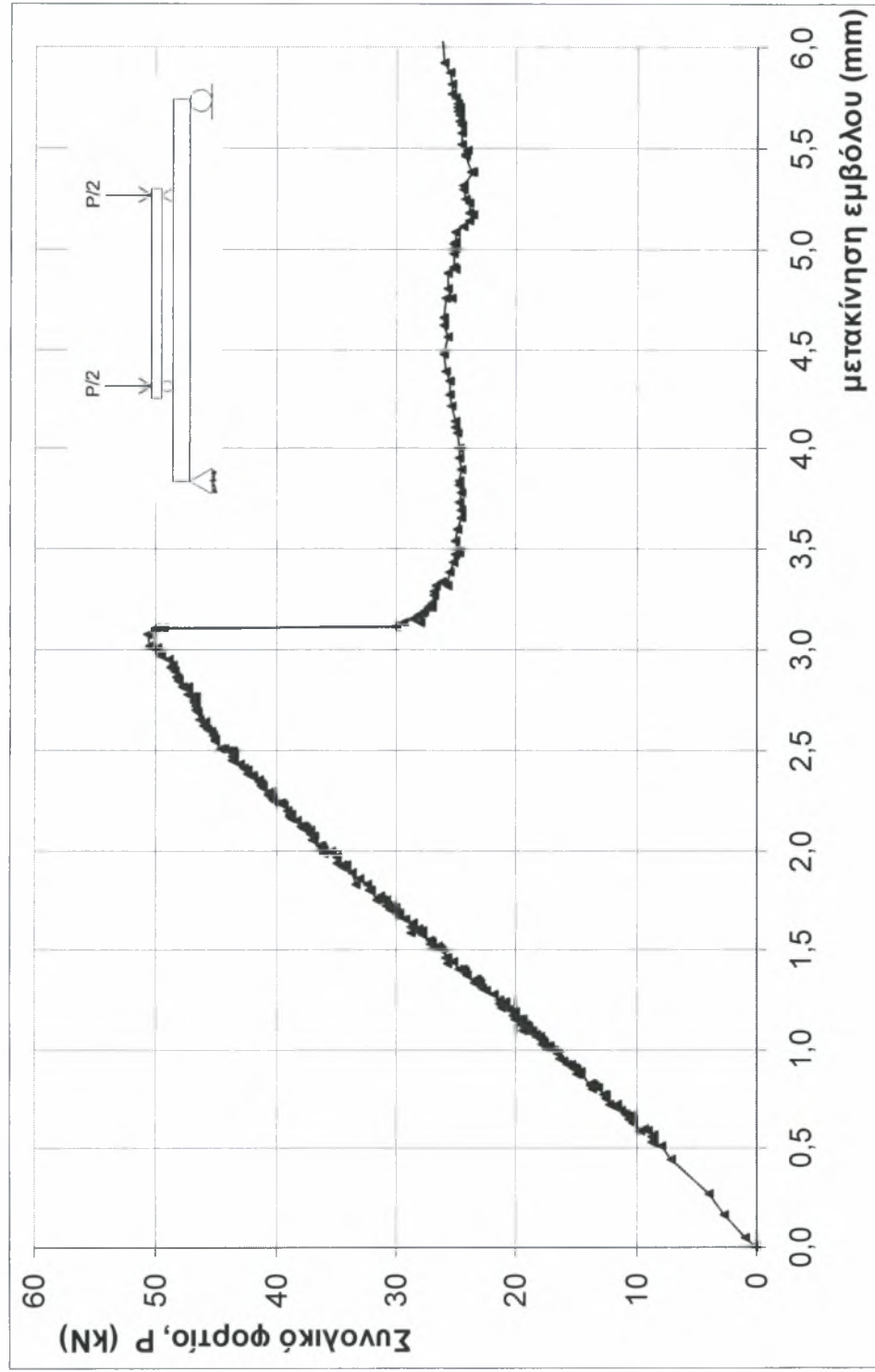


Το δοκίμιο υπεβλήθη σε μονοτονική στατική φόρτιση κάμψης 4 σημείων (Σχήμα 5.4.1). Το φορτίο υπεβλήθη με σταθερό ρυθμό φόρτισης ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβουδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με την πλάκα σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο 50,54 kN. Κατά την αστοχία, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε κατά μήκος ολίσθηση, σημειώθηκε μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά περίπου 20 kN. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγματίωσης (crack inducers) , δηλαδή στις θέσεις $L/4$ και $3L/4$ από την αριστερή στήριξη του δοκιμίου.

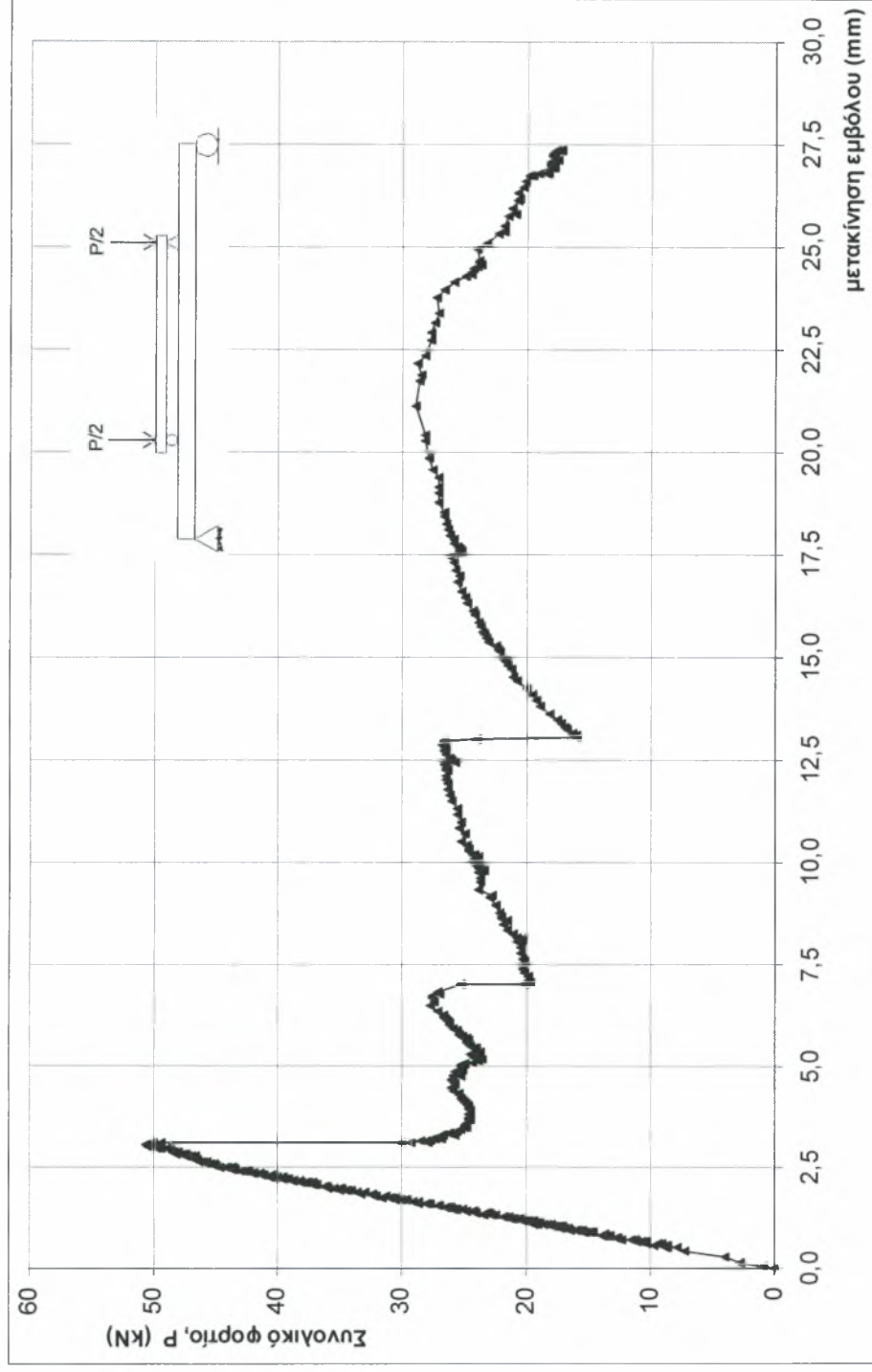
Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή σύμφωνα με τον EC4 καθώς το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος στο φορτίο αστοχίας του δοκιμίου ήταν μικρότερο της προκαθορισμένης τιμής του $L/50$ ($= 232/50 = 4,6$ cm) και το φορτίο αστοχίας δεν υπερβαίνει κατά 10% το φορτίο για το οποίο παρατηρήθηκε η πρώτη ολίσθηση.



Σχήμα 5.4.1 Πειραματική διάταξη μονοτονικής στατικής φόρτισης σε κάμψη 4 σημείων



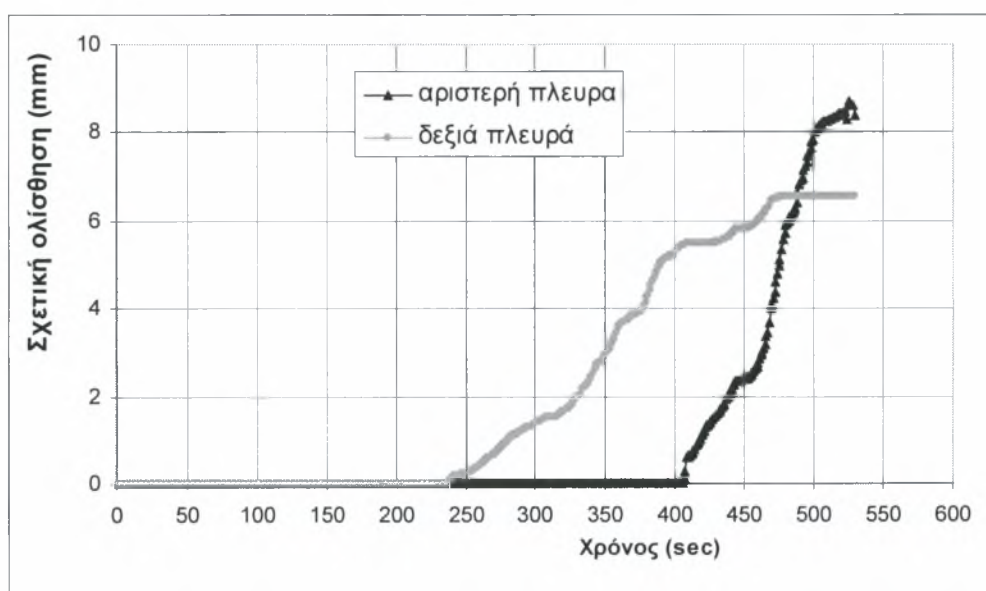
Σχήμα 5.4.2 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου



Σχήμα 5.4.3 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου

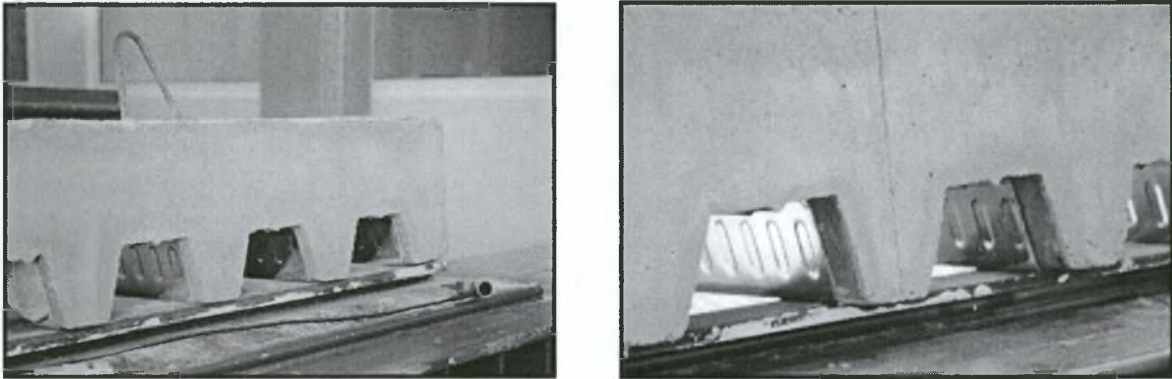
Στο διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου Σχήμα 5.4.3 παρατηρούμε ότι μετά την αστοχία της σύμμικτης πλάκας, όπου έχουμε ταυτόχρονη πτώση του φορτίου, με την αύξηση της μετακίνησης το φορτίο να έχει μια μικρή αύξηση από την τιμή που βρισκόταν μετά την αστοχία. Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στο ότι πλέον έχει αποκολληθεί το σκυρόδεμα από το χαλυβδόφυλλο και επιβάλλοντας επιπλέον φορτίο μετακινούμε τα κομμάτια του σκυροδέματος ως στερεά σώματα. Αυτή η περαιτέρω αύξηση του φορτίου βοηθάει τον όγκο του σκυροδέματος να υπερνικήσει τη δύναμη της τριβής και να μπορεί να ολισθήσει πάνω στο χαλυβδόφυλλο.

Κατά την αστοχία σημειώθηκε σχετική ολίσθηση αρχικά στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου και στη συνέχεια στην αριστερή όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα σχετικής ολίσθησης – χρόνου (Σχήμα 5.4.4).

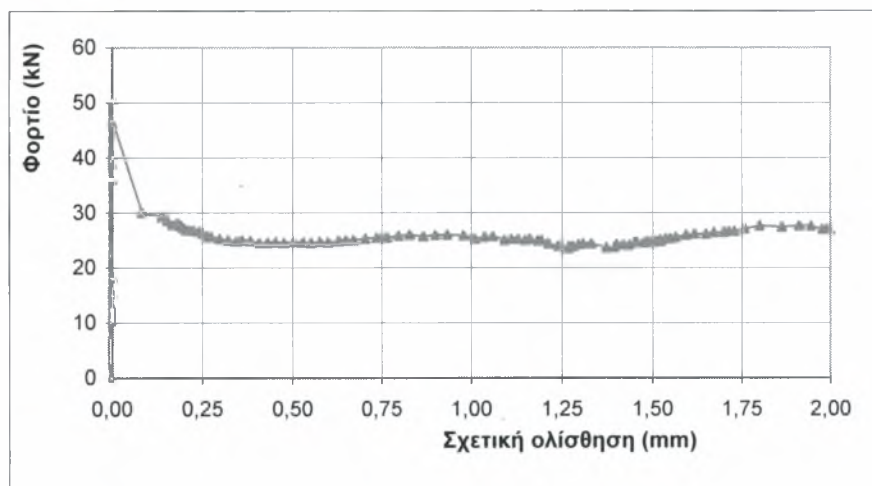


Σχήμα 5.4.4 - Διάγραμμα σχετικής ολίσθησης χαλυβδόφυλλου – πλάκας σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η αστοχία της σύμμικτης πλάκας με την ταυτόχρονη ολίσθηση στη δεξιά πλευρά ήταν 240 δευτερόλεπτα από την έναρξη του πειράματος και 270 δευτερόλεπτα αργότερα σημειώθηκε ολίσθηση στην αριστερή πλευρά της πλάκας (Σχήμα 5.4.5).



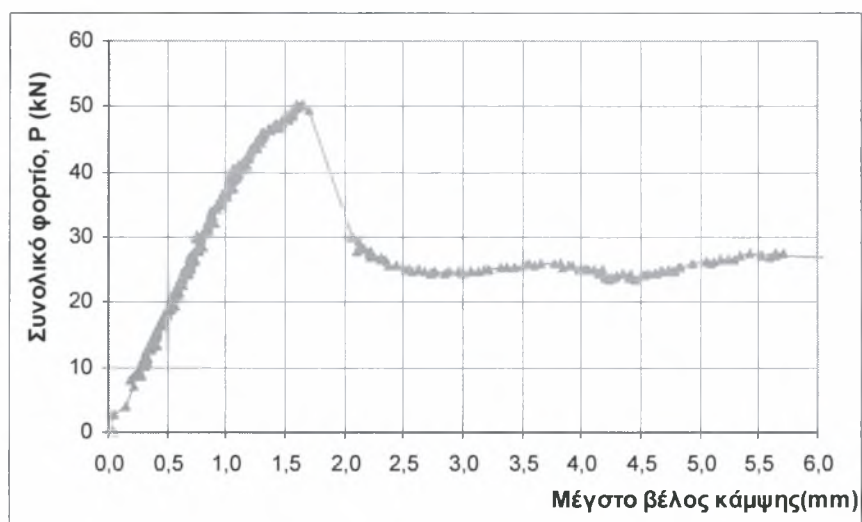
Σχήμα 5.4.5 - Τελική κατάσταση της πλάκας στις στηρίξεις, μεγάλη σχετική ολίσθηση.



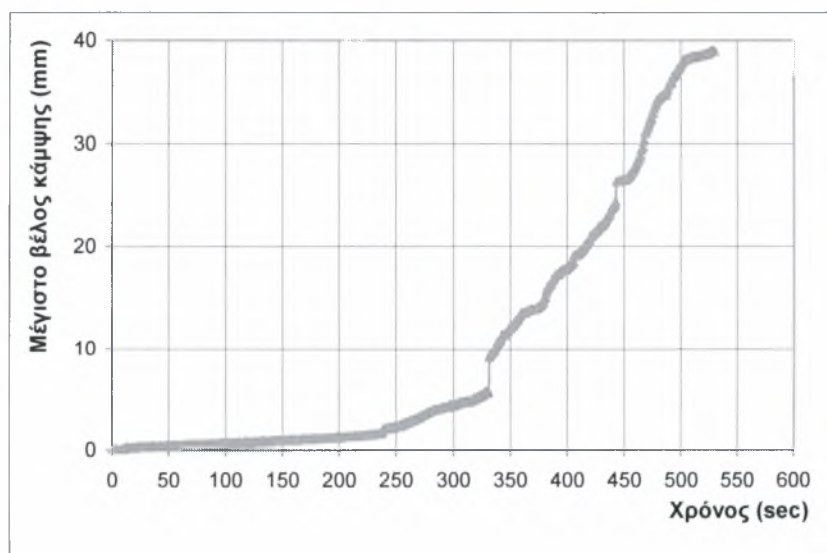
Σχήμα 5.4.6 - Διάγραμμα φορτίου – σχετικής ολίσθησης στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 5.4.6) γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο φορτίο των 50,54 kN. Μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου δεν παρατηρήθηκε σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.7 κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου των 50,54 kN σημειώθηκε μέγιστο βέλος κάμψης 1,7 mm όπως. Η τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν τα δύο μηχανοκίνητα (DCDT) στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας.

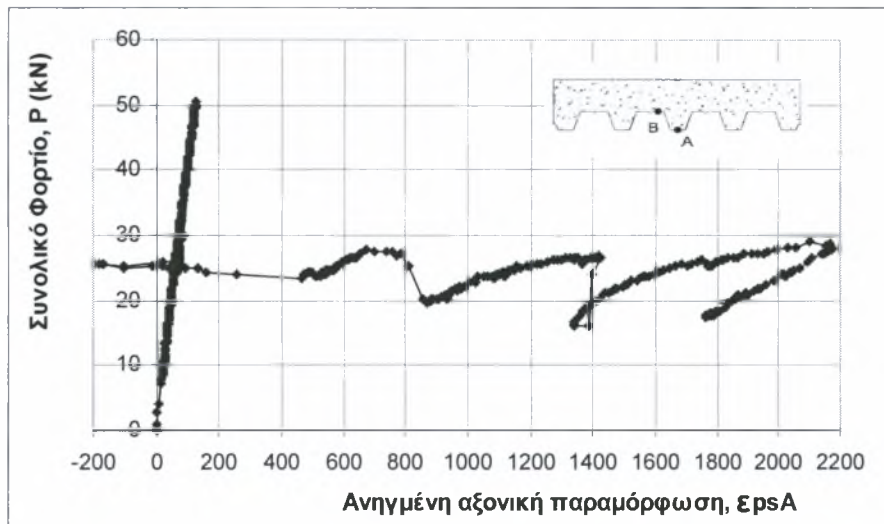


Σχήμα 5.4.7 - Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας

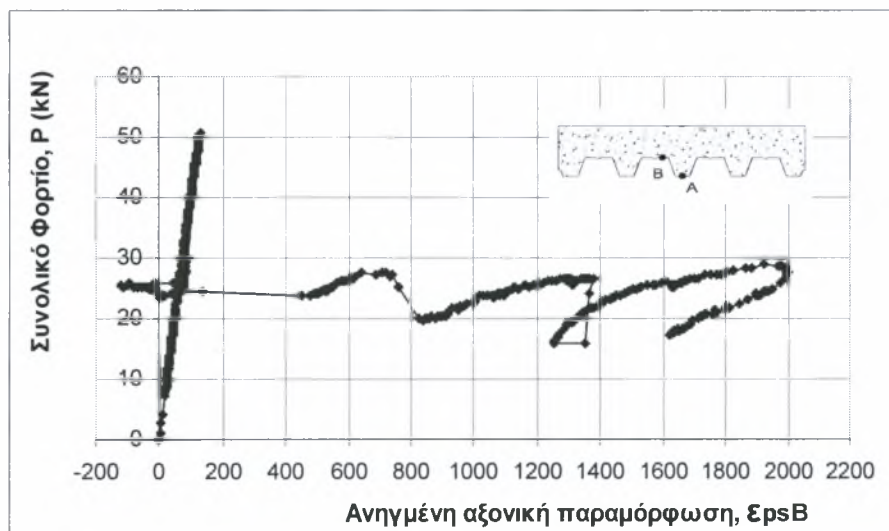


Σχήμα 5.4.8 Διάγραμμα βέλους κάμψης – χρόνου στο μέσον του ανοίγματος

Μετά την αστοχία που σημειώθηκε την χρονική στιγμή των 240 δευτερολέπτων από την έναρξη του πειράματος το μέγιστο βέλος κάμψης της πλάκας αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.8.



Σχήμα 5.4.9 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης του χαλυβδόφυλλου στο μέσον του ανοίγματος στην κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο A)

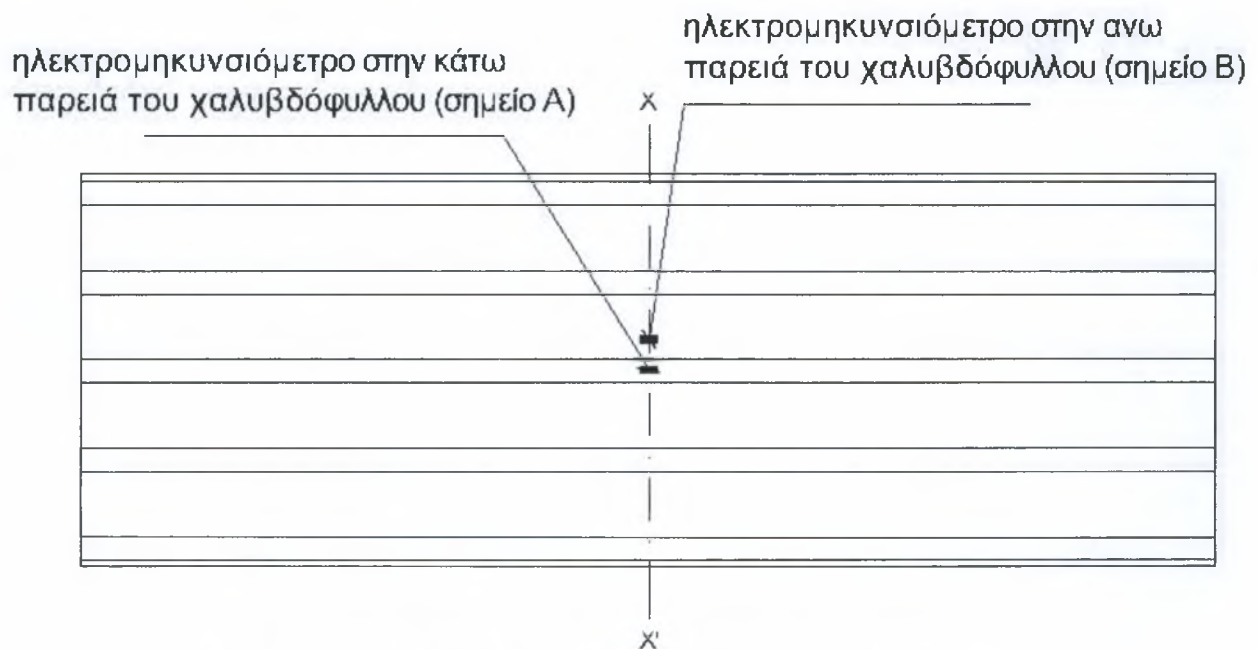


Σχήμα 5.4.10 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης στο μέσον του ανοίγματος στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο B)

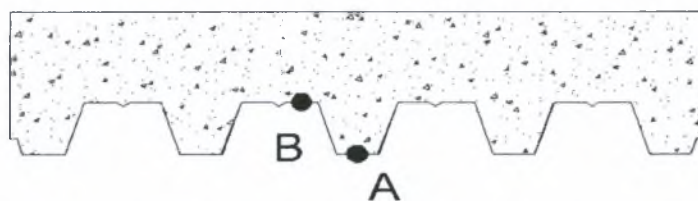
Στο πείραμα αυτό για να μετρήσουμε την ανηγμένη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο τοποθετήσαμε δυο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges), το πρώτο στην κάτω και το δεύτερο στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σχήμα 5.4.11 και 5.4.12). Στο σχήμα 5.4.9 παρατηρούμε ότι η ανηγμένη αξονική παραμόρφωση τη στιγμή της αστοχίας ήταν περίπου 0,1‰ που είναι κατά πολύ μικρότερη από την τιμή της διαρροής του χαλυβδόφυλλου (περίπου 2‰). Το ίδιο παρατηρούμε και στο σχήμα 5.4.10. Μετά την αστοχία της πλάκας λόγω σχετικής

ολίσθησης της σε σχέση με το χαλυβδόφυλλο πραγματοποιείται αποφόρτιση στο χαλυβδόφυλλο με ταυτόχρονη απότομη ανασήκωση του, στοιχείο που φαίνεται από την αρνητική τιμή που παίρνει η παραμόρφωση. Από τα παραπάνω ενισχύεται η άποψη, σύμφωνα με τον EC4, ότι η αστοχία δεν ήταν όλκιμη αλλά ψαθυρή αφού δεν φτάσαμε στην αστοχία με ταυτόχρονη διαρροή του χαλυβδόφυλλου.

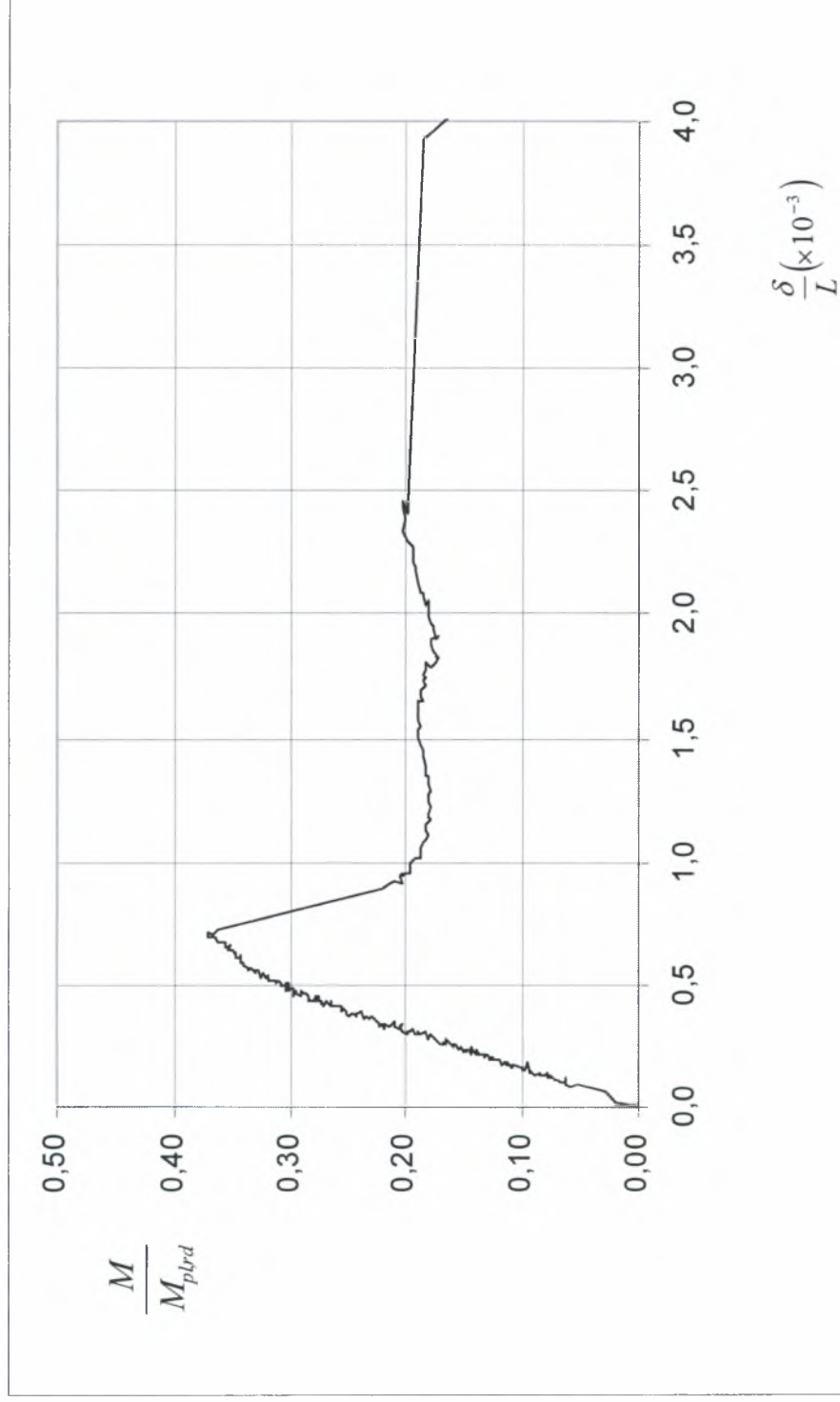
Στο σχήμα 5.4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα ανηγμένης επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής $\frac{M}{M_{pl,rd}}$ συναρτήσει του ανηγμένου βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος $\frac{\delta}{L}$, όπου $M_{pl,rd}$ είναι η καμπτική αντοχή της σύμμικτης πλάκας. Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η αστοχία της πλάκας επετεύχθη στο 37,5% (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται σε αυτή την τιμή η καμπτική ροπή λόγω ιδίου βάρους) περίπου της καμπτικής αντοχής της, η οποία υπολογίστηκε ότι ήταν 39.04 kNm. Τη στιγμή της αστοχίας το ανηγμένο βέλος κάμψης της πλάκας είναι 0.7‰.



Σχήμα 5.4.11 Κάτοψη χαλυβδόφυλλου, θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων



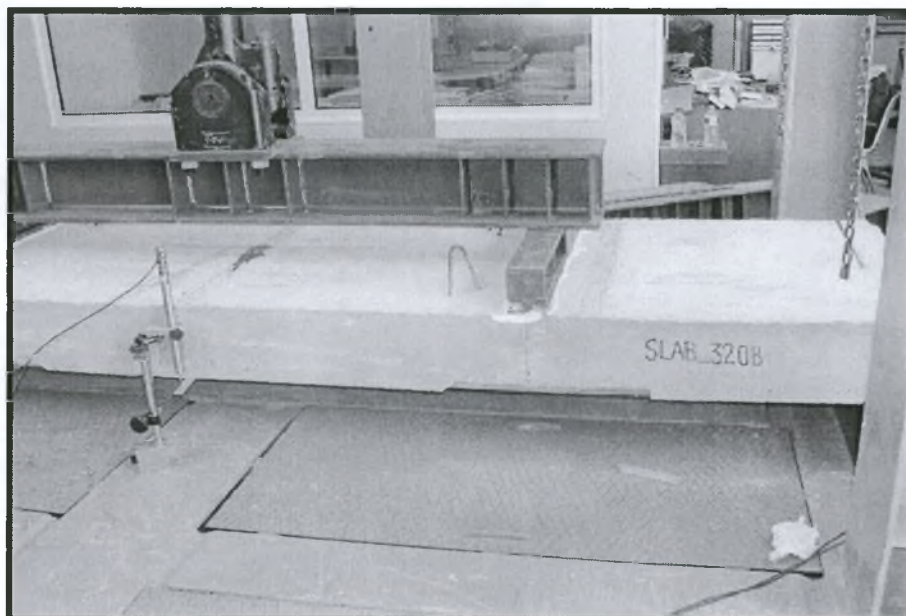
Σχήμα 5.4.12 Τομή X-X' δοκιμίου πλάκας, θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων



Σχήμα 5.4.13 Αδιάστατο διάγραμμα επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας

5.5 Πείραμα Β2 (δοκίμιο πλάκας L=3.20 m, b=0.83 m)

Κωδικός Πειράματος : SLAB_320B

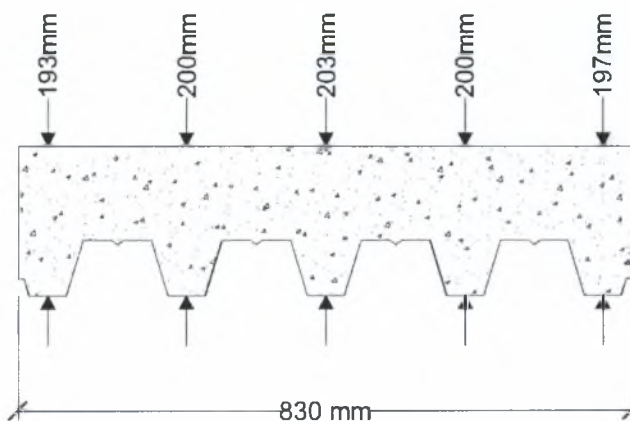


Ημερομηνία σκυροδέτησης : 28 Απριλίου 2005
 Ημερομηνία πειράματος: 13 Ιουνίου 2005
 Ηλικία δοκιμίου πλάκας: 47 ημέρες
 Διάρκεια πειράματος : 2,6 min
 Είδος φόρτισης : Μονοτονική στατική κάμψη 4 σημείων

Διαστάσεις Δοκιμίου:

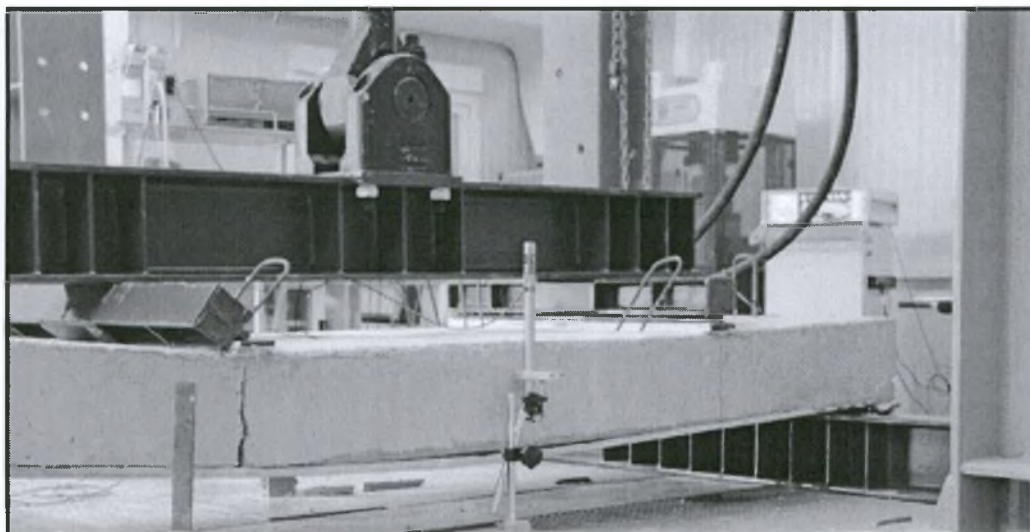
Μήκος 2400 mm
 Μέσο πλάτος 830 mm
 Μέσο πάχος 199 mm

Βάρος δοκιμίου πλάκας : 1051 Kg

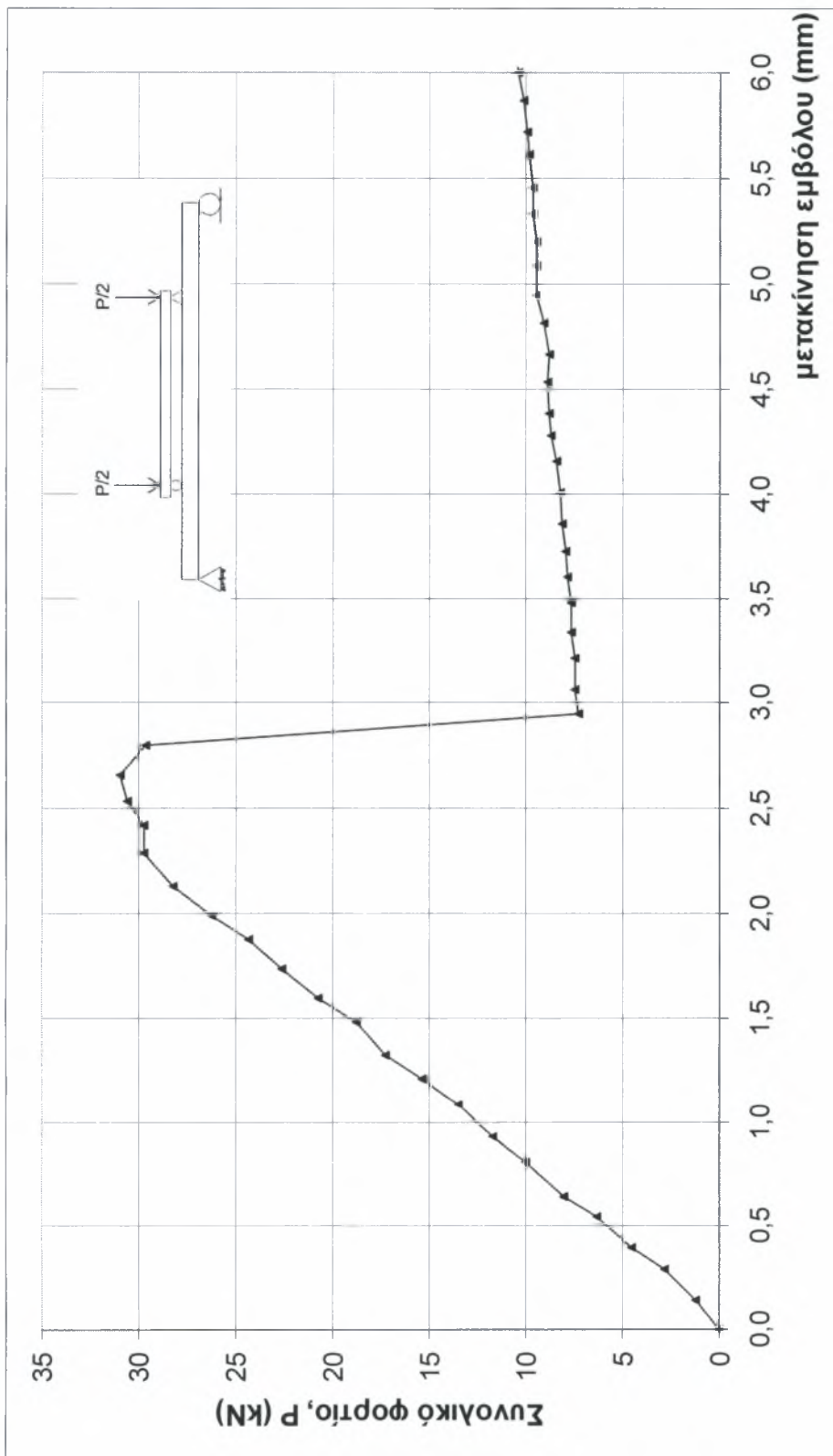


Το δοκίμιο υπεβλήθη σε μονοτονική στατική φόρτιση κάμψης 4 σημείων. Το φορτίο υπεβλήθη με σταθερό ρυθμό φόρτισης ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβουδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με την πλάκα σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο 31,33 kN. Κατά την αστοχία, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε κατά μήκος ολίσθηση, σημειώθηκε μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά περίπου 20 kN. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγμάτωσης (crack inducers) , δηλαδή στις θέσεις L/4 και 3L/4 από την αριστερή στήριξη του δοκιμίου.

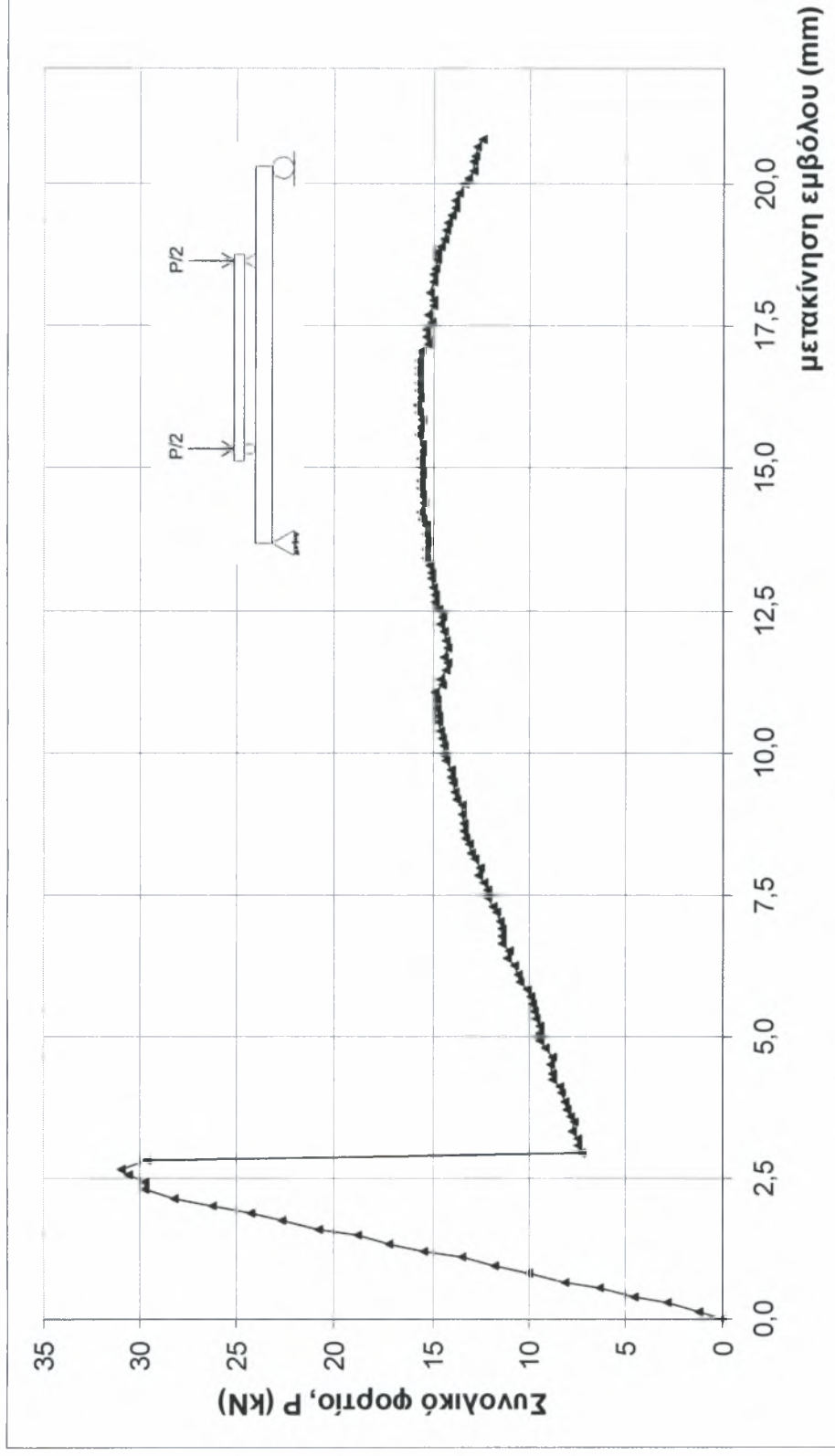
Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή σύμφωνα με τον EC4 καθώς το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος στο φορτίο αστοχίας του δοκιμίου ήταν μικρότερο της προκαθορισμένης τιμής του L/50 (= 312/50 = 6,2 cm) και το φορτίο αστοχίας δεν υπερβαίνει κατά 10% το φορτίο για το οποίο παρατηρήθηκε η πρώτη ολίσθηση.



Σχήμα 5.5.1 Κατάσταση δοκιμίου πλάκας μετά την αστοχία

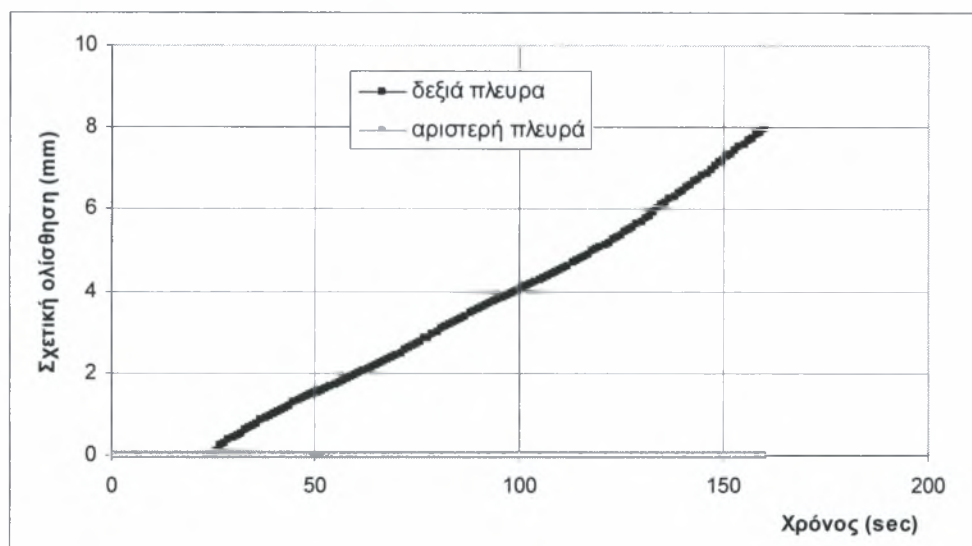


Σχήμα 5.5.2 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου



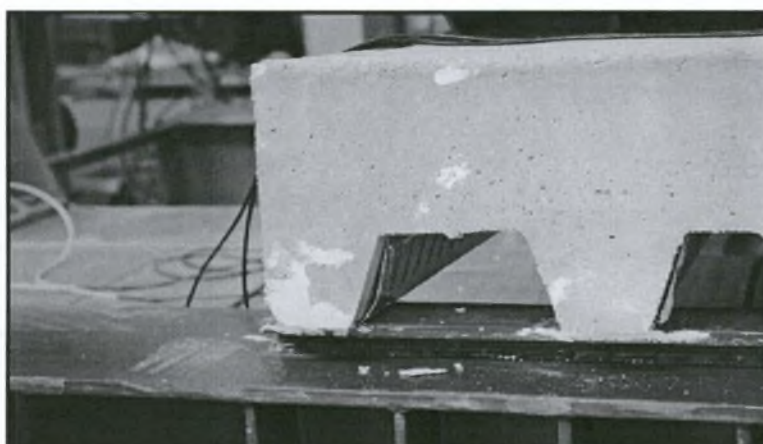
Σχήμα 5.5.3 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου

Κατά την αστοχία σημειώθηκε σχετική ολίσθηση μόνο στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου ενώ στην αριστερή πλευρά δε σημειώθηκε μεταβολή όσον αφορά τη σχετική θέση των υλικών όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα σχετικής ολίσθησης – χρόνου (Σχήμα 5.5.4).

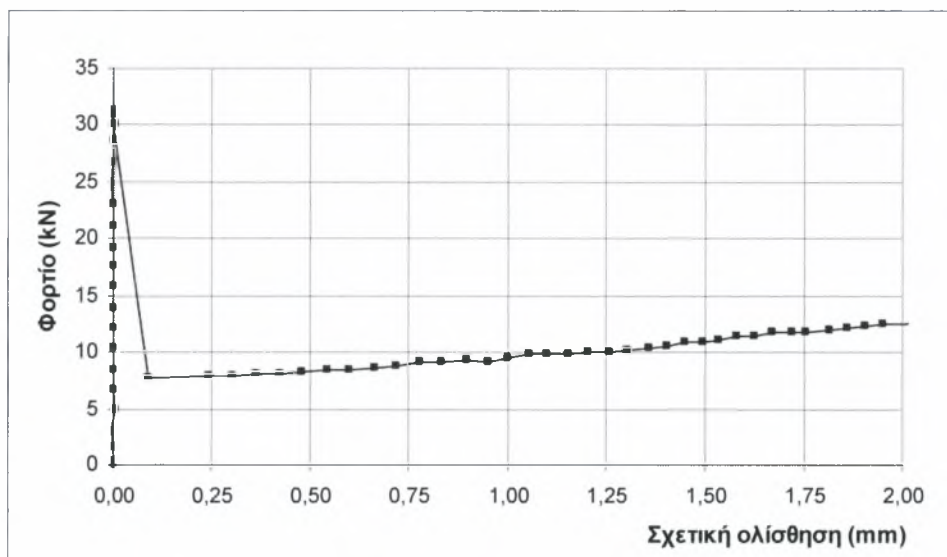


Σχήμα 5.5.4 - Διάγραμμα σχετικής ολίσθησης χαλυβδόφυλλου – πλάκας σκυροδέματος συναρτήσεως του χρόνου

Η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η αστοχία της σύμμικτης πλάκας με την ταυτόχρονη ολίσθηση στη δεξιά πλευρά ήταν 30 δευτερόλεπτα από την έναρξη του πειράματος (Σχήμα 5.5.4).



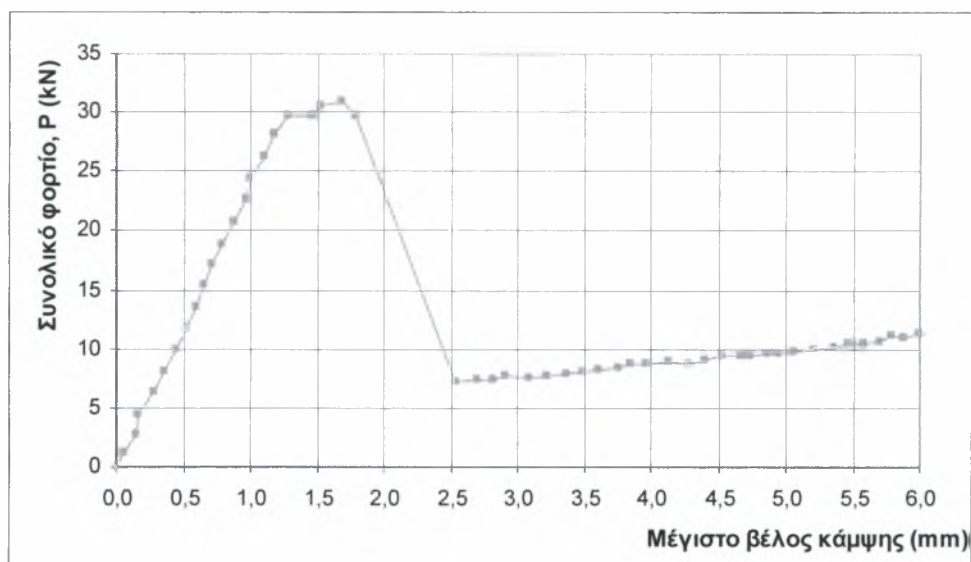
Σχήμα 5.5.5 - Ολίσθηση από τη δεξιά πλευρά



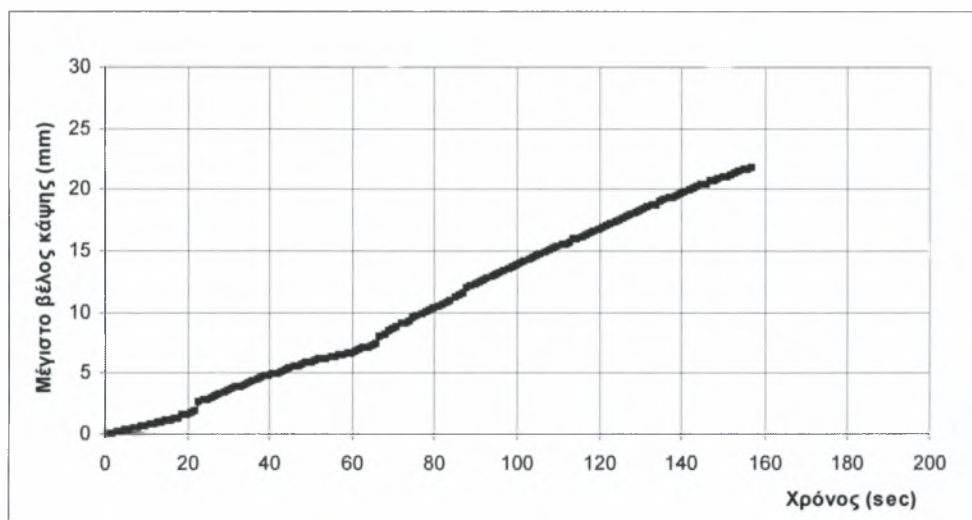
Σχήμα 5.5.6 - Διάγραμμα φορτίου – σχετικής ολίσθησης στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 5.5.6) γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο φορτίο των 31,33 kN. Μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου δεν παρατηρήθηκε σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών.

Κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου σημειώθηκε βέλος κάμψης 1,6 mm όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5.7. Η τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν τα δύο μηκυσιόμετρα (DCDT) στο μέσον του ανοίγματος.

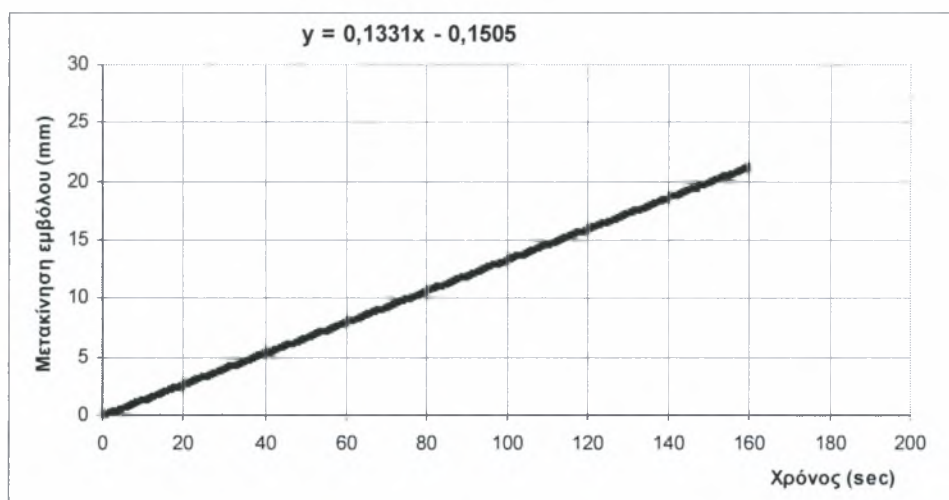


Σχήμα 5.5.7 - Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος

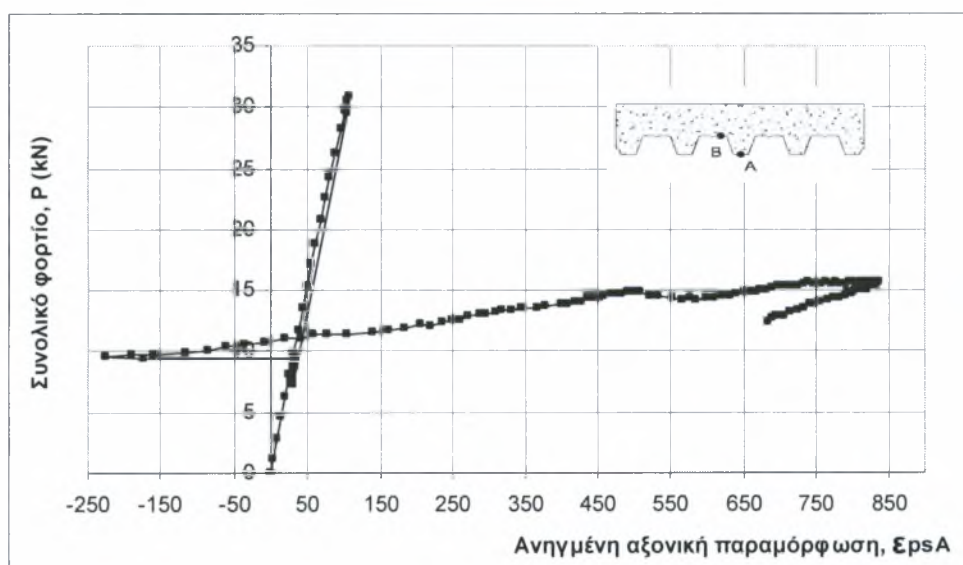


Σχήμα 5.5.8 Διάγραμμα βέλους κάμψης – χρόνου στο μέσον του ανοίγματος

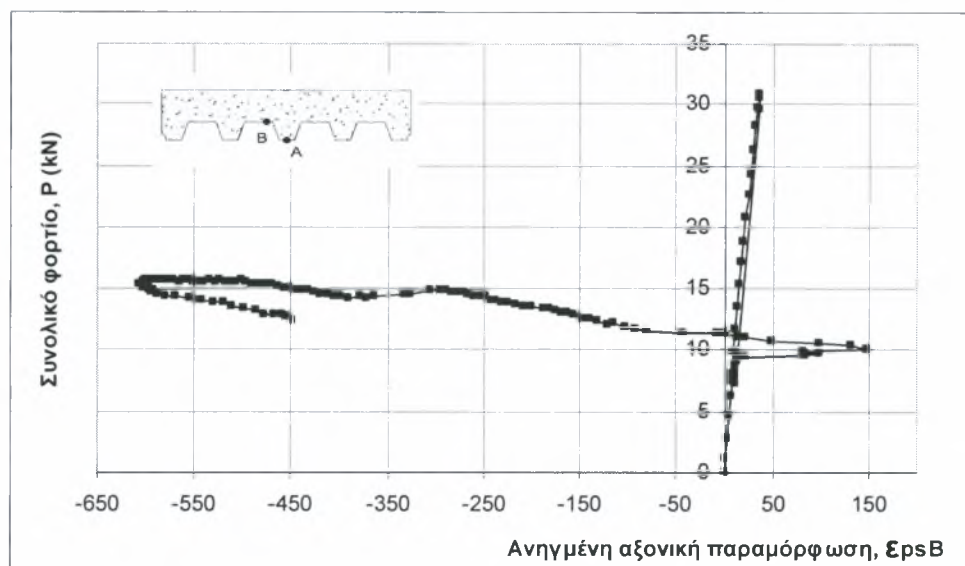
Μετά την αστοχία που σημειώθηκε την χρονική στιγμή των 30 δευτερολέπτων από την έναρξη του πειράματος το μέγιστο βέλος κάμψης της πλάκας αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.8. Σε αυτό το πείραμα για την επιβολή του φορτίου χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα ρύθμισης της μετακίνησης του εμβόλου συναρτήσεως του χρόνου. Ο ρυθμός της μετακίνησης δίνεται από την κλίση της ευθείας που δίνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 5.5.9)



Σχήμα 5.5.9 Διάγραμμα μετακίνησης εμβόλου - χρόνου

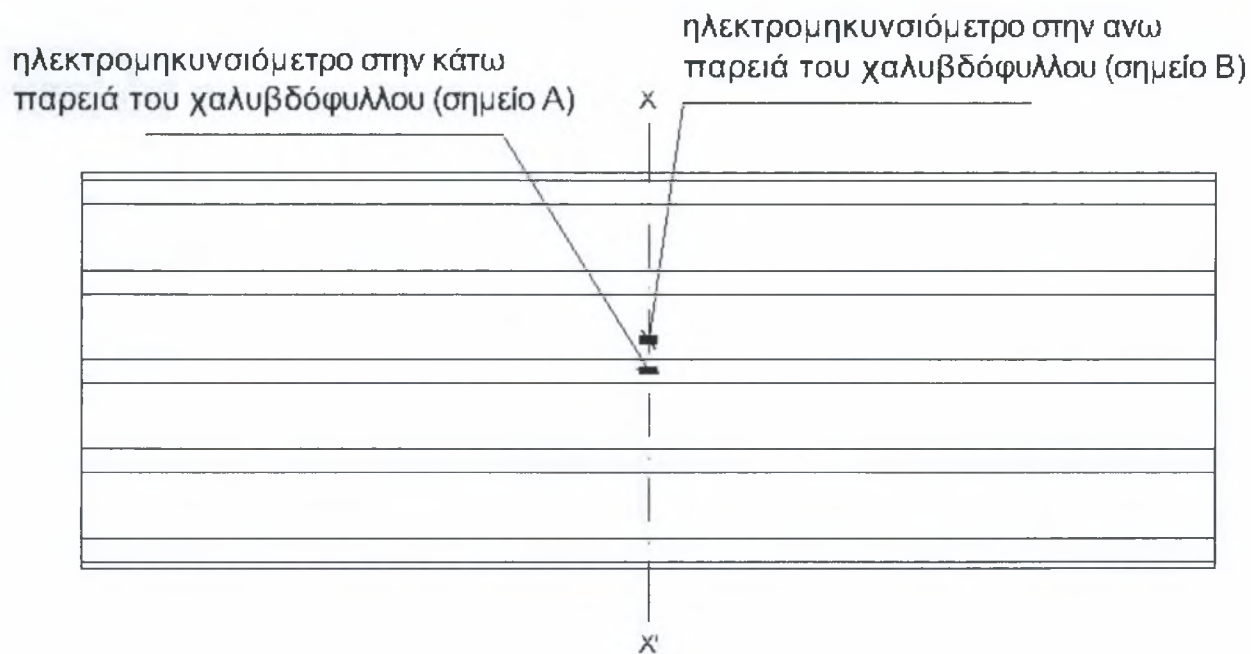


Σχήμα 5.5.10 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης του χαλυβδόφυλλου στο μέσον του ανοίγματος στην κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο A)

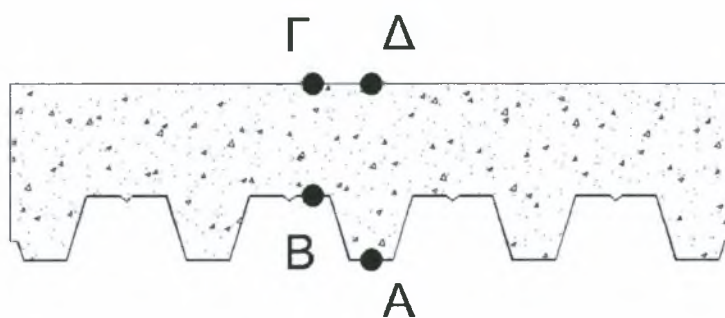


Σχήμα 5.5.11 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης στο μέσον του ανοίγματος στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σημείο Β)

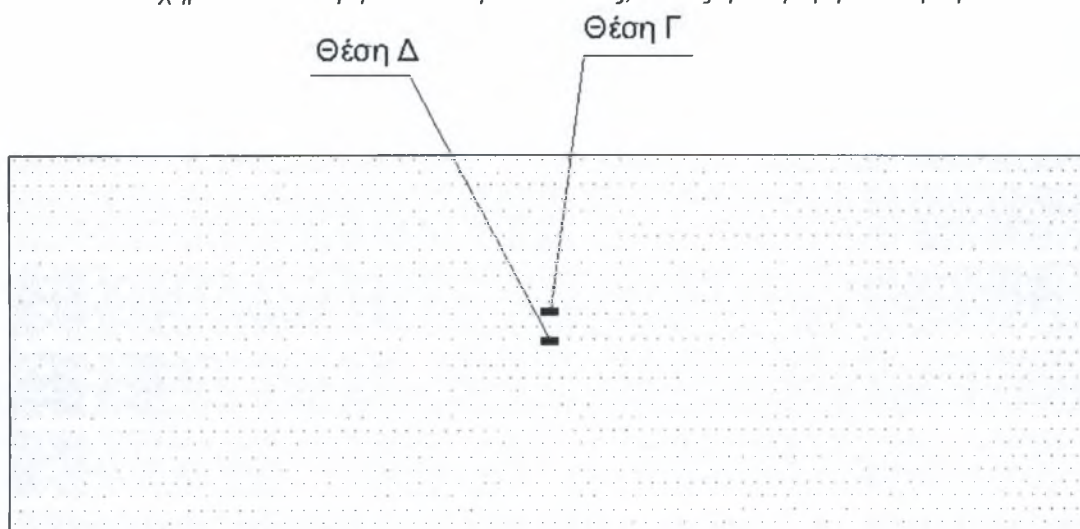
Στο πείραμα αυτό για να μετρήσουμε την ανηγμένη αξονική παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο τοποθετήσαμε δυο ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (strain gauges) , το πρώτο στην κάτω και το δεύτερο στην άνω παρειά του χαλυβδόφυλλου (σχήμα 5.5.10 και 5.5.11). Παρατηρούμε ότι η ανηγμένη αξονική παραμόρφωση τη στιγμή της αστοχίας ήταν περίπου 0,1‰ που είναι κατά πολύ μικρότερη από την τιμή της διαρροής του χαλυβδόφυλλου (περίπου 2‰). Μετά την αστοχία της πλάκας λόγω σχετικής ολίσθησης της σε σχέση με το χαλυβδόφυλλο πραγματοποιείται αποφόρτιση στο χαλυβδόφυλλο με ταυτόχρονη απότομη ανασήκωση του χαλυβδόφυλλου, στοιχείο που φαίνεται από την αρνητική τιμή που παίρνει η παραμόρφωση. Βέβαια είναι φανερό ότι το μηκυσσιόμετρο που ήταν τοποθετημένο στην κάτω παρειά του χαλυβδόφυλλου αποκολλήθηκε μετά την αστοχία και την χαλάρωση του χαλυβδόφυλλου. Από τα παραπάνω ενισχύεται η άποψη , σύμφωνα με τον EC4, ότι η αστοχία δεν ήταν όλκιμη αλλά ψαθυρή αφού δεν φτάσαμε στη αστοχία με ταυτόχρονη διαρροή του χαλυβδόφυλλου.



Σχήμα 5.5.12 Κάτοψη χαλυβδόφυλλου, θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων

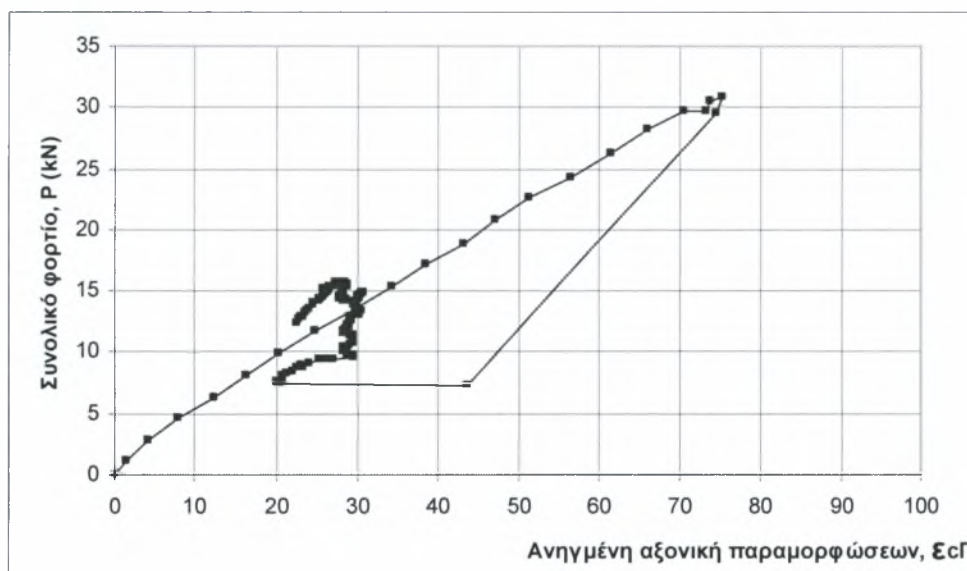


Σχήμα 5.5.13 Τομή X X' δοκιμίου πλάκας, θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων

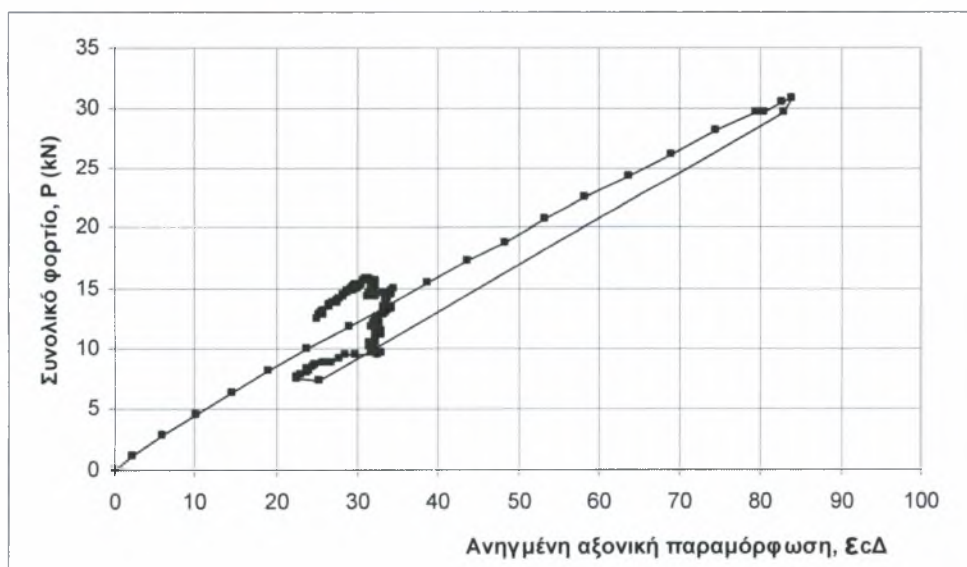


Σχήμα 5.5.14 Κάτοψη δοκιμίου πλάκας, θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων στο σκυρόδεμα

Ταυτόχρονα είχαν τοποθετηθεί μηχανοκίνητα στην άνω παρειά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας για την μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στα διαγράμματα που δίνονται από τα οποία παρατηρούμε ότι δεν φτάσαμε στην οριακή παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος (Σχήμα 5.5.15 & 5.5.16)

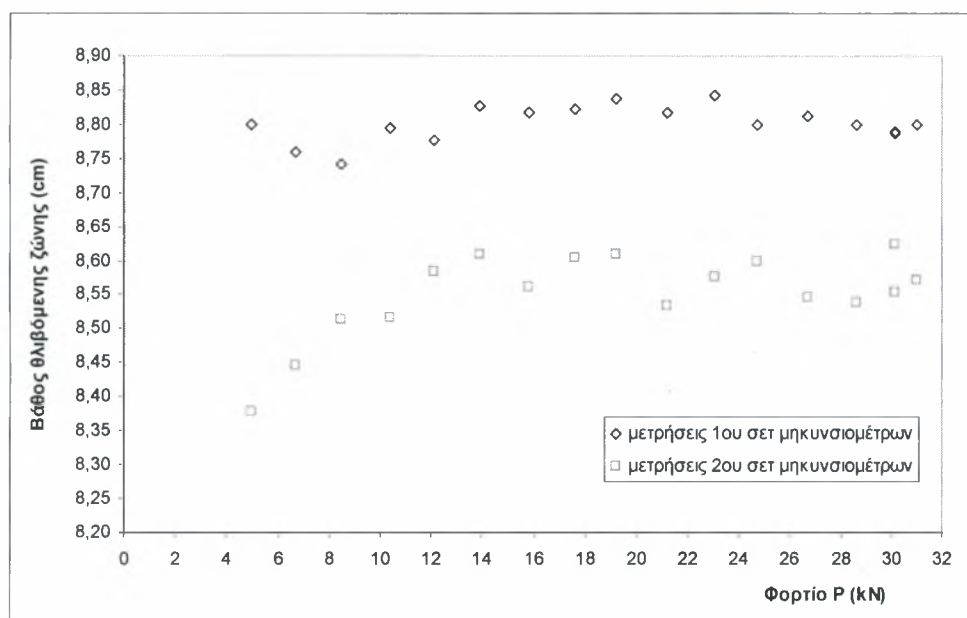


Σχήμα 5.5.15 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης αξονικής θλιπτικής παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα στη θέση Γ



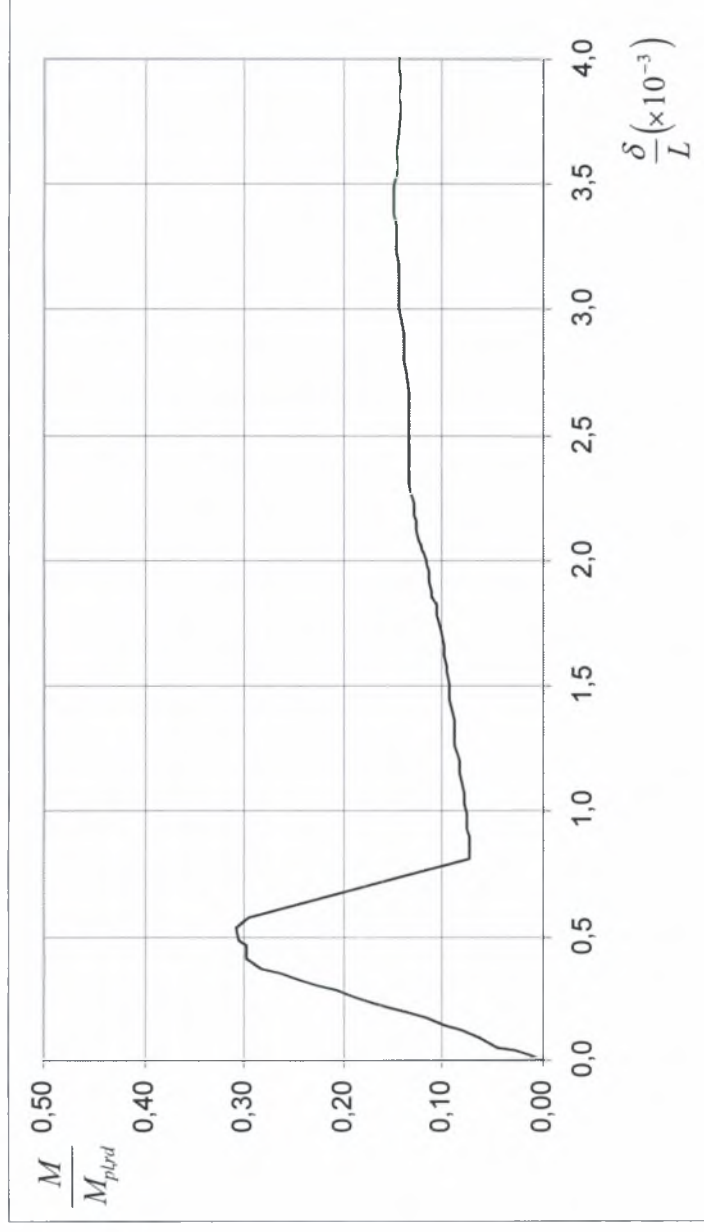
Σχήμα 5.5.16 Διάγραμμα φορτίου – ανηγμένης αξονικής θλιπτικής παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα στη θέση Δ

Από τις μετρήσεις κατέστη εφικτό να υπολογιστεί η θέση του ουδέτερου άξονα (γεωμετρικός τόπος σημείων με μηδενική αξονική παραμόρφωση) της διατομής του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο έως το φορτίο για το οποίο σημειώθηκε η αστοχία κατόπιν υπέρβασης της τάσης – αντοχής σε διατμητική ολίσθηση. Η θέση του κεντροβαρικού άξονα της διατομής έχει υπολογιστεί ότι βρίσκεται 8.3 cm από την άνω παρειά του δοκιμίου της πλάκας. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5.15 σε διάγραμμα θέσης ουδέτερου άξονα – επιβαλλόμενου φορτίου. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι μέχρι το φορτίο της αστοχίας έχουμε ελαστική συμπεριφορά καθώς οι θέσεις του ουδέτερου άξονα που δίνουν τα δύο σετ των μηκυσιομέτρων βρίσκονται πολύ κοντά στον κεντροβαρικό άξονα της διατομής της πλάκας.



Σχήμα 5.5.15 Διάγραμμα θέσης ουδέτερου άξονα διατομής – επιβαλλόμενου φορτίου

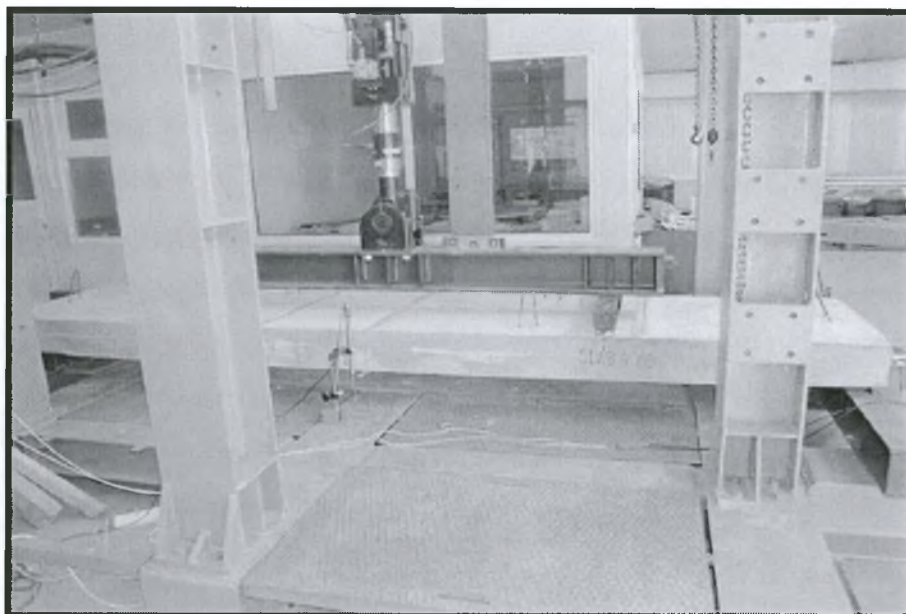
Στο σχήμα 5.5.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα ανηγμένης καμπτικής ροπής $\frac{M}{M_{pl,rd}}$ συναρτήσει του ανηγμένου βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος $\frac{\delta}{L}$, όπου $M_{pl,rd}$ είναι η καμπτική αντοχή της σύμμικτης πλάκας. Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η αστοχία της πλάκας επετεύχθη στο 31% περίπου της καμπτικής αντοχής της (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η καμπτική ροπή λόγω ιδίου βάρους του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας), η οποία υπολογίστηκε ότι ήταν 39.04 kNm. Τη στιγμή της αστοχίας το ανηγμένο βέλος κάμψης της πλάκας είναι 0.6‰. Σε συνδυασμό με τον παραπάνω σχολιασμό για τη θέση του ουδέτερου άξονα σε σχέση με τον κεντροβαρικό της διατομής του δοκιμίου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι έχουμε ελαστική συμπεριφορά της διατομής μέχρι το 40% (συμπεριλαμβανομένης της καμπτικής ροπής λόγω ιδίου βάρους του στοιχείου) της συνολικής καμπτικής αντοχής.



Σχήμα 5.5.17 Αδιάστατο διάγραμμα επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας

5.6 Πείραμα Β3 (δοκίμιο πλάκας L=4.00 m, b=0.83 m)

Κωδικός Πειράματος : SLAB_400B

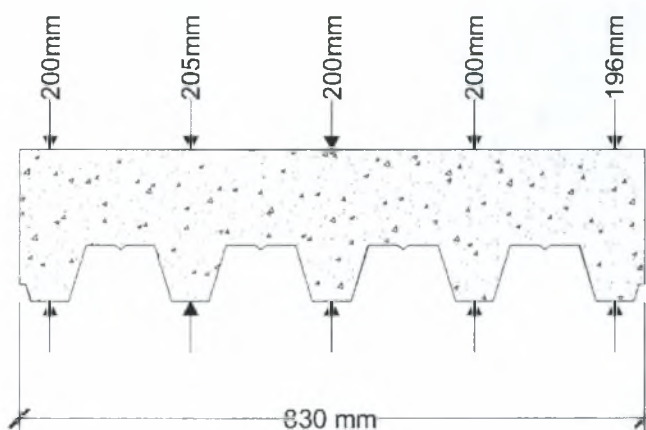


Ημερομηνία σκυροδέτησης : 28 Απριλίου 2005
 Ημερομηνία πειράματος: 12 Ιουλίου 2005
 Ηλικία δοκιμίου πλάκας: 76 ημέρες
 Διάρκεια πειράματος : 4,8 min
 Είδος φόρτισης : Μονοτονική στατική κάμψη 4 σημείων

Διαστάσεις Δοκιμίου:

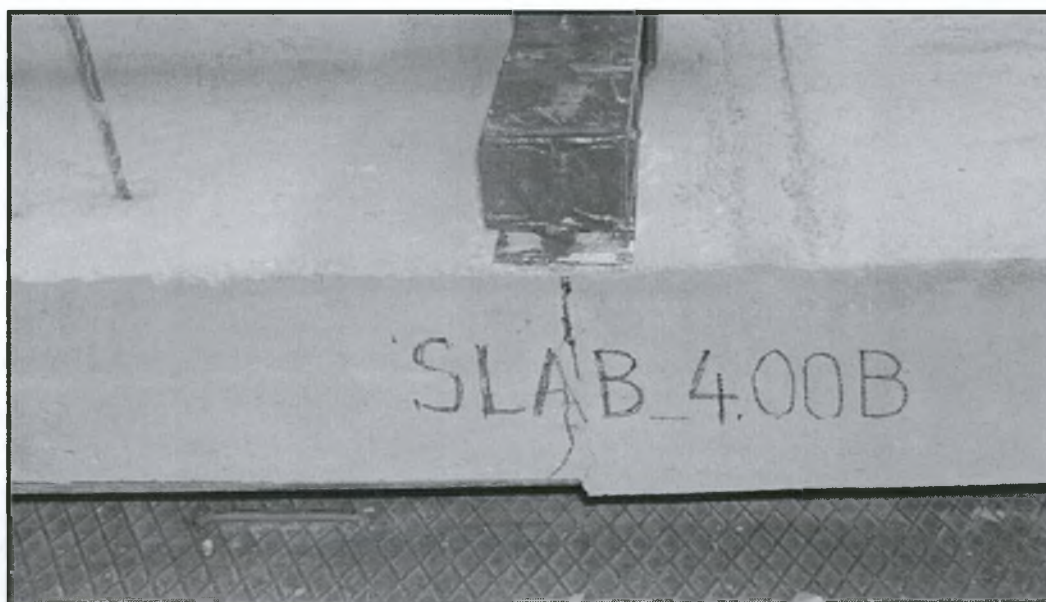
Μήκος 4000 mm
 Μέσο πλάτος 830 mm
 Μέσο πάχος 200 mm

Βάρος δοκιμίου πλάκας : 1314 Kg

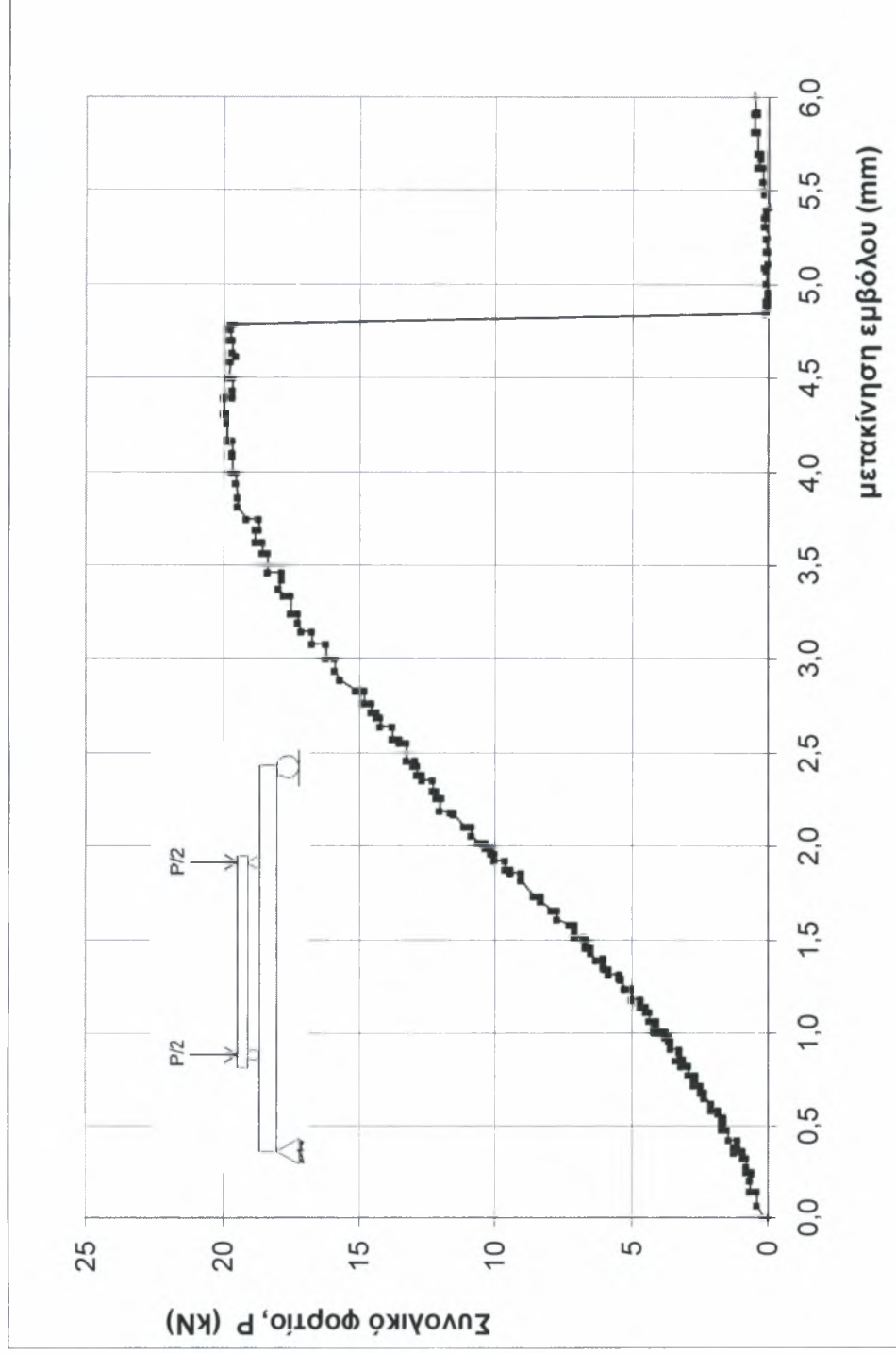


Το δοκίμιο υπεβλήθη σε μονοτονική στατική φόρτιση κάμψης 4 σημείων. Το φορτίο υπεβλήθη με σταθερό ρυθμό φόρτισης ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβουδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με την πλάκα σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο **19,90 kN**. Κατά την αστοχία, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε κατά μήκος ολίσθηση, σημειώθηκε μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά περίπου 20 kN. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγμάτωσης (crack inducers) , δηλαδή στις θέσεις L/4 και 3L/4 από την αριστερή στήριξη του δοκιμίου.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ψαθυρή σύμφωνα με τον EC4 καθώς η μετακίνηση στο φορτίο αστοχίας του δοκιμίου δεν έφτασε την προκαθορισμένη τιμή του L/50 ($= 392/50 = 7,8 \text{ cm}$) και το φορτίο αστοχίας δεν υπερβαίνει κατά 10% το φορτίο για το οποίο παρατηρήθηκε η πρώτη ολίσθηση.



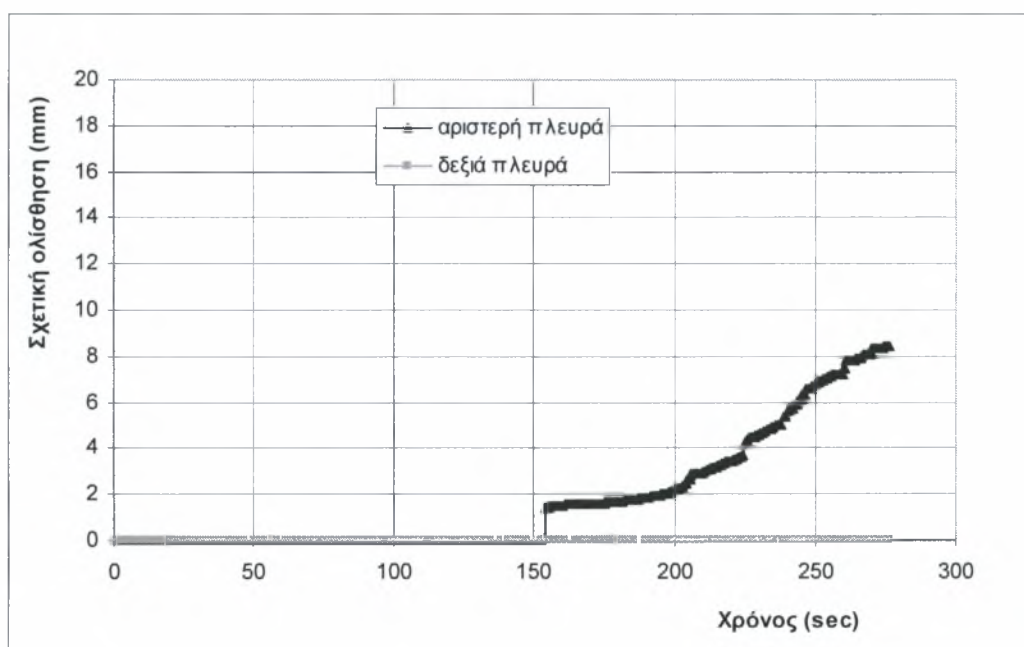
Σχήμα 5.6.1 Θέση ελάσματος προρηγμάτωσης



Σχήμα 5.6.2 Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου

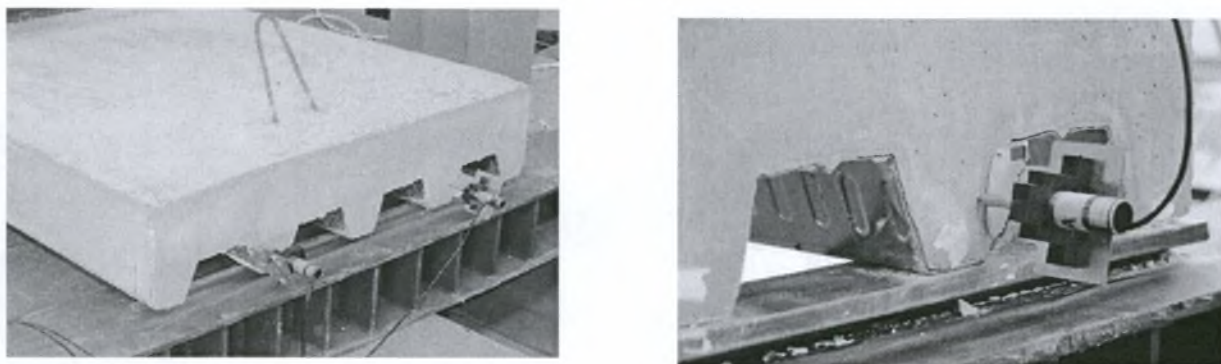
Στο Σχήμα 5.6.2 παρατηρούμε μία μείωση στην κλίση του διαγράμματος η οποία δεν φαίνεται στο διάγραμμα φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης που δίνεται παρακάτω γεγονός που οφείλεται στην παραμόρφωση του πλαισίου στο οποίο εδράζεται ο μηχανισμός επιβολής του φορτίου. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο στα δοκίμια με μεγάλες διαστάσεις ενώ στα δοκίμια με μικρές διαστάσεις δεν παρατηρείται.

Κατά την αστοχία σημειώθηκε σχετική ολίσθηση μόνο στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου ενώ στη δεξιά δεν παρατηρήθηκε σχετική ολίσθηση όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα σχετικής ολίσθησης - χρόνου (Σχήμα 5.6.3).

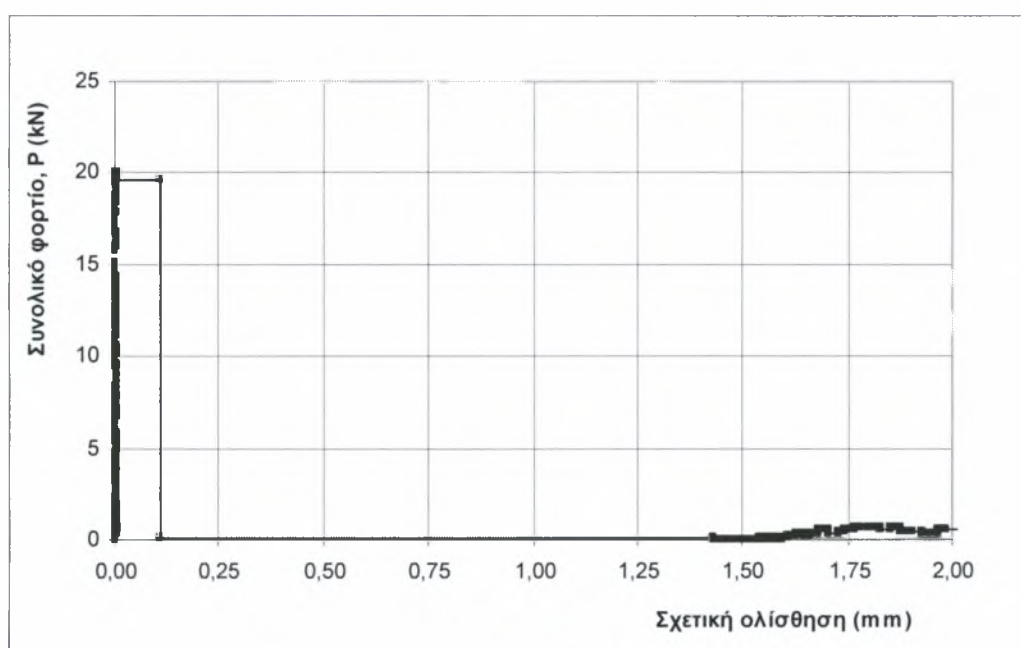


Σχήμα 5.6.3 - Διάγραμμα σχετικής ολίσθησης - χρόνου

Η χρονική στιγμή που σημειώθηκε η αστοχία της σύμμικτης πλάκας με την ταυτόχρονη ολίσθηση στην αριστερή πλευρά ήταν 170 δευτερόλεπτα από την αρχή του πειράματος.

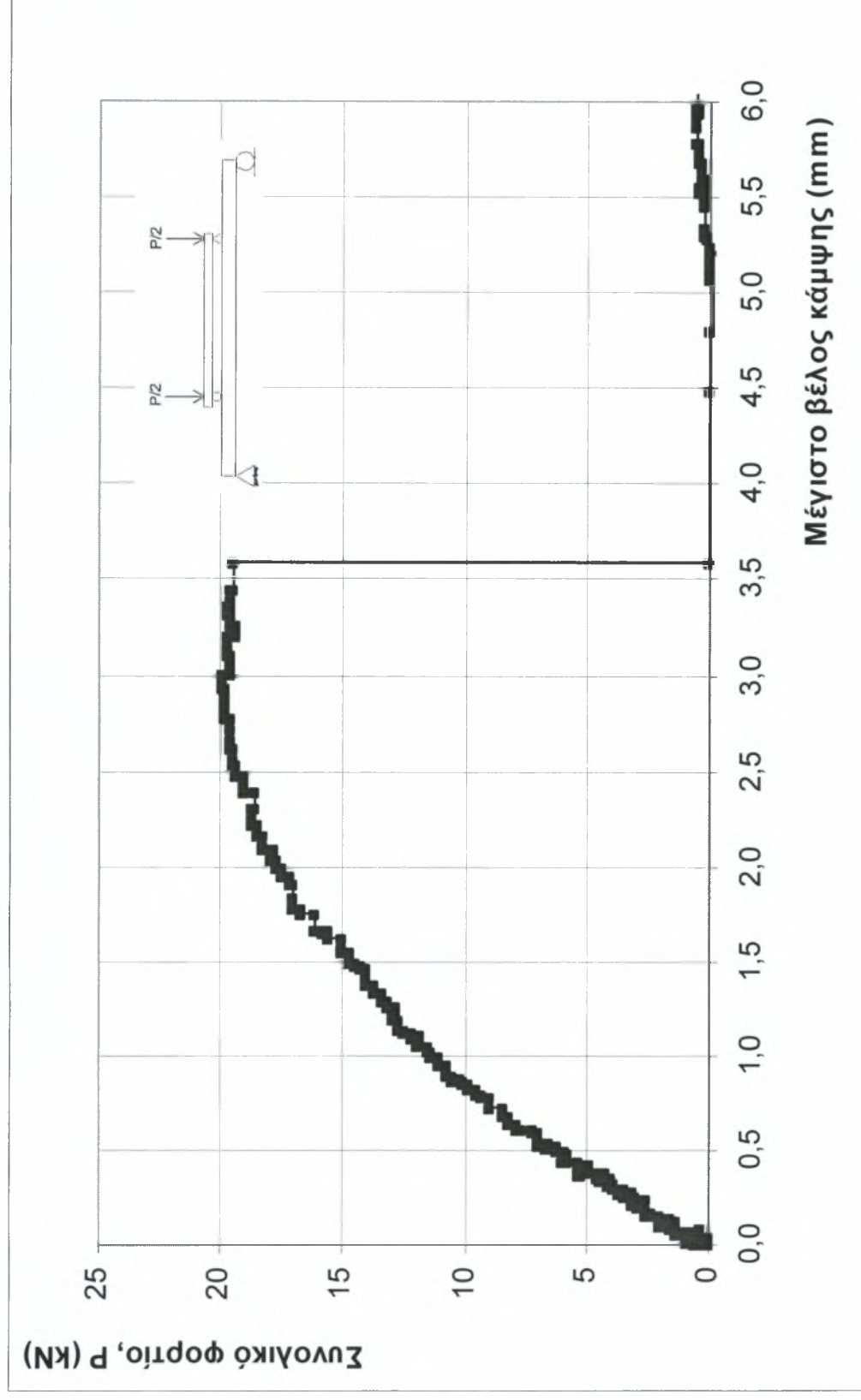


Σχήμα 5.6.4 - Έναρξη ολίσθησης



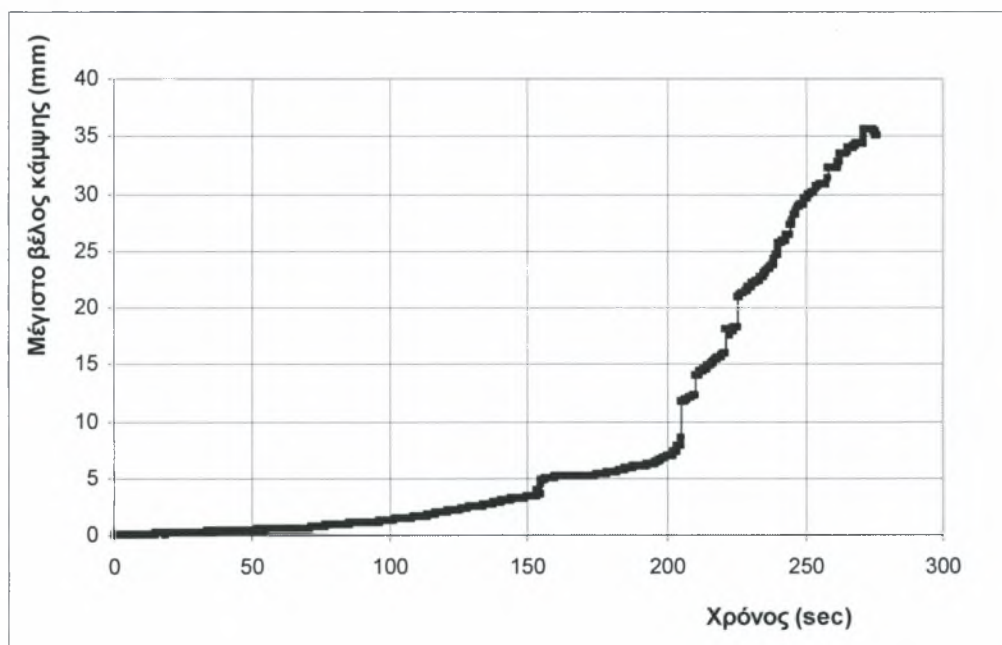
Σχήμα 5.6.5 - Διάγραμμα φορτίου –σχετικής ολίσθησης στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.6.5) γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο φορτίο των 19,90 kN. Μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου δεν παρατηρήθηκε σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών.



Σχήμα 5.6.7 - Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης στο μέσον του ανολήματος

Κατά την επιβολή του μέγιστου φορτίου σημειώθηκε μέγιστο βέλος κάμψης περίπου 3,5 mm όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6.7. Η τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν τα δύο μηκυσιόμετρα (DCDT) στο μέσον του ανοίγματος.



Σχήμα 5.6.8 Διάγραμμα βέλους κάμψης – χρόνου στο μέσον του ανοίγματος

Μετά την αστοχία που σημειώθηκε την χρονική στιγμή των 240 δευτερολέπτων από την αρχή του πειράματος η μετακίνηση αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.8.

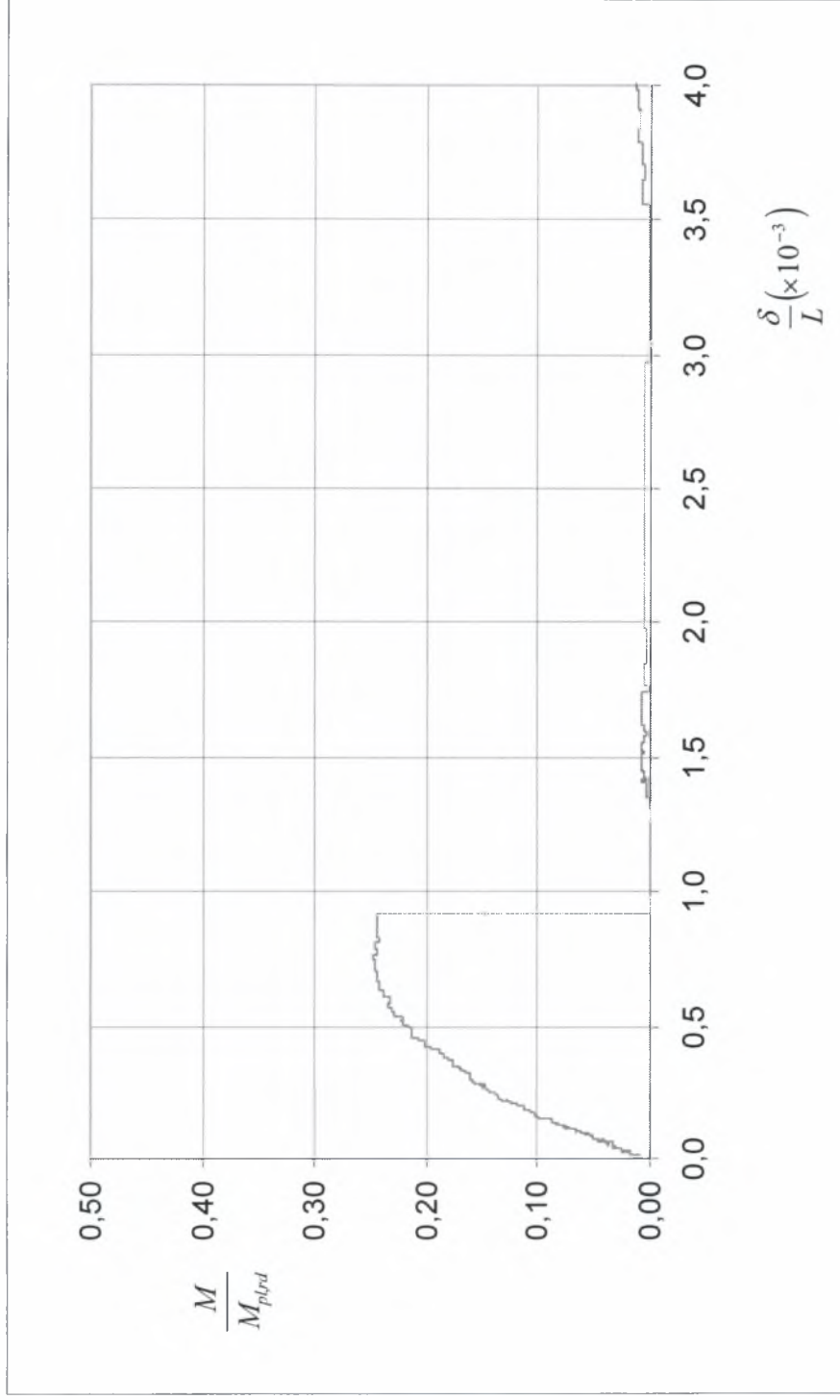
Στο πείραμα αυτό δεν είχαν τοποθετηθεί ηλεκτρομηκυσιόμετρα για την μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων

Στο σχήμα 5.6.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα ανηγμένης καμπτικής ροπής

$\frac{M}{M_{pl,rd}}$ συναρτήσει του ανηγμένου βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος

$\frac{\delta}{L}$, όπου $M_{pl,rd}$ είναι η καμπτική αντοχή της σύμμικτης πλάκας. Θα πρέπει να

τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η αστοχία της πλάκας επετεύχθη στο 25% (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται σε αυτή την τιμή η καμπτική ροπή λόγω ιδίου βάρους) περίπου της καμπτικής αντοχής της, η οποία υπολογίστηκε ότι ήταν 39.04 kNm. Τη στιγμή της αστοχίας το ανηγμένο βέλος κάμψης της πλάκας είναι 0.8‰.



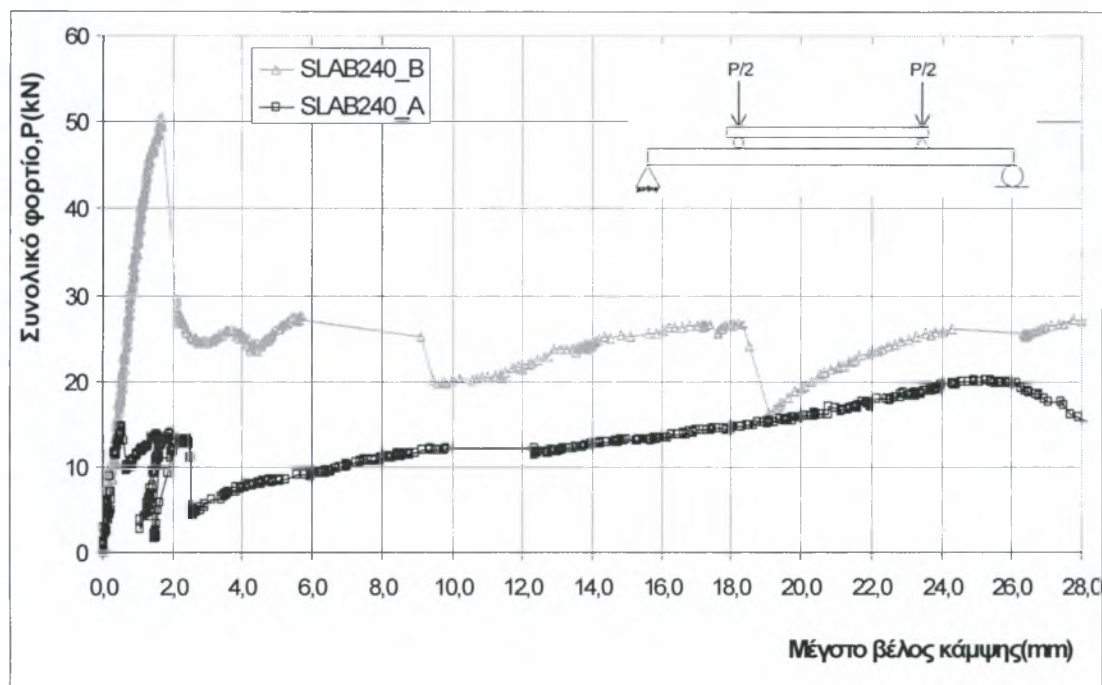
Σχήμα 5.6.9 Αδιάστατο διάγραμμα επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας

Κεφάλαιο 6

6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραμάτων SLAB_240A και SLAB_240B

Στο σχήμα 6.1.1 συγκρίνεται τη συμπεριφορά των δοκιμίων πλακών SLAB_240A και SLAB_240B. Τα δοκίμια έχουν τις ίδιες διαστάσεις και τα ίδια χαρακτηριστικά υλικών με μόνη διαφοροποίηση στον τύπο του ελάσματος προρηγμάτωσης που χρησιμοποιήθηκε. Στο σχήμα 6.1.1 παρατηρείται ότι το δοκίμιο πλάκας SLAB_240A αστόχησε σε σχετικά χαμηλό φορτίο, 14,68 kN. Το αίτιο αποδόθηκε στον τύπο του ελάσματος προρηγμάτωσης που χρησιμοποιήθηκε. Για τον λόγο αυτόν δεν συνεχίσαμε στην εκτέλεση όλων των πειραμάτων των δοκιμίων πλακών της σειράς 'Α' που είχαν κατασκευασθεί. Εκτελέστηκε ακόμη ένα πείραμα από τα δοκίμια της σειράς 'Α' το SLAB_280A για να επιβεβαιώσουμε ότι δεν επρόκειτο για ένα μεμονωμένο περιστατικό ή ότι αστοχία δεν ήταν αποτέλεσμα απρόβλεπτων παραγόντων κατά τη διαδικασία της μεταφοράς. Το δοκίμιο SLAB_280A επέδειξε παρόμοια συμπεριφορά με το SLAB_240A, έτσι κρίθηκε ότι τα αποτελέσματα των πειραμάτων της σειράς 'Α' δεν θα ήταν αξιόπιστα και αποφασίστηκε η εκ νέου κατασκευή δοκιμίων πλακών με διαφορετικό τύπο ελάσματος προρηγμάτωσης (βλέπε §3.3).

Το δοκίμιο SLAB_240B αστόχησε σε φορτίο 50,54 kN (Σχήμα 6.1.1), τρεισήμισι (3,5) φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του δοκιμίου πλάκας της σειράς 'Α' (SLAB_240A). Αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την αστοχία του δοκιμίου SLAB_240A το φορτίο αυξάνει και τείνει να γίνει ίδιο με το φορτίο που σημειώνεται μετά την αστοχία του δοκιμίου SLAB_240B. Αυτό οφείλεται στο ότι η δύναμη που απαιτείται για την ολίσθηση του σώματος του σκυροδέματος (το δοκίμιο πλάκας έχει διασπαστεί σε τρία ανεξάρτητα μέρη σκυροδέματος μετά την αστοχία) ήταν μεγαλύτερη από τη δύναμη που απαιτείται για την αστοχία του δοκιμίου SLAB_240A και είναι ίδια και για τα δύο δοκίμια γιατί έχουν τις ίδιες διαστάσεις.



Σχήμα 6.1.1: Συγκριτικό διάγραμμα Συνολικού φορτίου-μέγιστης μετακίνησης για τα δοκίμια πλάκας SLAB_240A και SLAB_240B

6.2 Εφαρμογή της μεθόδου m-k στα πειραματικά αποτελέσματα της σειράς δοκιμών 'B'.

Σύμφωνα με τη μέθοδο m-k, πραγματοποιείται μια σειρά πειραμάτων από τα οποία προκύπτει το μέγιστο φορτίο αντοχής της κάθε πλάκας. Χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διατομής της πλάκας κατασκευάζεται το διάγραμμα μέσω του οποίου θα προσδιοριστούν οι συντελεστές m , k (βλέπε §1.6) που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κατά μήκος διατμητικής αντοχής της σύμμικτης πλάκας(εξίσωση (1)).

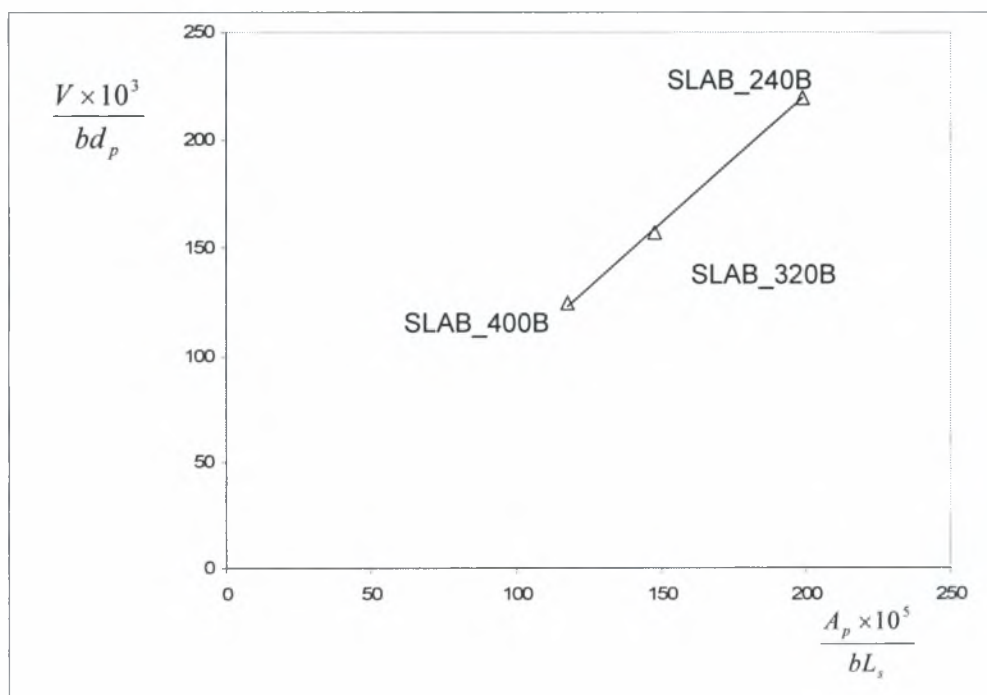
$$V_{l,rd} = \frac{b \cdot d_p}{\gamma_{vs}} \cdot \left[\left(\frac{A_p}{b \cdot L_s} \right) \cdot m + k \right] \quad (1)$$

Δοκίμιο	Πλάτος, b (mm)	Άνοιγμα, L, (mm)	Διατμητικό μήκος, L _s (mm)	Στατικό ύψος, d _p (mm)	Εμβαδό διατομής χαλυβδόφυλλου, A _p (mm ²)
SLAB_240B	830	2400	580	160	957
SLAB_320B	830	3200	780	160	957
SLAB_400B	830	4000	980	160	957

Πίνακας 6.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των δοκιμών πλακών σειράς «B»

Δοκίμιο	Φορτίο αστοχίας, P=2V _p (kN)	Ίδιο βάρος πλάκας (kN/m)	Τέμνουσα στην στήριξη λόγω ιδίου βάρους V _G (kN)	Συνολική τέμνουσα, V (kN)	$\frac{V}{bd_p}$ (MPa)	$\frac{A_p}{bL_s}$
SLAB_240B	50,54	3,284	3,94	29,21	0,2200	1,988E-03
SLAB_320B	31,33	3,284	5,25	20,92	0,1575	1,478E-03
SLAB_400B	19,89	3,284	6,57	16,52	0,1244	1,177E-03

Πίνακας 6.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα της σειράς δοκιμών «B»

Σχήμα 6.2.1 Διάγραμμα μεθόδου $m - k$ με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της σειράς δοκιμών «B»

Από γραμμική παρεμβολή στις τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει η εξίσωση της μορφής $y=mx+k$ όπου $k=-0,0158\approx 0$ MPa και $m=118,32$ MPa.

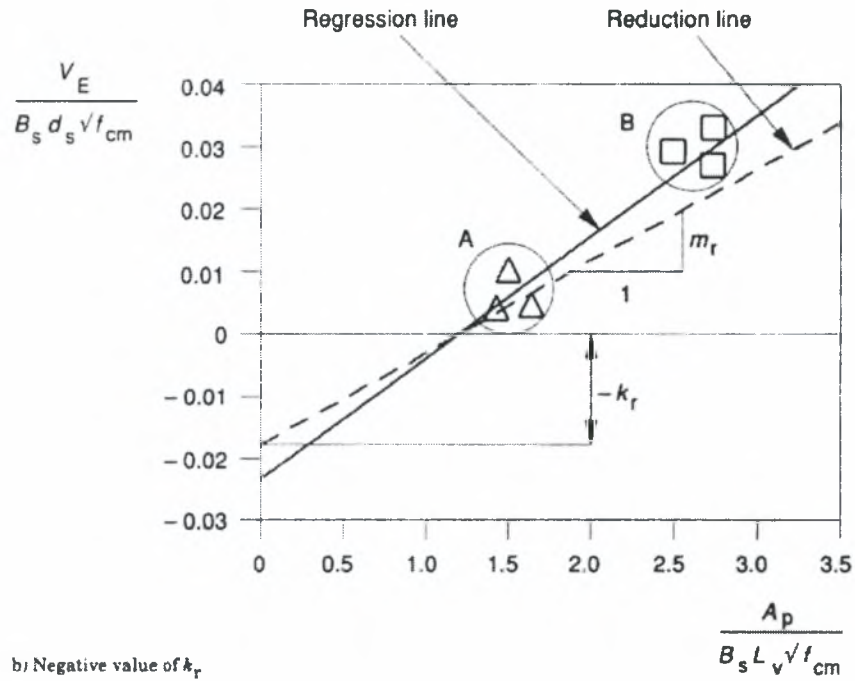
Σύμφωνα με τον EC4 όταν τα πειράματα γίνονται για να προσδιοριστούν οι συντελεστές m και k , για κάθε μεταβλητή πρέπει να εξεταστούν δύο ομάδες τριών δοκιμών (Σχήμα 6.2.) ή να εκτελεστούν πειράματα τριών ομάδων με δυο δοκίμια στη κάθε ομάδα. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ο αριθμός των δοκιμών ήταν περιορισμένος (τρία δοκίμια πλακών όσο αναφορά τη σειρά 'B').



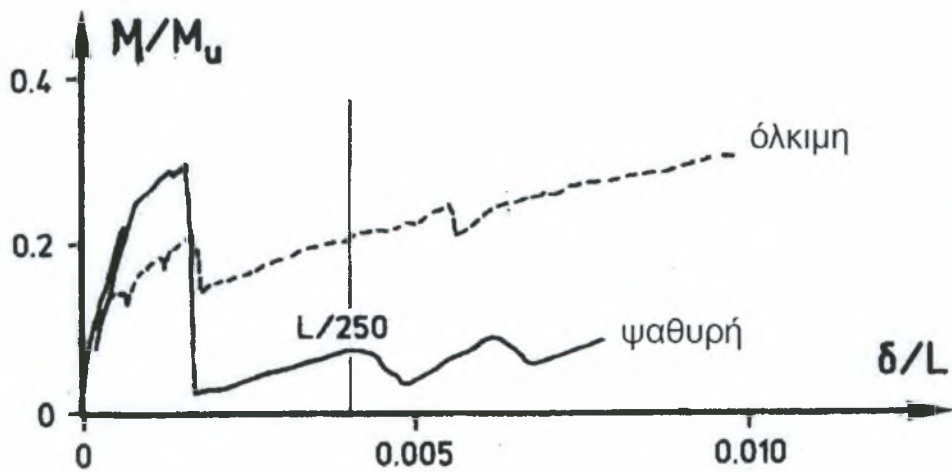
Σχήμα 6.2.2 – Διάγραμμα μεθόδου $m - k$ κατά EC4

Η αρνητική τιμή του συντελεστή k εκφράζει ότι σύμμικτες πλάκες με χαρακτηριστικά αντίστοιχα των πλακών που εξετάστηκαν πειραματικά και χωρίς χρήση βλήτρων δεν πρόκειται να έχουν καμπτική αστοχία. Στη διεθνή βιβλιογραφία (Daniels 1990) αναφέρεται ξεκάθαρα ότι δοκίμια σύμμικτων πλακών χωρίς τη χρήση βλήτρων παρουσιάζουν αστοχία σε διατμητική ολίσθηση και εντελώς ψαθυρή συμπεριφορά (Σχήμα 6.2.4). Αναφορά στην αρνητική τιμή του συντελεστή k γίνεται μόνο στον British Standard (BS 5950) όπου αναφέρει ότι στην περίπτωση αρνητικής τιμής του k τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό, της κατά μήκος διατμητικής αντοχής, σε πλάκες που θα έχουν σκυρόδεμα

μικρότερης θλιπτικής αντοχής από τις αντίστοιχες που προέκυψαν οι συντελεστές m, k .



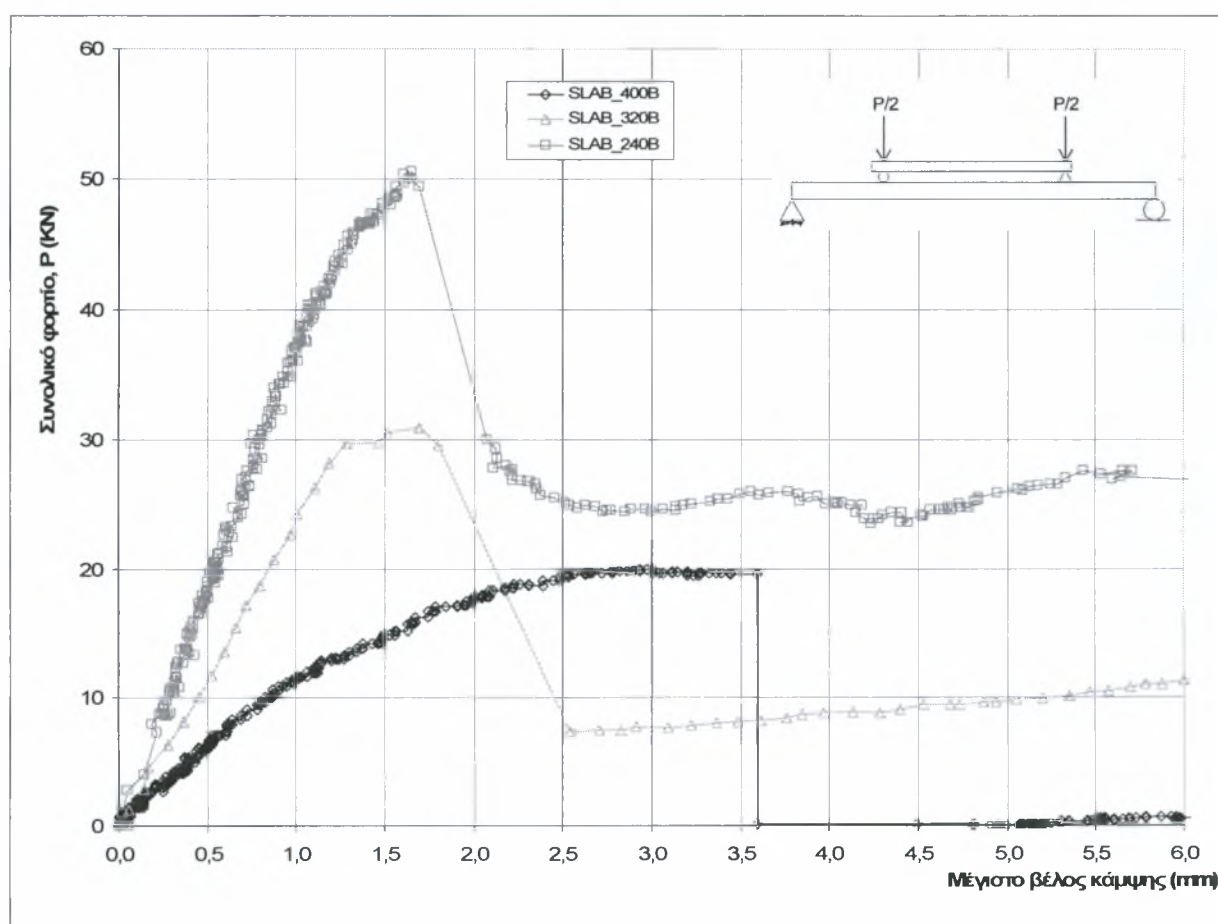
Σχήμα 6.2.3 – Διάγραμμα μεθόδου $m - k$ κατά BS 5950



Σχήμα 6.2.4 – Τυπικό διάγραμμα όλκιμης και φαθυρής συμπεριφοράς δοκιμίου σύμμικτης πλάκας (Daniels 1990)

6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων σειράς δοκιμών σειράς «B»

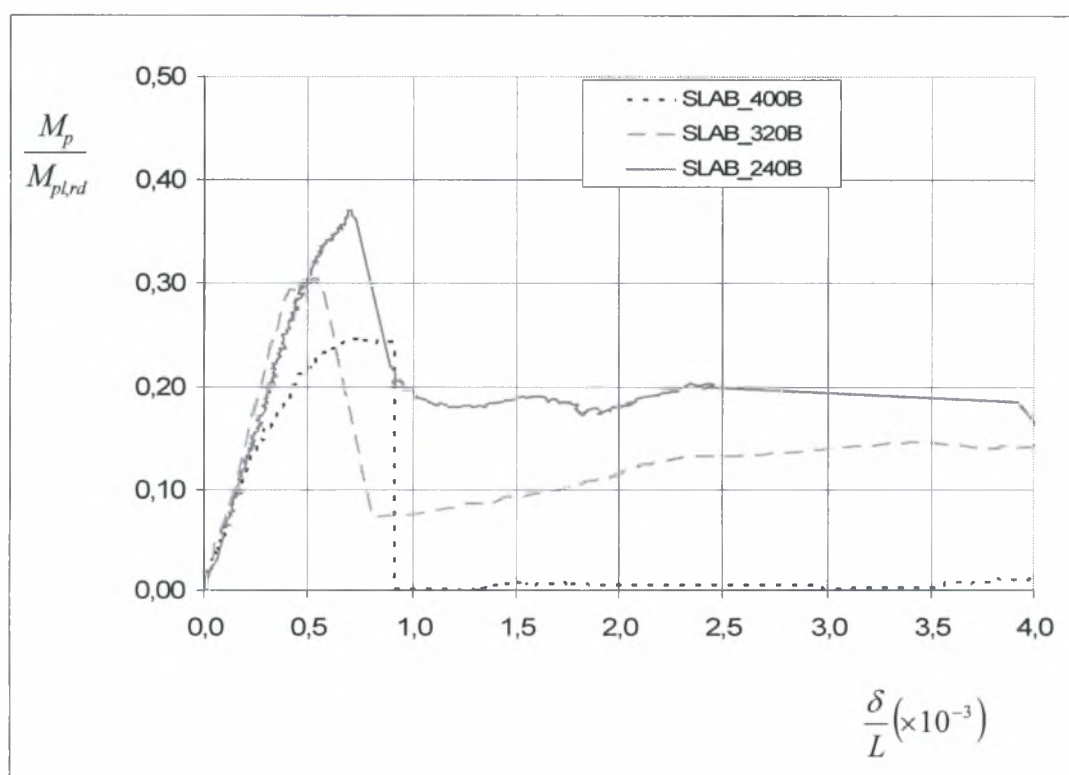
Στο Σχήμα 6.3.1 συγκρίνεται η συμπεριφορά των δοκιμών πλάκων της σειράς δοκιμών 'B'. Συγκριτικά με τα άλλα δύο δοκίμια, η πλάκα με μήκος 4 m (SLAB_400B) παρουσιάζει κάπως πιο όλκιμη συμπεριφορά, γιατί σημειώνεται μεγαλύτερο βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος την στιγμή της αστοχίας. Ωστόσο δεν παύει το βέλος αυτό να είναι αρκετά χαμηλό σε σύγκριση με αυτό που προβλέπει ο EC4 ($L/50$), για τον ορισμό της όλκιμης συμπεριφοράς. Τα δοκίμια SLAB_240B και SLAB_320B παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Άξιο να αναφερθεί σε αυτό το σημείο είναι ότι, μετά την αστοχία και των τριών δοκιμών το φορτίο καταγράφει πτώση της τάξης των 20 kN.



Σχήμα 6.3.1 – Διάγραμμα φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης

Στο Σχήμα 6.3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα της ανηγμένης επιβαλλόμενης (λόγω του φορτίου P) καμπτικής ροπής $\frac{M}{M_{pl,rd}}$ συναρτήσει του ανηγμένου βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος $\frac{\delta}{L}$, όπου $M_{pl,rd}$ είναι η καμπτική αντοχή της σύμμικτης πλάκας. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα του δοκιμίου η καμπτική καταπόνηση είναι μεγαλύτερη.

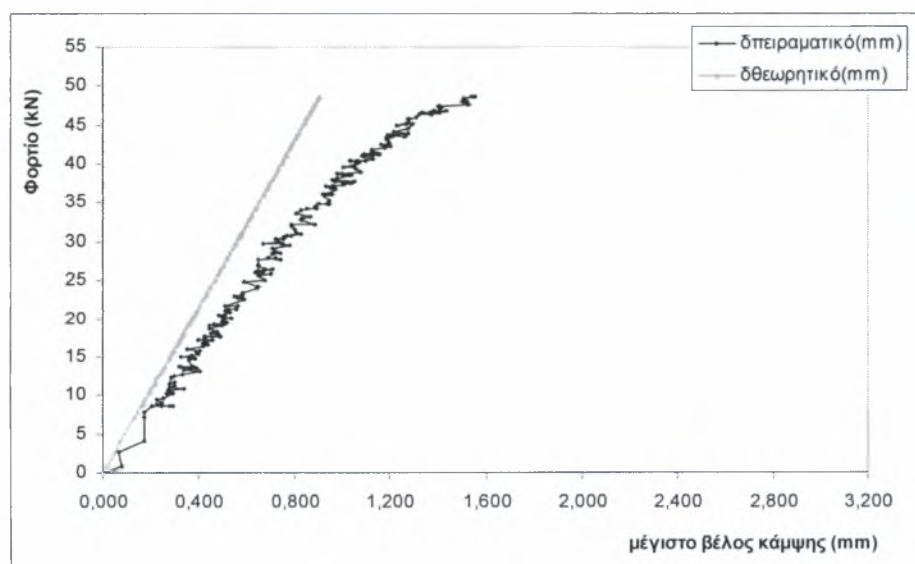
Αξιοσημείωτο είναι ότι αν αντί της επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής χρησιμοποιήσουμε την συνολική ροπή που καταπονεί την πλάκα (δηλαδή αν συμπεριλάβουμε και την καμπτική ροπή που προκαλεί το ίδιο βάρος), η αστοχία και των τριών (3) πλακών επετεύχθη στο 40% περίπου της καμπτικής αντοχής τους.



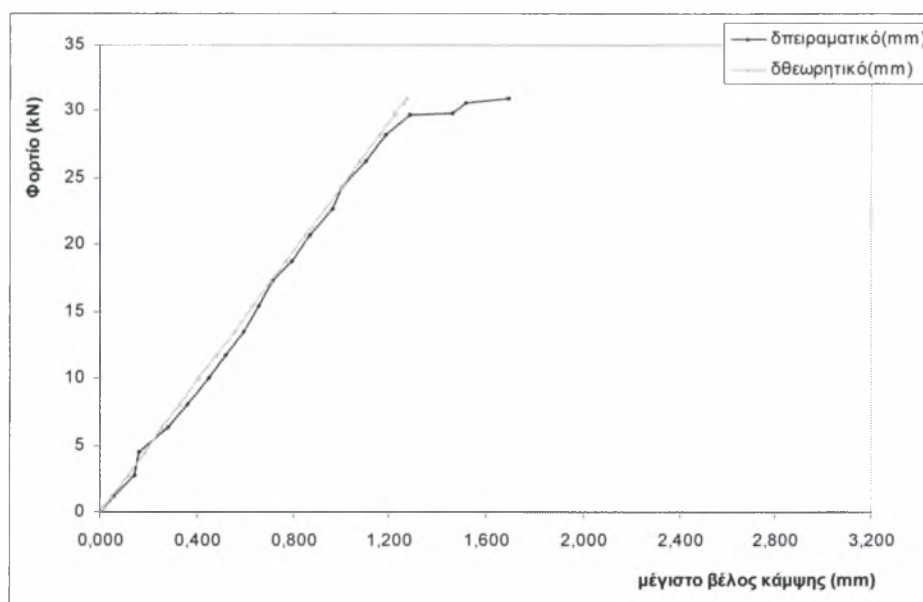
Σχήμα 6.3.2 – Αδιάστατο διάγραμμα επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής – μέγιστου βέλους κάμψης σειράς δοκιμών "B".

6.4 Σύγκριση των πειραματικών αντοχών με τις αντίστοιχες που προβλέπει ο EC4

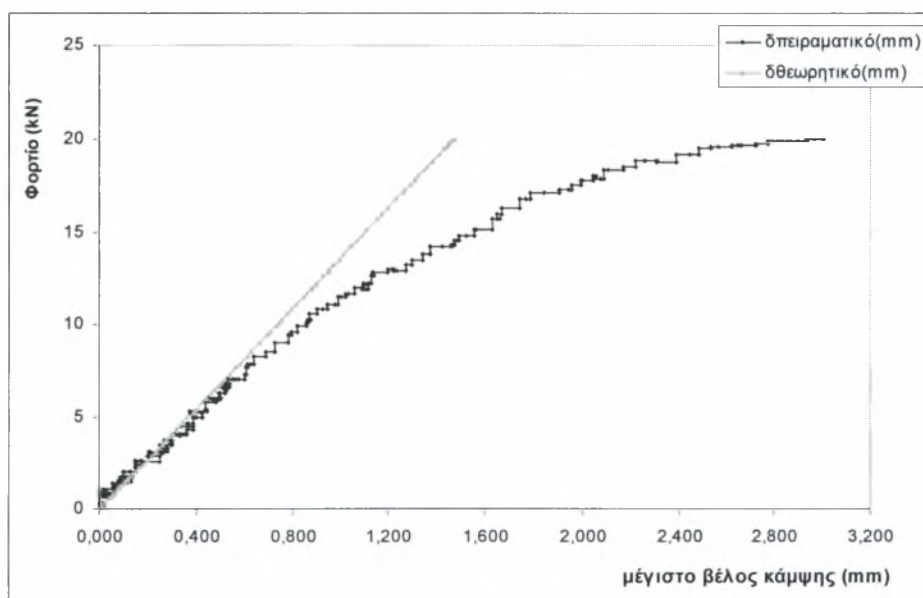
Βάσει των αδρανειακών ροπών (σταδίου I και II), της ροπής ρηγμάτωσης και της τάσης του χάλυβα κατά την ρηγμάτωση της σύμμικτης πλάκας υπολογίστηκαν με θεωρητική προσέγγιση τα μέγιστα βέλη κάμψεως στο άνοιγμα της σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος για να επαληθευτούν οι πειραματικές δυσκαμψίες. Στα Σχήματα 6.4.1-6.4.3 δίνονται τα πειραματικά διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψεως αλλά και το θεωρητικό διάγραμμα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψεως με βάση την ελαστική θεωρία, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το έργο που οφείλεται στις επιβαλλόμενες καμπτικές ροπές και αμελώντας το έργο που οφείλεται στη δράση των τεμνουσών, στοιχείο που όπως φαίνεται παρακάτω οδήγησε σε υποεκτίμηση του βέλους κάμψεως στο μέσον του ανοίγματος του πειράματος της σύμμικτης πλάκας με άνοιγμα 2,40 m καθώς εκεί μετρήθηκε και η μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη.



Σχήμα 6.4.1 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψεως της σύμμικτης πλάκας με μήκος 2.40 m (πειραματικό και θεωρητικό).

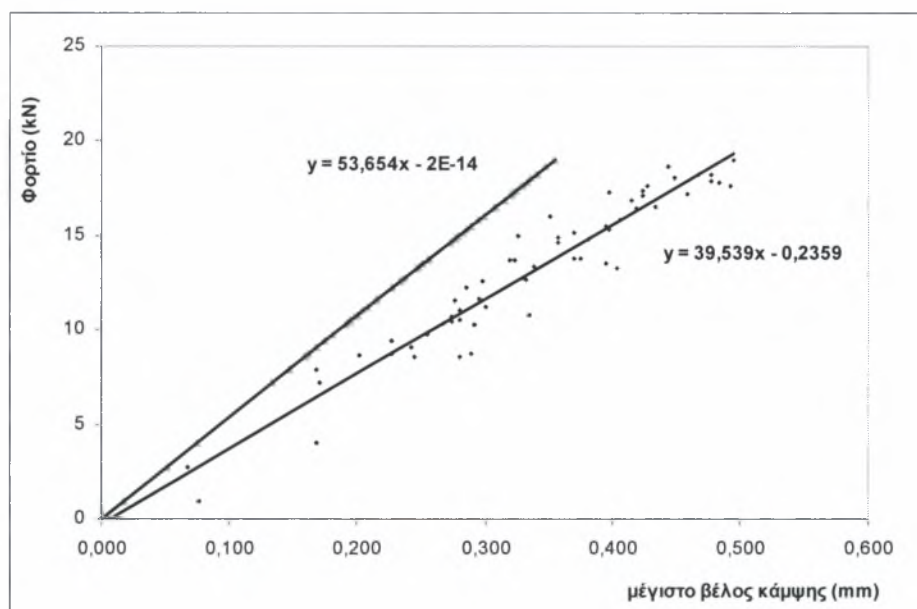


Σχήμα 6.4.2 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας με μήκος 3.20 m (πειραματικό και θεωρητικό).

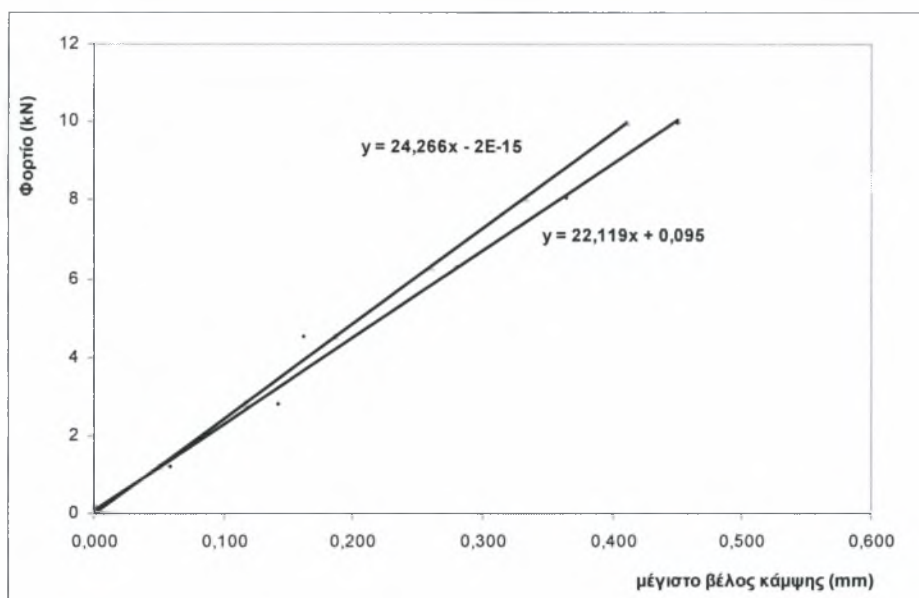


Σχήμα 6.4.3 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας με μήκος 4.00 m (πειραματικό και θεωρητικό).

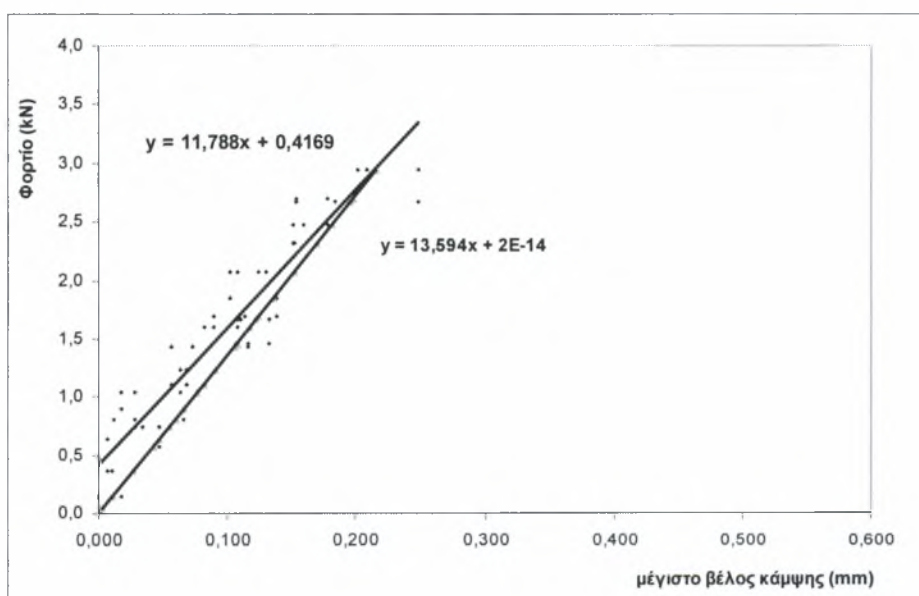
Στα Σχήματα 6.4.4 – 6.4.6 δίνονται τα διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψεως (πειραματικό και θεωρητικό) μέχρι το φορτίο ρηγμάτωσης της διατομής της σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος. Οι κλίσεις των ευθειών του διαγράμματος μας δίνουν τις δυσκαμψίες των δοκιμίων με βάση τα πειράματα καθώς και αυτές που υπολογίστηκαν θεωρητικά με βάση την ελαστική θεωρία. Παρατηρήθηκε ότι τα πειράματα έδωσαν αποτελέσματα κοντά στις θεωρητικές προσεγγίσεις.



Σχήμα 6.4.4 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψεως της σύμμικτης πλάκας με μήκος 2.40 m (πειραματικό και θεωρητικό).



Σχήμα 6.4.5 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας με μήκος 3.20 m (πειραματικό και θεωρητικό).



Σχήμα 6.4.6 Διαγράμματα συνολικού φορτίου – μέγιστου βέλους κάμψης της σύμμικτης πλάκας με μήκος 4.00 m (πειραματικό και θεωρητικό).

Με βάση τις θεωρητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των πειραμάτων για να επαληθευτούν οι αδρανειακές ροπές των δοκιμίων σύμμικτων πλάκων σκυροδέματος που υπεβλήθησαν εργαστηριακό έλεγχο. Οι αδρανειακές ροπές υπολογίστηκαν για τα πειράματα των πλάκων με άνοιγμα

2.40, 3.20 και 4.00 m ως 25335.0 , 32257.6 και 35868.2 cm⁴ αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί (βλέπε Κεφάλαιο 4) δίνουν για την μετασχηματισμένη διατομή σε σκυρόδεμα 34611.8 cm⁴.

Στα πειράματα των δοκιμών των σύμμικτων πλακών με άνοιγμα 2.40 και 3.20 m στα οποία είχαν τοποθετηθεί ηλεκτρομηκυσιόμετρα για τη μέτρηση των ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων στο χαλυβδόφυλλο, έγινε ο μετασχηματισμός των μετρημένων παραμορφώσεων σε τάσεις μέσω των οποίων υπολογίστηκε η ροπή αδράνειας του στοιχείου, μετασχηματισμένης διατομής σε χάλυβα. Οι μετασχηματισμοί έδωσαν 5678.9 και 5789.4 cm⁴ αντίστοιχα όταν οι υπολογισμοί (βλέπε Κεφ 4) δίνουν 5023.5 cm⁴.

Η πειραματική ροπή αδράνειας υπολογίστηκε ως εξής:

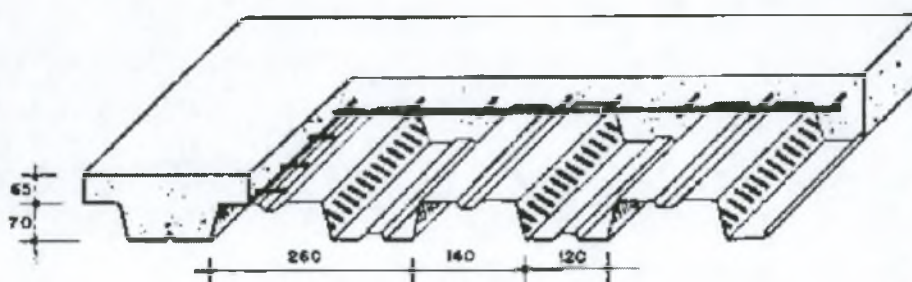
$f_s = E \cdot \varepsilon$, όπου $E = 210$ GPa και ε η παραμόρφωση που μετρήθηκε στο χαλυβδόφυλλο τη στιγμή της ρηγμάτωσης

Στη συνέχεια μέσω της σχέσης $I_i = \frac{M_{cr} \cdot (H - z_c)}{f_s}$ υπολογίζουμε τη ροπή αδρανείας μετασχηματισμένης διατομής σε χάλυβα.

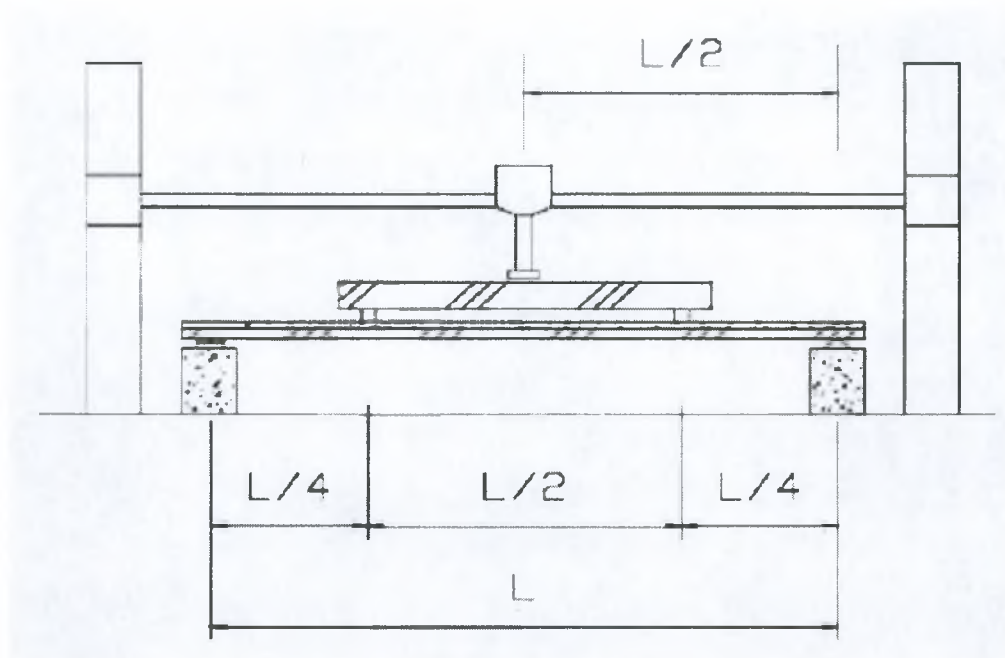
6.5 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα του PUC-Rio de Janeiro

Στη συνέχεια παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από δοκιμές σύμμικτων πλακών που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με αντίστοιχα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών και Κατασκευών του Καθολικού-Παπικού Πανεπιστημίου στο Ρίο Ντε-Τζανέιρο της Βραζιλίας (Structural and Materials Laboratory Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brazil).

Η σειρά δοκιμών που πραγματοποιήθηκε στο PUC-Rio βασίστηκε στην κατασκευή οκτώ (8) δοκιμών σύμμικτων πλακών με μέγεθος αντίστοιχο των σύμμικτων πλακών που χρησιμοποιούνται στις πραγματικές κατασκευές. Σκοπός των εργαστηριακών δοκιμών ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς των σύμμικτων πλακών και κυρίως η εκτίμηση της συνεισφοράς του τύπου της διατομής του χαλυβδόφυλλου στην αύξηση της κατά μήκος διατμητικής αντοχής. Τα δοκίμια των πλακών είχαν ως κύριο οπλισμό κάμψης μόνο το χαλυβδόφυλλο και δεν τοποθετήθηκε πρόσθετος κύριος οπλισμός. Το χαλυβδόφυλλο που χρησιμοποιήθηκε είχε ύψος 70 mm, πάχος 0.9 mm, όριο διαρροής $f_y=230$ MPa και τύπος διαμορφωμένης επιφάνειας ASTM A570 ή SAE 1010 (Σχήμα 6.5.1). Το συνολικό πάχος των δοκιμών των πλακών ήταν 135 mm. Επίσης τοποθετήθηκε κατασκευαστικό πλέγμα στην άνω παρειά των δοκιμών των πλακών για να αποφευχθεί πιθανή εμφάνιση ρωγμών λόγω συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος ή κατά τη μεταφοράς.



Σχήμα 6.5.1 – Διατομή δοκιμίου σύμμικτης πλάκας στο PUC – Rio (Βραζιλία).



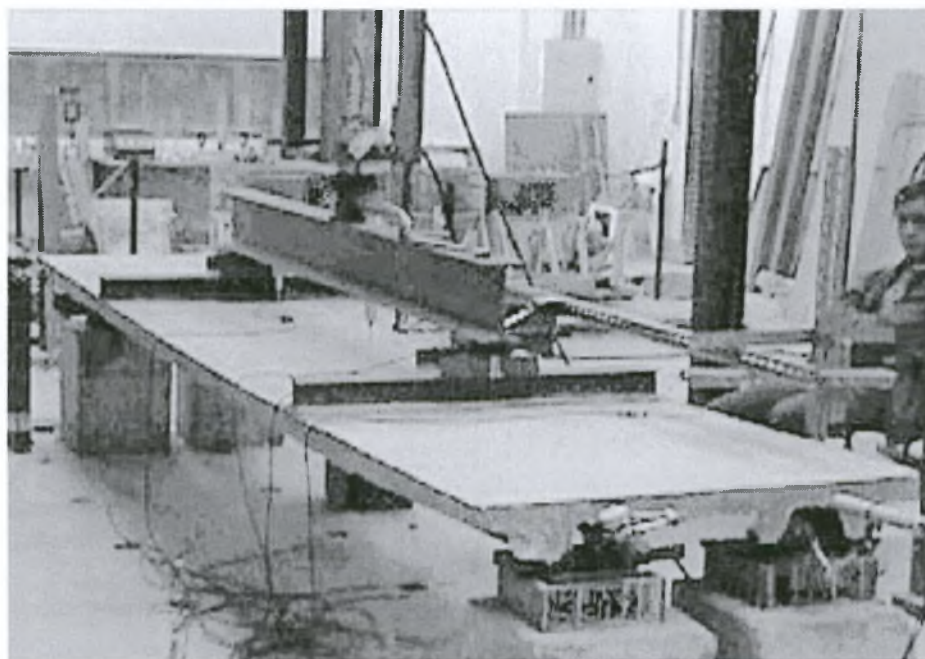
Σχήμα 6.5.2 Πειραματική διάταξη δοκιμής σε κάμψη δοκιμίων σύμμικτων πλακών στο PUC-Rio (Βραζιλία).

Τα δοκίμια των πλακών φορτίστηκαν ως αμφιέρειστες πλάκες υπό την επίδραση δυο συμμετρικών γραμμικών συγκεντρωμένων φορτίων (Σχήμα 6.5.2). Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων παρατίθενται στον Πίνακα 6.5.1. Στα πέντε (5) από τα οκτώ (8) δοκίμια (DM1 έως DM5) η επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου πριν την σκυροδέτηση ήταν η εργοστασιακή και ήταν όμοια με αυτή των δοκιμίων που εξετάστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ενώ στα υπόλοιπα τρία (3) η επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου υπέστη βιομηχανική βαφή για την αύξηση της συνάφειας. Επίσης τα τέσσερα (4) δοκίμια DM5-DM8 κατασκευάστηκαν στην τελική θέση εκτέλεσης του πειράματος. Γιατί παρόλα τα μέτρα ασφαλείας που τηρήθηκαν κατά τη μεταφορά των δοκιμίων από τη θέση σκυροδέτησης, στη θέση της πειραματικής διάταξης, η πλάκα του δοκιμίου DM4 υπέστη πρόωρη σχετική ολίσθηση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος χαλυβδόφυλλου κατά τη μεταφορά.

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	f_{ck} (MPa)	Άνοιγμα (mm)	Ls (mm)
DM1	650	11.5	3200	1200
DM2	650	11.5	3200	1200
DM3	1195	22.5	3200	1200
DM4	1180	30.0	3200	1200
DM5	935	23.4	3200	1200
DM6	820	25.3	3000	1125
DM7	1560	23.8	3000	1125
DM8	1560	17.7	3000	1125

Πίνακας 6.5.1 Χαρακτηριστικά δοκιμίων πλακών στο PUC-Rio (Βραζιλία).

Η σκυροδέτηση των δοκιμίων έγινε υπό συνθήκες πλήρους έδρασης του χαλυβδόφυλλου.



Σχήμα 6.5.3 – Πειραματική διάταξη στο PUC-Rio (Βραζιλία).

Τα πειράματα ακολούθησαν την παρακάτω διαδικασία :

1. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων έγινε μετά το πέρας των 28 ημερών από τη σκυροδέτηση των δοκιμίων.
2. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγινε η καταγραφή της σχετικής ολίσθησης μεταξύ των δύο υλικών στις στηρίξεις του δοκιμίου.
3. Το δοκίμιο πλάκας υποβλήθηκε σε δυναμική φόρτιση όπου το φορτίο κυμαινόταν από το 50% μέχρι το 150% του προβλεπόμενου φορτίου λειτουργίας, δηλαδή περίπου 0.005 MPa.
4. Μετά από την επιβολή 10.000 κύκλων φόρτισης, το δοκίμιο πλάκας υποβλήθηκε σε μονοτονική στατική φόρτιση και καταγράφηκε το επιβαλλόμενο συνολικό φορτίο συναρτήσει του μέγιστου βέλους κάμψης μέχρι την τελική αστοχία.

Δοκίμιο	$\frac{A_p \times 10^6}{bL_s \sqrt{f_{ck}}} \text{ (MPa)}^{1/2}$	$\frac{V}{bd_p \sqrt{f_{ck}}} \text{ (MPa)}^{1/2}$	Άνοιγμα (mm)
DM1	408	0.0160	3200
DM2	408	0.0175	3200
DM3	318	0.0125	3200
DM4	110	-	3200
DM5	199	0.0095	3200
DM6	233	0.0105	3000
DM7	252	0.0285	3000
DM8	293	0.0305	3000

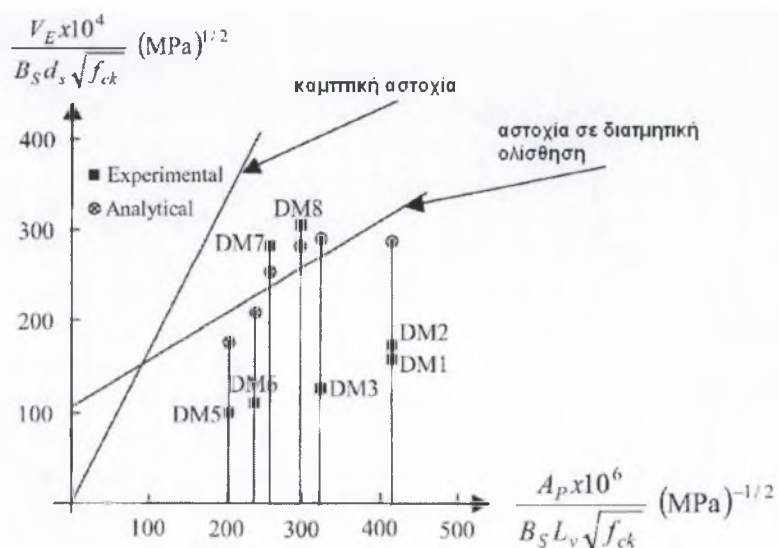
Πίνακας 6.5.2 – Πειραματικά αποτελέσματα στο PUC-Rio (Βραζιλία)

Τα πειράματα που περιγράφονται σχεδιάστηκαν με σκοπό να αστοχήσουν σε διατμητική ολίσθηση. Στον πίνακα 6.5.2 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα σε συνάρτηση με τις παραμέτρους που περιγράφονται από τις εξισώσεις (1) και (2) που προτάθηκαν από τον Porter και Eckberg. Οι ίδιες εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν και κατά τη σύσταση του EC4.

$$\frac{A_p}{bL_s \sqrt{f_{ck}}} \quad (1)$$

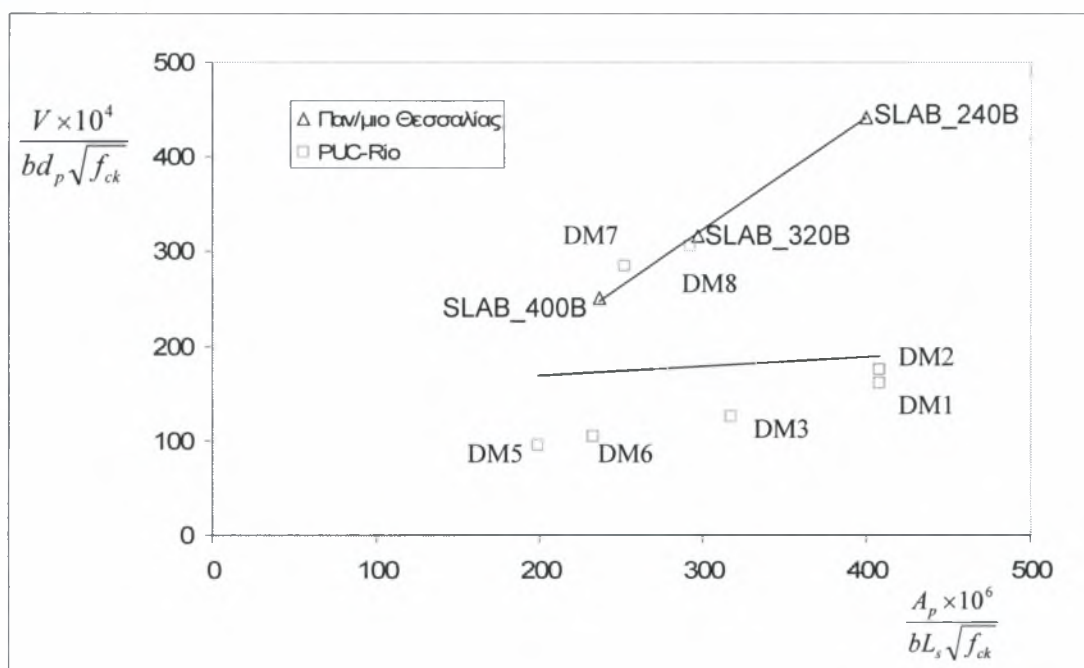
$$\frac{V}{bd_p \sqrt{f_{ck}}} \quad (2)$$

Το f_{ck} αποτελεί τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος που προκύπτει από κυλινδρικά δοκίμια. Η απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου από την άνω ίνα της πλάκας d_p ήταν 107.22 mm (για τα πειράματα στο PUC-Rio).



Σχήμα 6.5.4 Διάγραμμα μεθόδου $m - k$ για τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα (PUC, Rio)

Με γραμμική παρεμβολή των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει η εξίσωση της μορφής $y=mx+k$ όπου $k=0.0106 \text{ MPa}$ και $m=51.917 \text{ MPa}$ (Σχήμα 6.5.4). Οι αντίστοιχοι συντελεστές που προέκυψαν από τα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν αντίστοιχα $k=-0.0158 \text{ MPa}$ και $m=118.32 \text{ MPa}$.



Σχήμα 6.5.5 Διάγραμμα μεθόδου $m - k$ σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων Παν/μίου Θεσσαλίας με αυτά του PUC-Rio (Βραζιλία)

Με βάση τα στοιχεία των πειραμάτων του PUC – Rio de Janeiro υπολογίστηκε το «θεωρητικό άνοιγμα» σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος για το οποίο μπορούμε να έχουμε είτε καμπτική είτε αστοχία σε διατμητική ολίσθηση.

Η καμπτική ροπή της υπό εξέτασης διατομής υπολογίστηκε ίση με 21.8 kNm με εφαρμογή των εξισώσεων του Κανονισμού EC4. Από αυτή υπολογίστηκε η τέμνουσα που αναπτύσσεται στη διατομή κατά την καμπτική αστοχία και βρέθηκε ίση με 18.2 kN. Με τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων υπολογίστηκε η κλίση της ευθείας m' η οποία δίνει την καμπτική αστοχία των δοκιμών.

$$M_{pl,Rd} = V \cdot L_s \Rightarrow \frac{A_p \cdot f_{yp} \cdot \zeta \cdot d_p}{b \cdot d_p \cdot L_s} = \frac{V \cdot L_s}{b \cdot d_p \cdot L_s} \Rightarrow \frac{V}{b \cdot d_p} = \left(\frac{A_p}{b \cdot L_s} \right) \cdot (\zeta \cdot f_{yp})$$

$$m' = \zeta \cdot f_{yp} = \left(1 - \frac{x_{pl}}{2d_p} \right) \cdot f_{yp} = 0.82 \cdot 230 = 188.6 \text{ MPa}$$

Όπου $L_s = 1.2 \text{ m}$

$$d_p = 10.722 \text{ cm}$$

$$b = 65 \text{ cm}$$

$$A_p = 10.79 \text{ cm}^2$$

$$x_{pl} = 3.9 \text{ cm}$$

$$M_{pl,rd} = 21,77 \text{ KNm}$$

$$f_{yp} = 230 \text{ MPa}$$

Παίρνοντας δύο σημεία της ευθείας από το διάγραμμα (Σχήμα 6.5.4) για την καμπτική αστοχία υπολογίζουμε την κλίση της ευθείας ίση με 172 MPa που είναι κοντά σε αυτή που υπολογίστηκε βάσει των παραπάνω παραδοχών. Γνωρίζοντας τις εξισώσεις των ευθειών μπορεί να προσδιοριστεί το «θεωρητικό άνοιγμα» που μπορεί να εμφανίσει και τους δύο τύπους αστοχιών (καμπτική και διατμητική ολίσθηση) το οποίο βρέθηκε ίσο με 50 m. Δηλαδή η καμπτική αστοχία μπορεί να επιτευχθεί (χωρίς τους ήλους υψηλής διατμητικής αντοχής για τη σύνδεση του χαλυβδόφυλλου με το σκυρόδεμα) σε μήκη ανοίγματος σύμμικτων πλακών σκυροδέματος μεγαλύτερα των 50 m, κάτι που είναι ανέφικτο κατασκευαστικά.

6.6 Συμπεράσματα

Όπως έγινε κατανοητό από τα παραπάνω οι συντελεστές m και k αντιπροσωπεύουν τάσεις, συγκεκριμένα οριακές τιμές τάσεων κατά την αστοχία σε διατμητική κατά μήκος ολίσθηση. Ο συντελεστής m αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά του χάλυβα στην συνάφεια των δύο υλικών και ο συντελεστής k τη συνεισφορά του σκυροδέματος. Στην περίπτωση της ψαθυρής αστοχίας (όπως συνέβη στα πειράματα που περιγράφονται στην παρούσα διπλωματική εργασία) η συνεισφορά του σκυροδέματος αμελείται. Η αρνητική τιμή του k που δίνεται από τα πειράματα σύμφωνα με τις βρετανικές προδιαγραφές είναι ένδειξη έντονης ψαθυρής, μη πλαστικής συμπεριφοράς. Ένα στοιχείο που χρήζει κατά τους συγγραφείς της παρούσας διπλωματικής εργασίας ιδιαίτερης προσοχής, είναι η τιμή του συντελεστή m . Η τιμή του συντελεστή m ($m=118.32$ MPa) συγκρινόμενη με τη τιμή της τάσης του χάλυβα κατά την ρηγμάτωση, η οποία υπολογίστηκε ίση με 80 MPa (βλέπε Κεφάλαιο 4) δείχνει τελικά ότι ο συντελεστής m αντιπροσωπεύει την τιμή της τάσης του χάλυβα χρονικά, αμέσως μετά τη ρηγμάτωση. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τον προσδιορισμό του συντελεστή m μπορούμε να έχουμε μία ένδειξη μετρώντας τις ανηγμένες αξονικές παραμορφώσεις στο χαλυβδόφυλλο στις διατομές που συμβαίνει η ρηγμάτωση (θέσεις που έχουν τοποθετηθεί τα ελάσματα «προρηγμάτωσης»).

Τα πειράματα του PUC – Rio de Janeiro δίνουν πλαστική συμπεριφορά καθώς κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή k . Σε αυτά τα πειράματα διαπιστώθηκε ότι για συγκεκριμένο μήκος ανοίγματος της σύμμικτης πλάκας σκυροδέματος (το οποίο υπολογίζεται παραπάνω) είναι δυνατό να έχουμε είτε καμπτική είτε αστοχία σε διατμητική ολίσθηση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων τα οποία εκτελέστηκαν από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και του PUC – Rio de Janeiro διαπιστώθηκε ότι η τιμή του συντελεστή m είναι της τάξης των MPa ενώ του συντελεστή k της τάξης των kPa, ενδεικτικό της διαφοράς των τάσεων που αναπτύσσονται στα δύο υλικά (οι τάσεις που αναπτύσσονται στο χάλυβα είναι μεγαλύτερες από αυτές του σκυροδέματος).

Βιβλιογραφία

1. Βάγιας, Ι. Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, Κλειδάριθμος ,2001.
2. Κάνος Αργύρης, «Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης Κλίμακας στη Μηχανική Συμπεριφορά Σκυροδέματος (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή) και Προσομοίωση των Πειραματικών Δεδομένων», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας 2004.
3. EUROPEAN STANDARD EC4 (prEN 1994-1-1) Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings
4. BRITISH STANDARD BS 5950-4:1994 Structural use of steelwork in building Part 4: Code of practice for design of composite slabs with profiled steel sheeting
5. Steel Deck Institute, Design manual for composite decks, form decks, roof decks and cellular metal floor deck with electrical distribution. Publication No 27; 1989. 47 p.
6. Sebastiao A.L., de Andrade Pedro C.G., da S. Vellasco Jose´ Guilherme S. da Silva, Tadeu H. Takey, “Standardized composite slab systems for building constructions”, Journal of Constructional Steel Research, 60, pp 493–524, 2004
7. Zoltan V. Nagy and Istvan Szatmari, “Composite design of composite slab, Technical university of Budapest”, Department of Steel Structures H-1521 Budapest, 2nd Int. Symposium in Civil Engineering, 1998, Budapest.
8. K.C.G. Ong and M.A.Mansurt, “Shear-bond Capacity of Composite Slabs made with Profiled Sheetting, The International Journal of Cement and Lightweight Concrete, Vol 8, No 4 (1986)
9. Daniels BJ, Crisinel M. “Composite Slab Behaviour and Strength Analysis Part I and II: Comparisons with Test Results and Parametric Analysis.” J Struct Eng, ASCE 1993, 119(1): pp.36–49



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074 747