

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Π.Μ.Σ.

«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς σε Κάμψη Συμβατικά Οπλισμένων
Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου
Τσιμεντοκονιάματος

Παπαθεοχάρης Θεοχάρης



Επιβλέπων Καθηγητής: **Περδικάρης Φίλιππος**
Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος
Ακαδημαϊκό Έτος 2011-2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή

Εισαγωγή.....	4
1.1 Μανδύες	6
1.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	7
1.2.1 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα.....	9
1.2.2 Ιδιότητες & συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.....	9
1.2.3 Κάμψη ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.....	12

2. Υλικά και κατασκευή δοκιμών

2.1 Κωδικός δοκιμών.....	14
2.2 Κατασκευή δοκιμών.....	15
2.2.1 Κατασκευή δοκών.....	15
2.2.2 Κατασκευή δοκιμών σκυροδέματος.....	19
2.3 Υλικά.....	20
2.3.1 Χάλυβας οπλισμού.....	20
2.3.2 Ίνες.....	22
2.3.3 Σκυρόδεμα και ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα.....	23

3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

3.1 Πειραματική διάταξη.....	35
3.1.1 Πειραματική διάταξη δοκών σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.....	35
3.1.2 Πειραματική διάταξη δοκών σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.....	37
3.1.3 Πειραματική διάταξη δοκών σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.....	39
3.1.4 Πειραματική διάταξη δοκού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3-σημείων.....	42
3.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	44
3.2.1 Σερβοϋδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου.....	44
3.2.2 Μετρητικά όργανα.....	46
3.3 Πειραματική διαδικασία.....	48
3.3.1 Πειραματική διαδικασία δοκών.....	48
3.3.2 Δοκίμια σκυροδέματος.....	52

4. Υπολογισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών αντοχής των δοκών	
4.1 Συμβατικά οπλισμένη δοκός.....	53
4.1.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	53
4.1.2 Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης και διαρροής διαμήκους οπλισμού.....	54
4.1.3 Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση.....	56
4.2 Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμό Φ10	58
4.2.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	58
4.3 Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικό πλέγμα T131.....	60
4.3.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	60
4.4 Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής 100 MPa.....	62
4.4.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	62
4.5 Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό Φ10.....	64
4.5.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	64
4.5.2 Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης και διαρροής διαμήκους οπλισμού.....	66
4.5.3 Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση.....	68
4.6 Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και μεταλλικό πλέγμα T131.....	70
4.6.1 Καμπτική ροπή αντοχής.....	70
4.6.2 Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης και διαρροής διαμήκους οπλισμού.....	72
4.6.3 Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση.....	74
5. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών.....	77
6. Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων μονοτονικής φόρτισης	
6.1 Στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης.....	139
6.2 Συμπεράσματα.....	149
7. Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων ανακυκλιζόμενης φόρτισης	
7.1 Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης.....	151
7.2 Συμπεράσματα.....	171
8. Βιβλιογραφία.....	173

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσθήκη ινών σε δομικά υλικά ως μέσο όπλισης και βελτίωσης των ιδιοτήτων τους είναι γνωστή ήδη από τα αρχαία χρόνια. Την περίοδο αυτή, τρίχες αλόγου χρησιμοποιούνταν στην παρασκευή των διαφόρων κονιαμάτων και άχυρο στην κατασκευή τούβλων. Οι ίνες από άσβεστο στο τσιμέντο θα κάνουν την εμφάνιση τους στις αρχές του 1900, μετά την ανακάλυψη τους από τον Hatschek το 1898 και από τότε η χρήση τους σε διάφορα υλικά θα διαδοθεί ιδιαίτερα. Το ενδεχόμενο προσθήκης ινών χάλυβα θα διερευνηθεί για πρώτη φορά από τον Porter το 1910. Η συνεχής ανάγκη για βελτίωση των υλικών των κατασκευών θα επαναφέρει δυναμικά την ιδέα της χρήσης σύνθετων υλικών κατά την δεκαετία του 1950. Πρωτοποριακή ήταν η εργασία των Romualdi και Batson το 1963 για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα. Η προσθήκη ινών γυαλιού στο σκυρόδεμα δοκιμάστηκε για πρώτη φορά από τους Σοβιετικούς στα τέλη του '50 και οι συνθετικές ίνες ως μέρος των δομικών υλικών από τον Goldfein το 1965. Στα μέσα του 1960 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά ίνες στην κατασκευή πλακών και οδοστρωμάτων. Τα τελευταία 20 χρόνια η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος αυξήθηκε σημαντικά.

Σκοπός της προσθήκης των ινών στο σκυρόδεμα είναι να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα του συμβατικού σκυροδέματος, όπως η έντονη ψαθυρότητα και η σημαντικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Η προσθήκη των ινών επιφέρει κυρίως αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης, καλύτερο έλεγχο της ρηγμάτωσης και βελτιωμένη συμπεριφορά στον εφελκυσμό.

Παρά τα πλεονεκτήματα που έχουν διαφανεί από την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα δεν έχει καταστεί ακόμα δυνατή η πλήρης και συστηματική τους χρήση. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που καθιστούν δύσκολη τη θεωρητική πρόβλεψη των ιδιοτήτων του και για αυτό είναι αναγκαίες περισσότερες πειραματικές μελέτες.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς συμβατικά οπλισμένων δοκών ενισχυμένων με μανδύα μικρού πάχους από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Συνολικά δέκα έξι (16) δοκοί συμβατικά οπλισμένες και συμβατικά οπλισμένες οι οποίες ενισχύθηκαν με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υπεβλήθησαν σε δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων, σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία αποτέλεσε μέρος του ερευνητικού προγράμματος "Ανάπτυξη, Πιλοτική Παραγωγή και Δοκιμαστική Εφαρμογή Νέας Γενιάς Σύνθετων Υλικών με βάση το Τσιμέντο για τη Βελτίωση της Αντισεισμικής Συμπεριφοράς των Κατασκευών", με χρηματοδότηση της ΓΓΕΤ. Η ΑΓΕΤ-Ηρακλής διέθεσε τα απαραίτητα υλικά. Στην ΕΒΕΤΑΜ έγινε η κατασκευή και συντήρηση των δοκιμίων.

Συγκεκριμένα εξετάστηκαν:

- τρεις (3) συμβατικά οπλισμένες δοκοί (RC) σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών σημείων
- δύο (2) συμβατικά οπλισμένες δοκοί (RC) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
- μία (1) συμβατικά οπλισμένη δοκός (RC) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τριών σημείων
- δύο (2) συμβατικά οπλισμένες δοκοί ενισχυμένες με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό (CFRT_{Φ10}) σε μονοτονική φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
- δύο (2) συμβατικά οπλισμένες δοκοί ενισχυμένες με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και μεταλλικό πλέγμα (CFRT_{T131}) σε μονοτονική φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
- τρεις (3) συμβατικά οπλισμένες δοκοί ενισχυμένες με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό (CFRT_{Φ10}) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
- τρεις (3) συμβατικά οπλισμένες δοκοί ενισχυμένες με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και μεταλλικό πλέγμα (CFRT_{T131}) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων

Επιπλέον, εξήντα δύο (62) δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υπεβλήθησαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού. Με εξαίρεση δέκα (10) δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος και έντεκα (11) δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που εξετάστηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ., όλες οι υπόλοιπες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΤΚΟΣ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

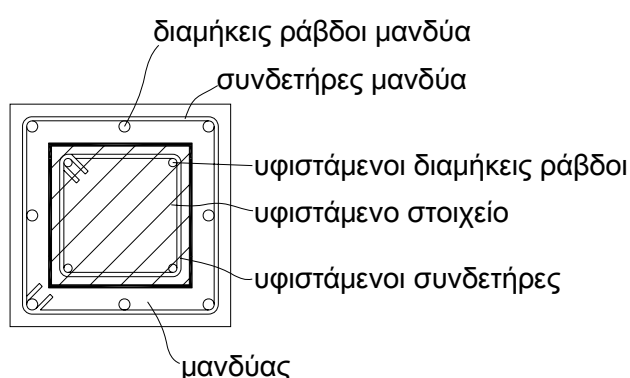
Η εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Το **Κεφάλαιο 1** είναι εισαγωγικό, ενώ στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα υλικά και ο τρόπος κατασκευής των δοκιμών. Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι πειραματικές διατάξεις των δοκιμών, τα μηχανικά και μετρητικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν και οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν. Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εκτίμηση της αντοχής σε κάμψη των υπό εξέταση δοκών με βάση αναλυτικούς υπολογισμούς. Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα, που περιλαμβάνουν τα διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου, φορτίου-βέλους κάμψης και μέγιστης ροπής-βέλους κάμψης. Στα **Κεφάλαια 6** και **7** γίνεται ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

1.1 - Μανδύες

Λόγω της έντονης σεισμικότητας του ελλαδικού χώρου αλλά και του ότι τα περισσότερα κτήρια έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980, έχει ανακύψει τα τελευταία χρόνια το θέμα των επεμβάσεων σε υφιστάμενα κτήρια στα οποία επιδιώκεται η βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς τους έναντι μελλοντικών σεισμών. Οι βασικότερες μορφές επεμβάσεων είναι η ενίσχυση και η επισκευή μιας κατασκευής. Η επισκευή επιφέρει την κατασκευή στην αρχική της μορφή (προ βλάβης), ενώ η ενίσχυση αυξάνει τη σεισμική ικανότητα του φορέα σε επίπεδα υψηλότερα από τα αρχικά.

Στην περίπτωση της ενίσχυσης υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις. Ενίσχυση των στοιχείων που έχουν υποστεί βλάβες ή συνολική ενίσχυση του κτιρίου. Η συνολική ενίσχυση επιλέγεται όταν τα στοιχεία που έχουν υποστεί βλάβες ή τα εν γένει αδύναμα στοιχεία είναι πολλά ή όταν επιδιώκεται η βελτίωση των συνολικών χαρακτηριστικών της κατασκευής. Οι μανδύες είναι μία από τις κυριότερες μεθόδους που εφαρμόζονται για την ενίσχυση ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα και κυρίως όταν πρόκειται για ενίσχυση υποστυλωμάτων. Άλλες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η κατασκευή τοιχωμάτων εντός πλαισίων, η προσθήκη δικτυωτών συστημάτων εντός πλαισίων, κατασκευή πλευρικών τοιχωμάτων σε συνέχεια υποστυλωμάτων, η ενσωμάτωση συστημάτων απορρόφησης ενέργειας κ.α.

Ο μανδύας οδηγεί σε αύξηση της διατομής του υφιστάμενου στοιχείου με προσθήκη νέων οπλισμών (Σχ. 1.1) με σκοπό την αύξηση της δυσκαμψίας, της πλαστιμότητας και της καμπτικής αντοχής. Εναλλακτική μέθοδος ενίσχυσης του υποστυλώματος είναι η περίσφιγξη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται να ενισχυθούν. Υπάρχουν δύο είδη μανδύων, οι ανοικτοί και οι κλειστοί, ανάλογα εάν καλύπτουν περιμετρικά όλη τη διατομή του στοιχείου ή τρεις μόνο πλευρές της.



Σχήμα 1.1 - Μανδύας οπλισμένου σκυροδέματος ή τσιμεντοκονιάματος.

Το σκυρόδεμα ή τσιμεντοκονίαμα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των μανδύων μπορεί να είναι είτε εκτοξευόμενο, όταν πρόκειται για πάχη μικρότερα των 100 mm οπότε και δεν απαιτείται ξυλότυπος, είτε έγχυτο όταν πρόκειται για σχετικά μεγάλα πάχη, άνω των 100

mm. Το ελάχιστο πάχος ενός μανδύα μπορεί να είναι 50 mm στην περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, 80 mm στην περίπτωση του έγχυτου σκυροδέματος και μιας στρώσης νέου οπλισμού και πάχους 120 mm στην περίπτωση του έγχυτου και δύο στρώσεων νέου οπλισμού. Εν γένει, πάχη μικρότερα από 75 mm θεωρούνται μικρά. Το σκυρόδεμα ή κονίαμα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μανδύα πρέπει να είναι τουλάχιστον μία κατηγορία αντοχής μεγαλύτερη από το υφιστάμενο.

Για την κατασκευή των μανδύων θα πρέπει να έχει γίνει απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος και επισκευή τυχόν λυγισμένων ράβδων, διάνοιξη και προετοιμασία των οπών στις θέσεις αγκύρωσης των νέων ράβδων και βλήτρων, επιμελής εκτράχυνση της επιφάνειας του υφιστάμενου σκυροδέματος με κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό και καλή διαβροχή της επιφάνειας του παλαιού σκυροδέματος προ της σκυροδέτησης του μανδύα. Επιπλέον, μετά τη σκυροδέτηση η συντήρηση του μανδύα πρέπει να είναι σχολαστική, ιδίως στην περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λόγω της αυξημένης συστολής ξήρανσης.

1.2 - Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ή τσιμεντοκονίαμα περιέχει ποσότητα διακριτών ινών, οι οποίες συνήθως διασκορπίζονται κατά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος/τσιμεντοκονιάματος σε περιεκτικότητα συνήθως έως 3% κατ' όγκο (κ.ο.). Σκοπός της χρήσης των ινών στο σκυρόδεμα είναι κυρίως ο περιορισμός της ρηγμάτωσης και η αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας. Σημαντική όμως είναι και η επιρροή τους σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως η αντοχή σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη, κρούση και κόπωση.

Οι ίνες κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα, πλαστικό (πολυπροπυλένιο), γυαλί ή ξύλο οι οποίες έχουν χαμηλό κόστος και χημική αδράνεια και συνήθως έχουν μήκος μερικών εκατοστών και διάμετρο μερικά δέκατα του χιλιοστού. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο (l_f/d_f) είναι συνήθως μεγάλος ($l_f/d_f > 50$) και το ποσοστό κ.ο. V_f στο σκυρόδεμα έως 3%. Η προσθήκη τους προκαλεί εν γένει μείωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος και γι' αυτό τιμές $l_f/d_f > 100$ πρέπει να αποφεύγονται καθώς δύναται να προκαλέσουν συσσωματώσεις και ανομοιογένεια στη μάζα του σκυροδέματος. Επιπλέον, ο μέγιστος κόκκος των αδρανών δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20 mm. Αντίθετα, ευεργετικά για την εργασιμότητα είναι η προσθήκη πρόσμικτων, η αύξηση του τσιμεντοπολτού και η χρήση ινών σε ομάδες, κολλημένων μεταξύ τους.

Οι ίνες γυαλιού (E) έχουν χαμηλό κόστος αλλά είναι ευπαθείς στα αλκάλια του σκυροδέματος. Οι ίνες γυαλιού (AR) είναι πιο ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον αλλά έχουν μεγαλύτερο κόστος. Οι ίνες από άνθρακα και αραμίδιο έχουν ιδιαίτερα ευνοϊκή συνεισφορά αλλά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω κόστους, ενώ ίνες παρασκευάζονται

και από φυσικά μέσα όπως η γιούτα και το φοινικόδεντρο. Τυπικές ιδιότητες των ινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Το σχήμα των ινών πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ανάπτυξη καλύτερης συνάφειας με το σκυρόδεμα και ως εκ τούτου μεγαλύτερη δύναμη εξόλκευσης τους.

Ο λόγος ℓ_f/d_f πρέπει να σχετικά μεγάλος ώστε η αστοχία των ινών να γίνεται από εξόλκευση και όχι από θραύση, αυξάνοντας έτσι το έργο παραμόρφωσης.

Το μέτρο ελαστικότητας τους να είναι μεγάλο ώστε να γίνεται μεταφορά των τάσεων από το σκυρόδεμα στις ίνες.

Ο λόγος Poisson πρέπει να είναι παρόμοιος με αυτόν του σκυροδέματος ώστε να μην γίνεται αποκόλληση τους.

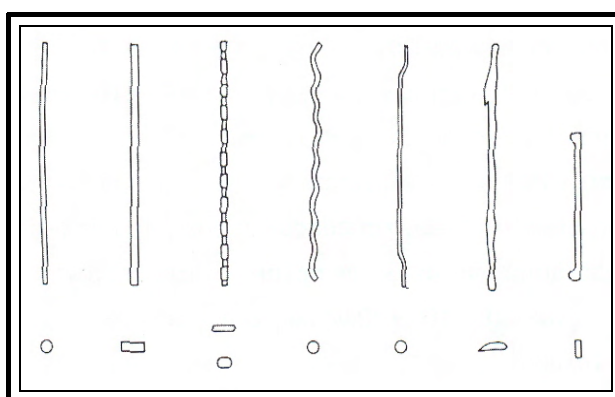
Πίνακας 1.1 - Τυπικές ιδιότητες ινών (Hannant 1978, JSCE 1993).

Ίνες	Διάμετρος, d (μm)	Μήκος, ℓ (mm)	ρ (Kg/m x10)	E (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική Αντοχή (GPa)	ε Θραύσης (%)	Τυπική V_f (% κ.ο.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7,86	200	0,28	70-200	3,5	0,5-2
Ανοξειδωτος χάλυβας	10-330	10-60	7,86	160	0,28	210	3	0,5-2
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0,90	3-8	0,30-0,45	40-70	8-25	0,2-1,2
Γυαλί (E)	8-12	10-50	2,54	72-75	0,25	350	4,8	2-8
Γυαλί (AR)	8-12	10-50	2,27	70-76	0,25	200-350	3-4,6	2-8
Κέβλαρ 29	12	5-65	1,44	70	0,32	290	4	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1,45	135	0,32	290	2,1	0,5-2
Άνθρακας								
-Υψηλού E	8	10-50	1,90	380	0,35	180	0,5	2-12
-Υψηλής f_t	9	10-50	1,90	230	0,35	260	1,2	2-12
Νάυλον	5-200	5-50	1,14	1-5	0,40	75-90	16-20	0,1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1,50	50-75	0,20-0,40	70-100	1-2	2-4

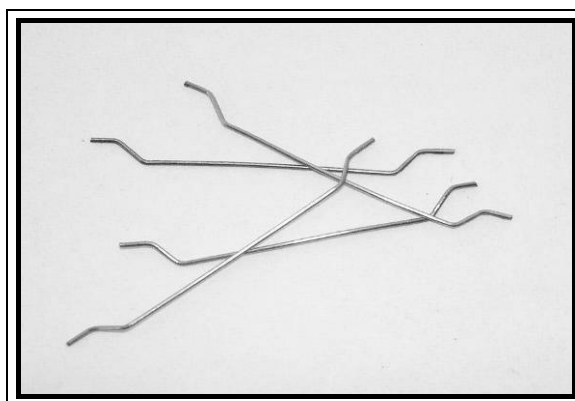
1.2.1 - Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα (SFRC)

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα (Steel Fiber Reinforced Concrete - SFRC) περιέχει συγκεκριμένη ποσότητα διακριτών ινών χάλυβα. Το μήκος τους κυμαίνεται μεταξύ 6 και 76 mm, η διάμετρος τους μεταξύ 0,25 και 1,0 mm και ο λόγος l_f/d_f μεταξύ 20 και 100. Το ογκομετρικό ποσοστό τους V_f συνήθως δεν ξεπερνά το 1,5-2,0%. Το όριο διαρροής τους πρέπει να είναι τουλάχιστον 1034 MPa (ACI 440, 1996).

Για να μην προκαλούνται συσσωματώσεις των ινών ο λόγος l_f/d_f δεν πρέπει να ξεπερνά το 100 και το ποσοστό τους στο σκυρόδεμα το 2% κ.ο. Η μορφή τους ποικίλει (Σχ. 1.2,1.3) και γενικά ίνες χάλυβα με διαμορφωμένη γεωμετρία ή άκρα είναι αποδοτικότερες από τις ευθύγραμμες.



Σχήμα 1.2 - Τυπικές μορφές ινών χάλυβα.



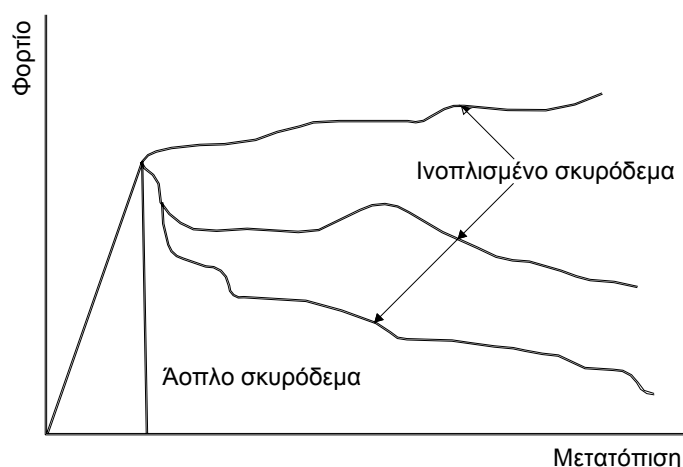
Σχήμα 1.3 - Ίνες χάλυβα με κεκαμμένα άκρα (hooked-end).

1.2.2 - Ιδιότητες και συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα

Στο συμβατικό σκυρόδεμα σχεδόν αμέσως μετά την πρώτη ρωγμή επέρχεται και η αστοχία του, με μικρή παραμόρφωση. Αντίθετα, στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μετά την πρώτη ρηγμάτωση το φορτίο μεταφέρεται από τις ίνες που γεφυρώνουν το κενό μεταξύ των

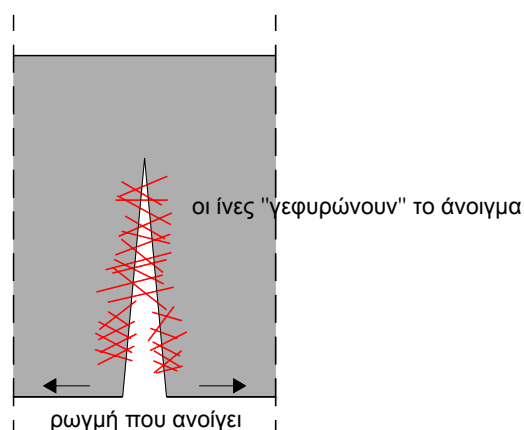
επιφανειών ρηγμάτωσης. Αν το φορτίο της πρώτης ρηγμάτωσης είναι μικρότερο από εκείνο της εξόλκευσης των ινών ή της εφελκυστικής αστοχίας τους, τότε γίνεται μεταφορά φορτίου από τις ίνες προς το γειτονικό σκυρόδεμα. Εφ' όσον οι τάσεις συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος δεν ξεπερνούν την αντοχή της συνάφειας των δύο υλικών και οι εφελκυστικές τάσεις στις ίνες δεν ξεπερνούν την αντοχή τους, το σκυρόδεμα δύναται να ρηγματωθεί και πάλι. Πρόκειται ουσιαστικά για μια κατάσταση πολλαπλής ρηγμάτωσης που συμβαίνει έως ότου οι ίνες ολισθήσουν ή αστοχήσουν σε εφελκυσμό.

Η αύξηση στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και παραμόρφωσης είναι σημαντική. Το εμβαδόν που εμπεριέχεται στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (σ - ϵ) μπορεί να είναι από 10 έως 40 φορές μεγαλύτερο από αυτό στην περίπτωση του άοπλου σκυροδέματος (Σχ. 1.4). Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα η αστοχία επέρχεται μετά από πολλαπλή ρηγμάτωση και σαφώς μεγαλύτερες παραμορφώσεις συγκριτικά με το άοπλο.



Σχήμα 1.4 - Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε θλίψη.

Όσον αφορά τον έλεγχο της ρηγμάτωσης, οι ίνες τείνουν να κλείσουν τις ρωγμές που δημιουργούνται με την αύξηση του φορτίου (Σχ. 1.5). Εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών και τη διάδοσή τους σε όλο στάδιο της φόρτισης. Επιπλέον, αποτρέπουν τη δημιουργία μικρο-ρωγμών προστατεύοντας έτσι καλύτερα το σκυρόδεμα και τον οπλισμό από το εξωτερικό περιβάλλον.

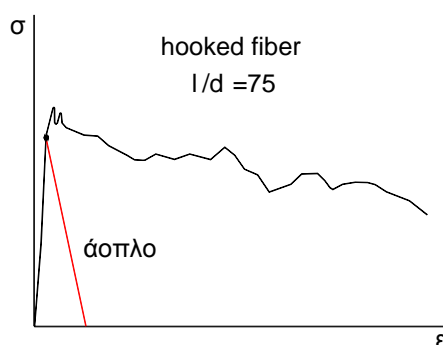


Σχήμα 1.5 - Περιοχή ρηγμάτωσης σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα (SFRC).

Στις ινοπλισμένες δοκούς με τα συνήθη ποσοστά ινών ($V_f \leq 1,5\%$), τις συνήθεις διαστάσεις και τα συνήθη υλικά παρασκευής των (χάλυβας και πολυπροπυλένιο), δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τον διαμήκη οπλισμό, αφού το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν διαθέτει εφελκυστική αντοχή εφάμιλλη με αυτόν. Η συμπεριφορά τους όμως σε διάτμηση είναι σημαντικά βελτιωμένη και η αντικατάσταση όλου ή μέρους του εγκάρσιου οπλισμού δείχνει να είναι ικανή και πιθανή. Ταυτόχρονα εξοικονομείται χρόνος από την τοποθέτηση των συνδετήρων και παρέχεται μεγαλύτερη ευκολία στη σκυροδέτηση η οποία δυσχεραίνεται αρκετά από την παρουσία πυκνών συνδετήρων.

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι σχετικά μικρή (Σχ. 1.7), φτάνοντας το πολύ ως το 15-20% σε σχέση με αυτή του άοπλου.

Αντίθετα, η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής είναι σημαντική (Σχ. 1.6). Για ποσοστά ινών $V_f = 1,5\%$ η αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό είναι της τάξης του 30-40%.



Σχήμα 1.6 - Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα σε εφελκυσμό.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει έως και 4 φορές υψηλότερη αντοχή σε κρούση και 30-90% υψηλότερη αντοχή σε κόπωση σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα λόγω αυξημένης δυσθραυστότητας.

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στο ινοπλισμένο μίγμα προτιμάται να είναι υψηλής αντοχής (High Strength Reinforced Concrete-HSRC) για την ανάπτυξη καλύτερης συνάφειας ινών-σκυροδέματος.

Το μέτρο ελαστικότητας E_c μπορεί να εκτιμηθεί από τον συνδυασμό των τύπων του άνω και κάτω ορίου, $E_c = (3/8) \cdot E_{cL} + (5/8) \cdot E_{cT}$, όπου το E_{cL} είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού θεωρώντας ότι οι ίνες του μίγματος έχουν τη διεύθυνση της φόρτισης και E_{cT} το μέτρο ελαστικότητας του υλικού θεωρώντας ότι οι ίνες του μίγματος έχουν τη διεύθυνση που το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται. Για ποσοστά $V_f < 2\%$ μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ίδιο με αυτό του συμβατικού σκυροδέματος.

Η συστολή ξήρανσης και ο ερπυσμός παραμένουν στα ίδια επίπεδα με του άοπλου σκυροδέματος, αλλά με βελτιωμένο τον έλεγχο της ρηγμάτωσης που προκαλείται από αυτά τα δύο φαινόμενα.

Η αντοχή σε κόπωση λόγω κάμψης αυξάνεται σημαντικά. Για 2 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης έχει παρατηρηθεί 80-90% αύξηση σε μονοτονική φόρτιση και 70% σε ανακυκλιζόμενη.

Η διάβρωση των ινών είναι αμελητέα λόγω της μικρής διαμέτρου τους και συνεπώς λόγω των μικρότερων τάσεων διόγκωσης που προκαλούν τα οξείδια του σιδήρου. Επιπλέον, λόγω της διασποράς τους και του μικρού μεγέθους τους ακόμα και αν κάποιες υποστούν διάβρωση είναι πολύ δύσκολο να μεταδοθεί στις υπόλοιπες ίνες.

Εν γένει, η μορφή αστοχίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα εξαρτώνται κυρίως από το ογκομετρικό ποσοστό τους V_f , το σχήμα τους, το μέγεθος τους, τον λόγο l_f/d_f , τον προσανατολισμό τους στο στοιχείο και την αντοχή του σκυροδέματος.

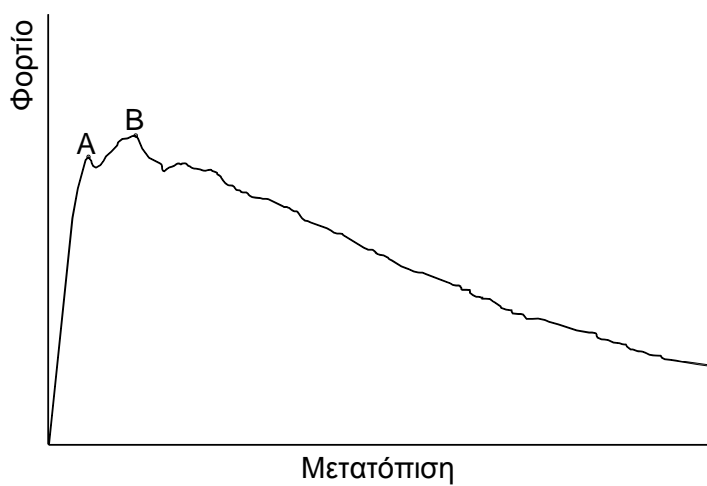
1.2.3 - Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα σε κάμψη

Η τυπική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη παρουσιάζει έναν ελαστικό κλάδο, στον οποίο γίνεται μεταφορά τάσεων από το μίγμα στις ίνες και αντίστροφα μέσω διάτμησης, ως το σημείο A που γίνεται η αρχική ρηγμάτωση.

Σταδιακά οι τάσεις μεταφέρονται στις ίνες και όσο αυξάνει το φορτίο τείνουν να εξολκευτούν οδηγώντας σε μη γραμμική συμπεριφορά και μικρή άνοδο ως το σημείο της μέγιστης αντοχής B.

Κατόπιν, και για μετατοπίσεις μεγαλύτερες εκείνης που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή παρουσιάζονται μικρές επαναλαμβανόμενες αυξήσεις της αντοχής αλλά για μικρότερο μέγιστο φορτίο (Σχ. 1.7). Η συνεχής επιμήκυνση των ρωγμών προς την θλιβόμενη ζώνη σε

καμπτόμενα στοιχεία επιφέρει συνεχή ενεργοποίηση και εξόλκευση νέων ινών, που οδηγούν σε σταδιακή πτώση της αντοχής. Συνήθως οι ίνες χάλυβα αστοχούν λόγω εξόλκευσης και όχι λόγω θραύσης, καθώς η τάση τους υπό το μέγιστο φορτίο είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από την τάση διαρροής τους. Η συμπεριφορά αυτή συνήθως αποτιμάται από την ενέργεια που απορροφά το στοιχείο και αντιστοιχεί στο εμβαδόν που περικλείεται από το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή της μετατόπισης. Είναι φανερή η αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε κάμψη του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το συμβατικό (Σχ. 1.7).



Σχήμα 1.7 - Τυπικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για ινοπλισμένο σκυροδέμα με ίνες χάλυβα σε κάμψη.

Αύξηση υπάρχει όχι τόσο στο φορτίο της αρχικής ρηγμάτωσης αλλά στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα. Μίγμα με ογκομετρικό ποσοστό ινών χάλυβα $V_f=2\%$ μπορεί να επιφέρει αύξηση έως και 55% της αντοχής σε κάμψη. Για ποσοστά $V_f<0,5\%$ και λόγους $l_f/d_f < 50$ η αύξηση της αντοχής είναι αμελητέα. Οι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν την αντοχή σε κάμψη είναι ο τύπος των ινών, το μήκος l_f , ο λόγος l_f/d_f , το ογκομετρικό ποσοστό V_f , ο προσανατολισμός τους, η μορφή τους και η αντοχή τους. Οι ίνες με κεκαμμένα άκρα (hooked-end) δείχνουν να είναι αποτελεσματικότερες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 - Κωδικός δοκιμών

Η χαρακτηριστική ονομασία των δοκών έγινε με βάση τις εξής παραμέτρους:

1. το υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν
2. τον οπλισμό τους
3. τη σειρά με την οποία εξετάστηκαν (ο αύξων αριθμός της δοκού)
4. τον τύπο της δοκιμής στην οποία υπεβλήθησαν

Με RC (Reinforced Concrete) σημάνθηκαν οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό και με CFRT (Concrete Fiber Reinforced Tube) οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί που ενισχύθηκαν με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό ή μεταλλικό πλέγμα.

Μετά ακολούθησε ο αύξων αριθμός με βάση τη σειρά δοκιμής της σε κάμψη. Υπάρχουν έξι (6) δοκίμια συμβατικά οπλισμένων δοκών και δέκα (10) δοκίμια ενισχυμένων δοκών με μανδύα. Συνεπώς ο αύξων αριθμός κυμάνθηκε από 1 ως 6 και από 1 ως 10, αντίστοιχα.

Επιπλέον, με S (static monotonic) χαρακτηρίστηκαν οι δοκοί που υποβλήθηκαν σε στατική μονοτονική φόρτιση και με C (static cyclic) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι δοκοί που δοκιμάστηκαν σε κάμψη 4-σημείων έφεραν την ένδειξη -4B στο τέλος.

Για παράδειγμα, η δοκός RC-3S αναφέρεται σε συμβατικά οπλισμένη δοκό που εξετάστηκε τρίτη κατά σειρά από την ομάδα που ανήκει, σε μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών σημείων. Η ονομασία RC-6C-4B αναφέρεται σε συμβατικά οπλισμένη δοκό που δοκιμάστηκε έκτη κατά σειρά από την ομάδα που ανήκει, σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων. Η CFRT-8C-4B αναφέρεται σε συμβατικά οπλισμένη δοκό ενισχυμένη με ινοπλισμένο μανδύα, η όγδοη κατά σειρά που εξετάστηκε από την ομάδα που ανήκει, η οποία υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων.

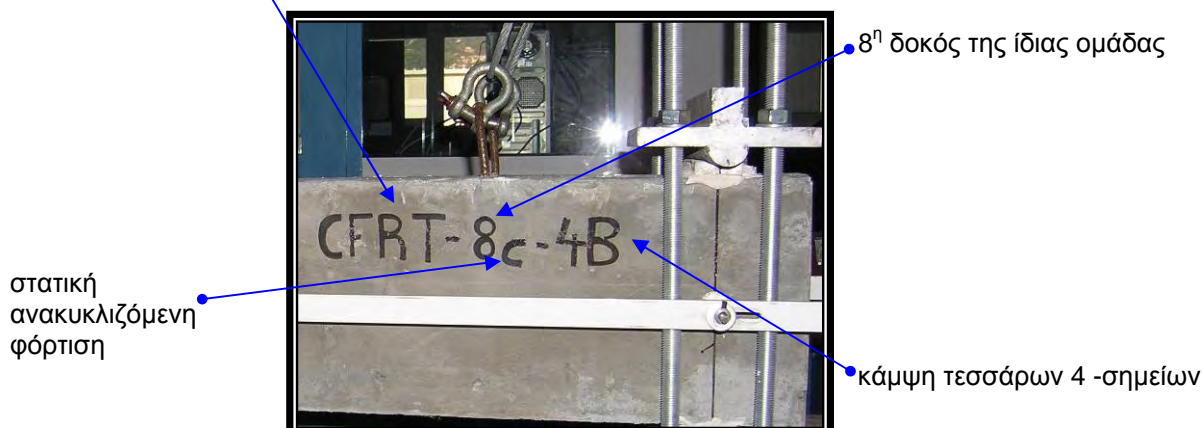
συμβατικά οπλισμένη δοκός



η τρίτη που εξετάστηκε από την ομάδα δοκών που ανήκει

σε μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών (3) σημείων

συμβατικά οπλισμένη δοκός
ενισχυμένη με ινοπλισμένο μανδύα



Σχήμα 2.1 - Παραδείγματα σήμανσης δοκών.

Πίνακας 2.1 - Χαρακτηριστικοί συμβολισμοί των δοκών.

RC	Reinforced Concrete	συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα
CFRT	Concrete Fiber Reinforced Tube	συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και οπλισμό
S	Static Monotonic	στατική μονοτονική φόρτιση
C	Static Cyclic	στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση
4B	4-point bending	κάμψη 4-σημείων

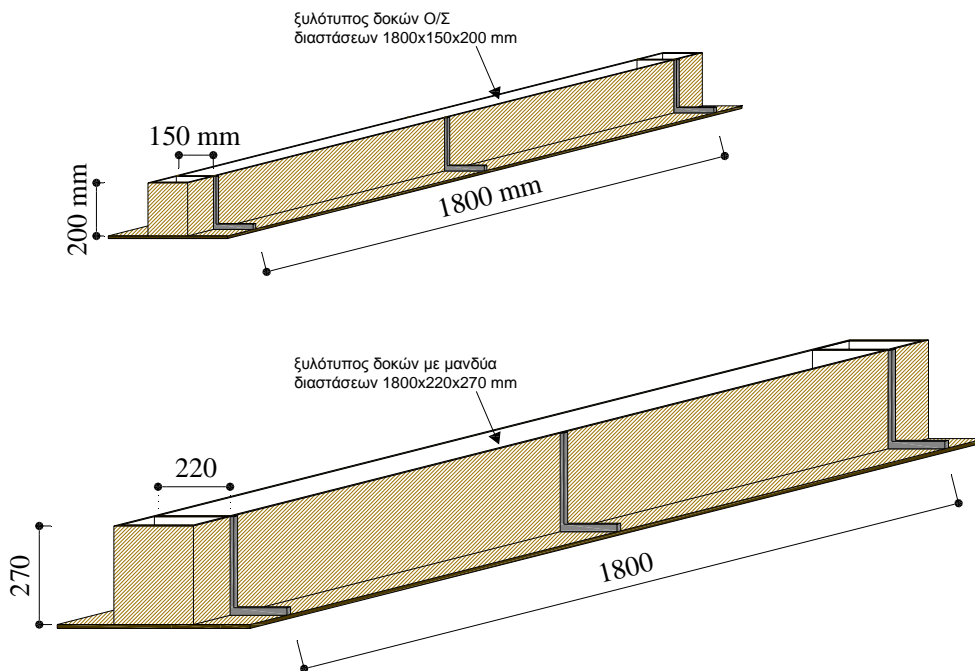
2.2 - Κατασκευή δοκιμών

2.2.1 - Κατασκευή δοκών

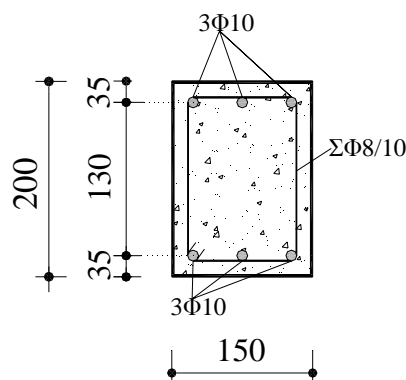
Κατασκευάστηκαν συνολικά δέκα έξι (16) δοκίμια συμβατικά οπλισμένων (RC) δοκών με διαμήκη οπλισμό 3Φ10 πάνω/κάτω. Σε δώδεκα (12) δοκούς τοποθετήθηκαν συνδετήρες ΣΦ8/10, ενώ σε τέσσερις (4) δεν τοποθετήθηκε οπλισμός διάτμησης (Σχ. 2.4). Για τη σκυροδέτηση τους χρησιμοποιήθηκαν προκατασκευασμένοι ξυλότυποι διαστάσεων 1800x150x200 mm (μήκος x πλάτος x ύψος) (Σχ. 2.3).

Δέκα (10) από τις παραπάνω δοκούς ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα (CFRT), μεταξύ των οποίων ήταν και οι τέσσερις (4) δοκοί χωρίς εγκάρσιο οπλισμό. Πρώτα κατασκευάστηκαν οι αρχικές δοκοί (πυρήνες). Μετά από 28 ημέρες συντήρησης τοποθετήθηκαν σε νέους ξυλότυπους διαστάσεων 1800x220x270 mm μαζί με τους οπλισμούς

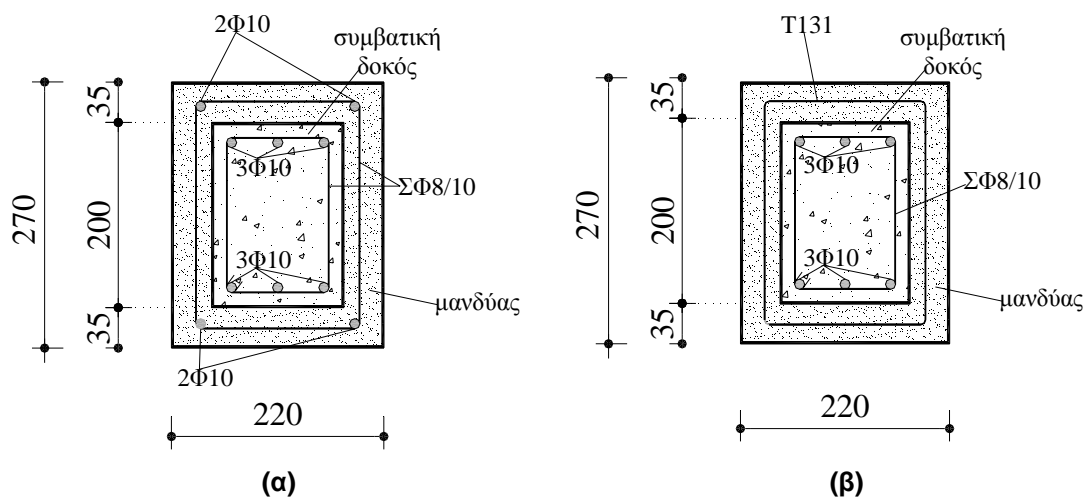
ενίσχυσης και σκυροδετήθηκε ο μανδύας. Η ενίσχυση των δοκών αφορούσε διαμήκη οπλισμό 2Φ10 πάνω/κάτω και συνδετήρες ΣΦ8/10 ή μεταλλικό πλέγμα T131 και ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα πάχους 3,5 cm περιμετρικά του πυρήνα και περιεκτικότητας σε μεταλλικές ίνες 0,8% κ.ο. (Σχ. 2.5). Το μεταλλικό πλέγμα T131 αποτελείται από ράβδους Φ5 ανά 15 cm κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση. Δεν έγινε εκτράχυνση της εξωτερικής επιφάνειας της αρχικής δοκού, αλλά καθαρισμός και διαβροχή της πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα.



Σχήμα 2.3 - Ξυλότυπος δοκών-πυρήνων διαστάσεων 1800x150x200 mm και δοκών με μανδύα διαστάσεων 1800x220x270 mm.



Σχήμα 2.4 - Διατομή των συμβατικά οπλισμένων δοκών (διαστάσεις σε mm).



Σχήμα 2.5 - Διατομή: (α) συμβατικά οπλισμένων δοκών ενισχυμένων με ινοπλισμένο μανδύα (με διαμήκη 4Φ10 και εγκάρσιο ΣΦ8/10 οπλισμό) και (β) συμβατικά οπλισμένων δοκών ενισχυμένων με ινοπλισμένο μανδύα (με μεταλλικό πλέγμα T131) (διαστάσεις σε mm).



Σχήμα 2.6 - Συμβατικά οπλισμένες δοκοί.



Σχήμα 2.7 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός με πλέγμα T131 στον ξυλότυπο λίγο πριν τη σκυροδέτηση του ινοπλισμένου μανδύα.

Η σκυροδέτηση των συμβατικά οπλισμένων δοκών έγινε στις 10 Μαΐου 2006, των συμβατικά οπλισμένων με εγκάρσιο οπλισμό που ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα στις 30 Μαρτίου 2007 και των συμβατικά οπλισμένων χωρίς εγκάρσιο οπλισμό που ενισχύθηκαν με μανδύα στις 14 Μαΐου 2007. Η σκυροδέτηση των μανδυών έγινε τμηματικά από τις 30 Απριλίου ως τις 26 Μαΐου 2007 (Πίν. 2.3). Όλες οι δοκοί σκυροδετήθηκαν και συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντήρησης στις εγκαταστάσεις της EBETAM (Σχ. 2.8).

Πίνακας 2.3 - Ημερομηνίες σκυροδέτησης των δοκών.

Δοκίμια δοκών	Ημερομηνία σκυροδέτησης
Συμβατικά οπλισμένες δοκοί (RC)	10/5/2006
Συμβατικά οπλισμένες δοκοί (RC)	30/3/2007
Συμβατικά οπλισμένες δοκοί ενισχυμένες με με οπλισμό και ινοπλισμένο μανδύα (CFRT)	30/4/2007 έως 26/5/2007



Σχήμα 2.8 - Ο θάλαμος συντήρησης των δοκών και δοκιμών σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

2.2.2 - Κατασκευή δοκιμών σκυροδέματος

Από τις σκυροδετήσεις των δοκών ελήφθησαν κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 15,24x30,48 cm (διάμετρος x ύψος) και κυβικά διαστάσεων 15x15x15 cm για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος και του ινοπλισμένου κονιάματος (Σχ. 2.9, 2.10). Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στον ίδιο θάλαμο συντήρησης της EBETAM μαζί με τις αντίστοιχες δοκούς .

Από το συμβατικό σκυροδέμα ελήφθησαν δέκα (10) κυβικά και δέκα (10) κυλινδρικά δοκίμια και από το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα είκοσι έξι (26) κυβικά και δεκαέξι (16) κυλινδρικά δοκίμια. Η λήψη των δοκιμών έγινε παράλληλα με τη σκυροδέτηση και σύμφωνα με τις διατάξεις του Ελληνικού Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ. '97). Η έγχυση του συμβατικού σκυροδέματος και του ινοπλισμένου κονιάματος στις κυλινδρικές και κυβικές μήτρες έγινε σε δύο και τρεις στρώσεις αντίστοιχα, με την κάθε στρώση να συμπύκνωνεται κάθε φορά 25 φορές με επαναλαμβανόμενη έμπυση μεταλλικής ράβδου διαμέτρου Φ16 μήκους 60 cm. Μετά την πλήρωση των καλουπιών η άνω επιφάνεια τους εξωμαλύνθηκε κατάλληλα.



Σχήμα 2.9 - Κυβικά δοκίμια σκυροδέματος.



Σχήμα 2.10 - Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος.

2.3 - Υλικά

2.3.1 - Χάλυβας οπλισμού

Ο διαμήκης οπλισμός, ο εγκάρσιος οπλισμός και το μεταλλικό πλέγμα T131 που χρησιμοποιήθηκαν για την όπλιση των δοκών ήταν χάλυβας ποιότητας S500 (βλέπε Πίν. 2.4, 2.5, 2.6). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού σε έξι (6) δοκίμια ράβδων οπλισμού, τρία (3) για τα Φ10 και τρία (3) για τα Φ8. Η μέση τιμή της τάσης διαρροής για τις Φ10 και Φ8 είναι 550 και 526 MPa, αντίστοιχα (Σχ. 2.11, 2.12).

Πίνακας 2.4 - Χαρακτηριστικά χάλυβα διαμήκους οπλισμού.

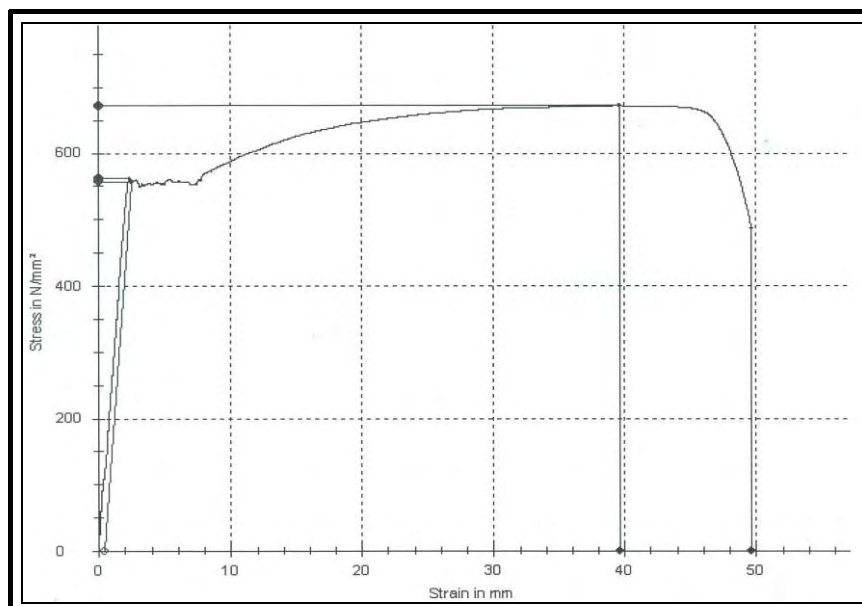
Διάμετρος, \varnothing (mm)	10
Εμβαδόν διατομής, A (cm ²)	0,785
Ονομαστική τάση διαρροής, f_{yk} (MPa)	500
Πραγματική τάση διαρροής, f_y (MPa)	550

Πίνακας 2.5 - Χαρακτηριστικά χάλυβα εγκάρσιου οπλισμού.

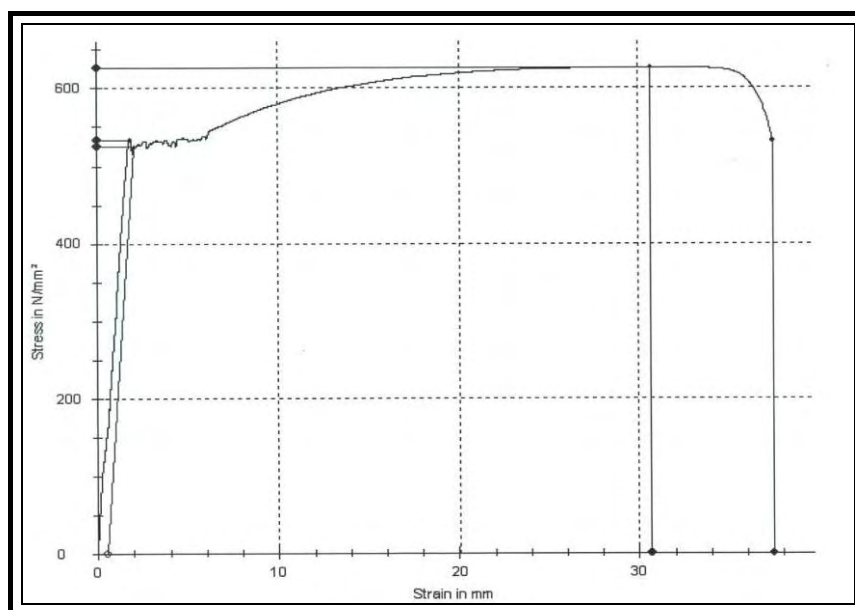
Διάμετρος, \varnothing (mm)	8
Εμβαδόν διατομής, A (cm ²)	0,50
Ονομαστική τάση διαρροής, f_{yk} (MPa)	500
Πραγματική τάση διαρροής, f_y (MPa)	526

Πίνακας 2.6 - Χαρακτηριστικά χάλυβα μεταλλικού πλέγματος T131.

Διάμετρος, \varnothing (mm)	5
Εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού πλέγματος, A_h (cm ²)	0,196
Εμβαδόν διατομής εγκάρσιου οπλισμού πλέγματος, A_v (cm ²)	0,196
Ονομαστική τάση διαρροής, f_{yk} (MPa)	500



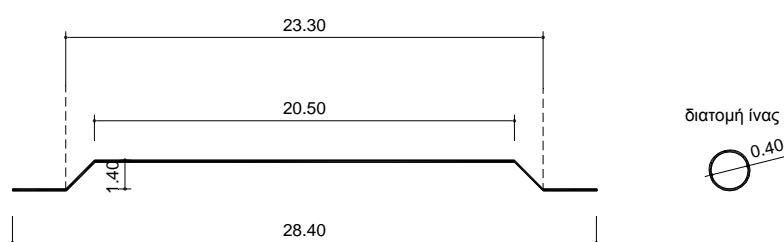
Σχήμα 2.11 - Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ράβδου Φ10 σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού.



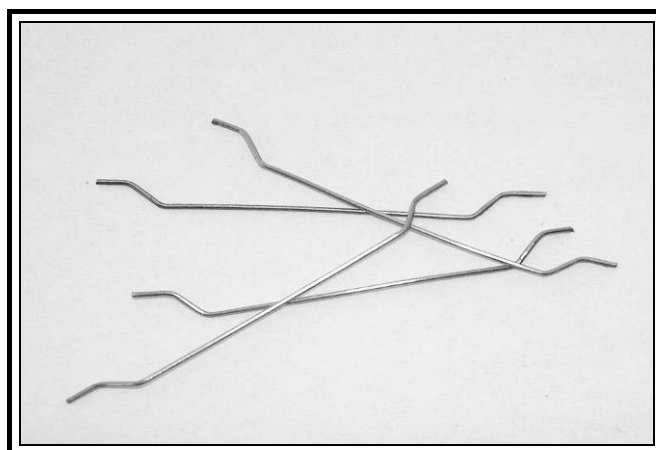
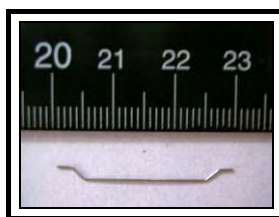
Σχήμα 2.12 - Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης ράβδου Φ8 σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού.

2.3.2 - Ίνες

Ο ινοπλισμένος μανδύας περιέχει λείες ίνες χάλυβα, κυκλικής διατομής, με κεκαμμένα άκρα (hooked end) (Σχ. 2.13, 2.14, 2.15) σε ποσότητα 63,1 gr/lt και ογκομετρικό ποσοστό $V_f = 0,8\%$. Οι ονομαστικές τιμές του μήκους των ινών ήταν 28,4 mm, της διαμέτρου τους 0,4 mm και ο λόγος μήκους προς διάμετρο $l/d = 71$. Η εφελκυστική τάση αντοχής είναι μεγαλύτερη των 1400 MPa.



Σχήμα 2.13 - Μορφή και διαστάσεις (mm) της ίνας που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 2.14 - Ίνες που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.

2.3.3 – Σκυρόδεμα και ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα

Για τη σκυροδέτηση όλων των συμβατικά οπλισμένων δοκών (RC) χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα ονομαστικής ποιότητας C20/25 από την εταιρία Lafarge. Κατά την σκυροδέτηση ελήφθησαν δέκα (10) κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15,24 cm και ύψους 30,48 cm και δέκα (10) κυβικά διαστάσεων 15x15x15 cm. Τα δοκίμια σκυροδέματος συντηρήθηκαν στις ίδιες συνθήκες με τα δοκίμια των δοκών σε θάλαμο συντήρησης.

Για την κατασκευή των ινοπλισμένων μανδύων (FRCT) χρησιμοποιήθηκε ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα επί τύπου παρασκευής από την εταιρία Lafarge. Για 75 λίτρα μίγματος αναμίχθηκαν 162 kg τσιμεντοκονιάματος, 18,375 kg νερού και 0,3 kg ρευστοποιητή. Ελήφθησαν δέκαέξι (16) κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15,24 cm και ύψους 30,48 cm και είκοσι έξι (26) κυβικά διαστάσεων 15x15x15 cm. Τα δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος συντηρήθηκαν στις ίδιες συνθήκες με τα δοκίμια των ινοπλισμένων δοκών στο θάλαμο συντήρησης.

Από τα δοκίμια του συμβατικού σκυροδέματος, πέντε (5) κυβικά και πέντε (5) κυλινδρικά και έξι (6) κυβικά και πέντε (5) κυλινδρικά από τα δοκίμια του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εξετάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη στις εγκαταστάσεις του Ε.Κ.Ε.Τ. (Πίν. 2.7, 2.8).

Ο έλεγχος των υπολοίπων δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Πίνακας 2.7 - Θλιπτική αντοχή συμβατικού σκυροδέματος από τις δοκιμές στο Ε.Κ.Ε.Τ.

α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Θλιπτική αντοχή, f_c (MPa)	Μέση θλιπτική αντοχή, f_{cm} (MPa)
1	Κυβικό RC-1	180	30,30	
2	Κυβικό RC-2	180	31,20	
3	Κυβικό RC-3	180	31,40	31,02
4	Κυβικό RC-4	180	32,30	
5	Κυβικό RC-5	180	29,90	

1	Κυλινδρικό RC-1	180	27,70	
2	Κυλινδρικό RC-2	180	27,70	
3	Κυλινδρικό RC-3	180	28,20	28,12
4	Κυλινδρικό RC-4	180	28,90	
5	Κυλινδρικό RC-5	180	28,10	

Πίνακας 2.8 - Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος από τις δοκιμές στο Ε.Κ.Ε.Τ.

α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Θλιπτική αντοχή, f_{rc} (MPa)	Μέση θλιπτική αντοχή, f_{rcm} (MPa)
1	Κυβικό FRC-1	180	80,0	
2	Κυβικό FRC-2	180	76,3	
3	Κυβικό FRC-3	180	78,0	78,15
4	Κυβικό FRC-4	180	80,4	
5	Κυβικό FRC-5	180	76,2	
6	Κυβικό FRC-6	180	78,0	

1	Κυλινδρικό FRC-1	180	65,1	
2	Κυλινδρικό FRC-2	180	78,6	
3	Κυλινδρικό FRC-3	180	70,3	
4	Κυλινδρικό FRC-4	180	72,9	
5	Κυλινδρικό FRC-5	180	78,8	73,14

Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς σε Κάμψη Συμβατικά Οπλισμένων Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος

Πίνακας 2.9 - Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος.

α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Θλιπτική αντοχή, f_c (MPa)	Μέση θλιπτική αντοχή, f_{cm} (MPa)
1	RC-1	209	32,99	33,14
2	RC-2	209	32,80	
3	RC-3	209	31,96	
4	RC-4	209	34,33	
5	RC-5	209	33,60	

Πίνακας 2.10 - Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

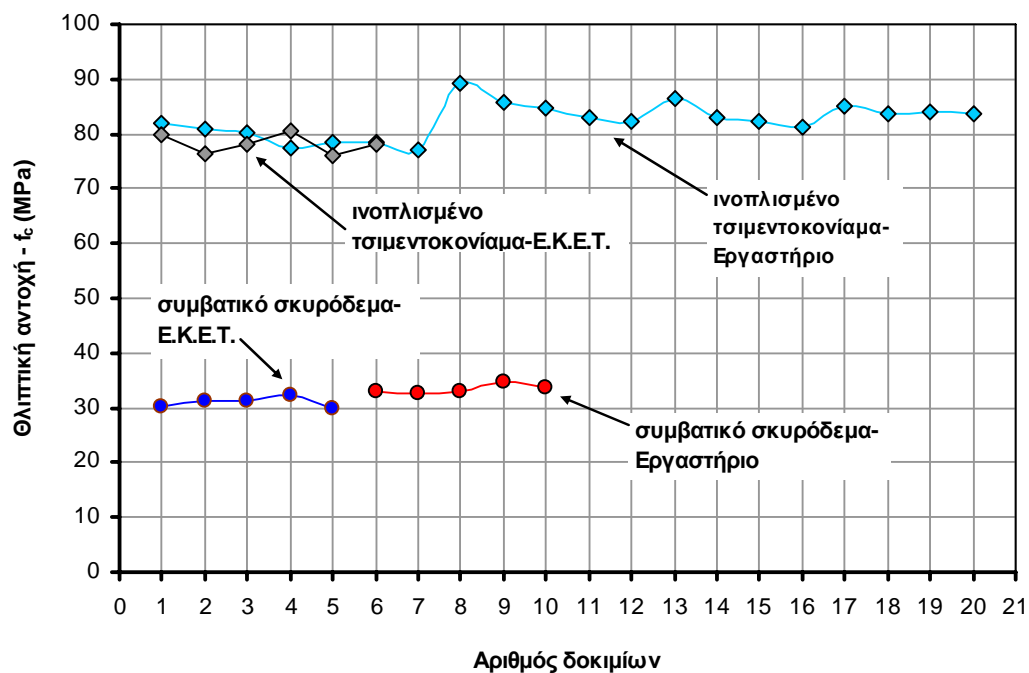
α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Θλιπτική αντοχή, f_{rc} (MPa)	Μέση θλιπτική αντοχή, f_{rcm} (MPa)
1	CFRT-1.1f	50	82,08	82,45
2	CFRT-1.2f	50	81,00	
3	CFRT-1.3f	50	80,08	
4	CFRT-1.1c	46	77,40	
5	CFRT-1.2c	46	78,37	
6	CFRT-1.3c	46	78,62	
7	CFRT-1.4c	46	77,04	
8	CFRT-1.1d	46	84,88	
9	CFRT-1.2d	46	83,08	
10	CFRT-1.3d	46	82,13	
11	CFRT-1.1e	47	86,36	
12	CFRT-1.2e	47	83,00	
13	CFRT-1.3e	47	82,13	
14	CFRT-1.4e	47	81,32	
15	CFRT-1.1a	65	85,22	
16	CFRT-1.2a	65	83,62	
17	CFRT-1.1b	63	84,03	
18	CFRT-1.2b	63	83,51	
19	CFRT-2.1e	55	89,22	
20	CFRT-2.2e	55	85,88	

Πίνακας 2.11 - Έμμεση εφελκυστική αντοχή (splitting) συμβατικού σκυροδέματος.

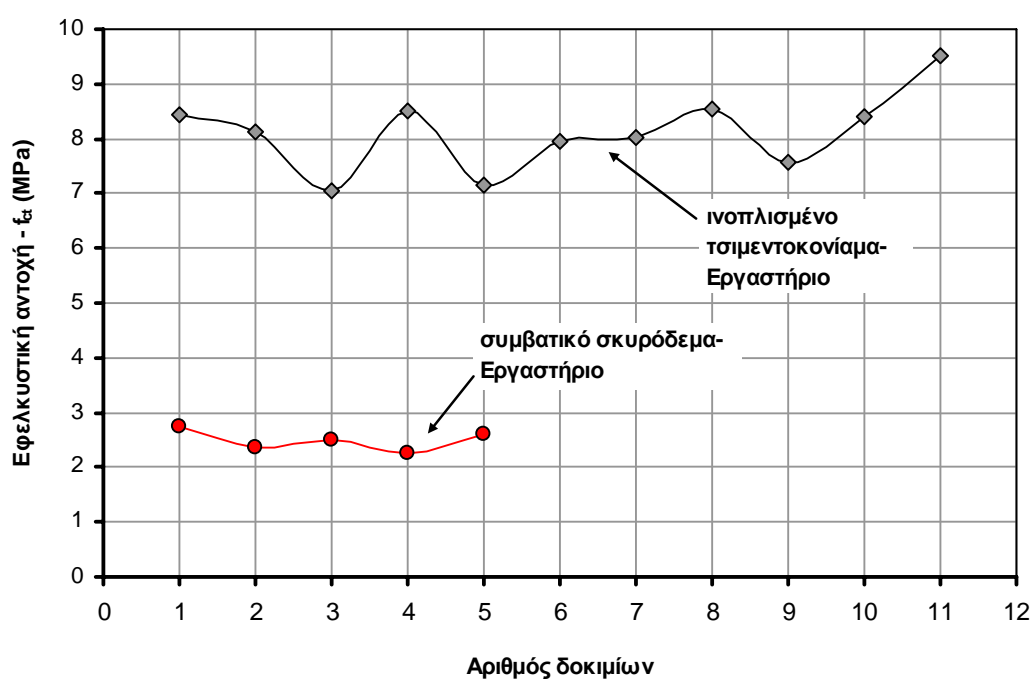
α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Εφελκυστική αντοχή, f_{ct} (MPa)	Μέση αντοχή, f_{ctm} (MPa)
1	RC-1t	217	2,75	2,50
2	RC-2t	217	2,36	
3	RC-3t	217	2,50	
4	RC-4t	217	2,27	
5	RC-5t	217	2,62	

Πίνακας 2.12 - Έμμεση εφελκυστική αντοχή (splitting) ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

α/α	Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίου (ημέρες)	Εφελκυστική αντοχή, f_{rct} (MPa)	Μέση εφελκυστική αντοχή, f_{rctm} (MPa)
1	FRC-2.1t	126	7,95	8,11
2	FRC-2.2t	126	8,02	
3	FRC-2.3t	126	8,53	
4	FRC-2.4t	126	7,56	
5	FRC-3.1t	122	8,39	
6	FRC-2.1t	122	9,51	
7	FRC-1t	176	8,43	
8	FRC-2t	176	8,12	
9	FRC-3t	176	7,05	
10	FRC-4t	176	8,51	
11	FRC-5t	176	7,14	



Σχήμα 2.16 - Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.



Σχήμα 2.17 - Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Για την δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης των κυβικών δοκιμών χρειάστηκε ο καλός καθαρισμός δύο απέναντι λείων επιφανειών που θα έρχονταν σε επαφή με τη μηχανή θλίψης και κατόπιν η σωστή τοποθέτηση τους σε αυτή (Σχ. 2.18). Η διάρκεια της κάθε δοκιμής ήταν τουλάχιστον 30 sec. σύμφωνα με τον κανονισμό.

Οι δοκιμές του έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian Splitting Test) πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C496/C496M-04. Στα κυλινδρικά δοκίμια τοποθετήθηκαν δύο κομμάτια ξύλου κόντρα πλακέ πάχους 3,2 mm και πλάτους 25 mm κατά μήκος δύο απέναντι γενέτειρων του δοκιμίου (Σχ. 2.19) για την ομοιόμορφη κατανομή του θλιπτικού φορτίου..

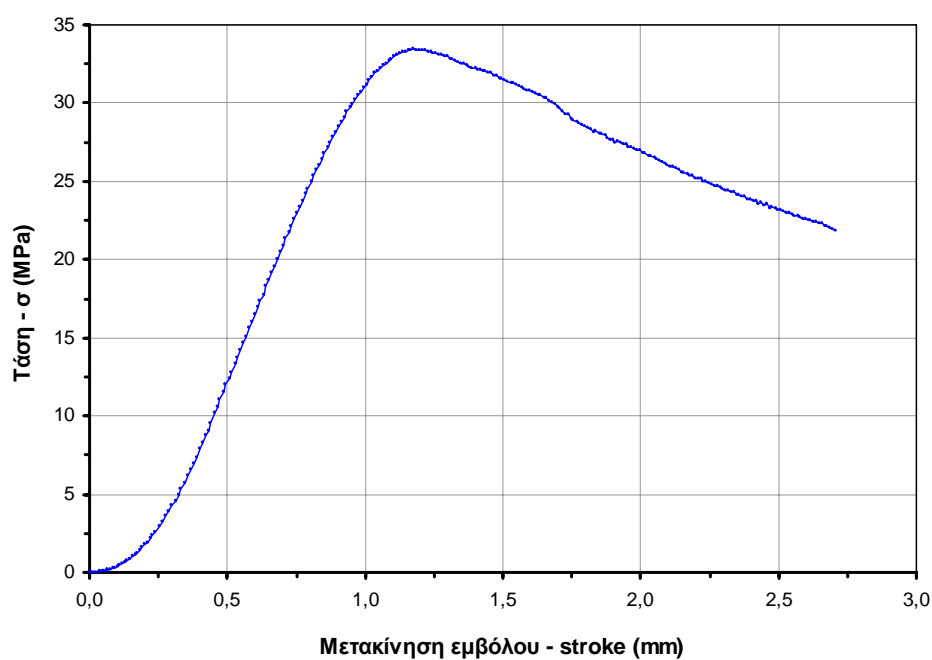
Στα Σχ. 2.18 έως 2.30 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσεων-μετακινήσεων εμβόλου και χαρακτηριστικές εικόνες από τις δοκιμές των δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος και ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε μονοαξονική θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη).



Σχήμα 2.18 - Κυβικό δοκίμιο για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



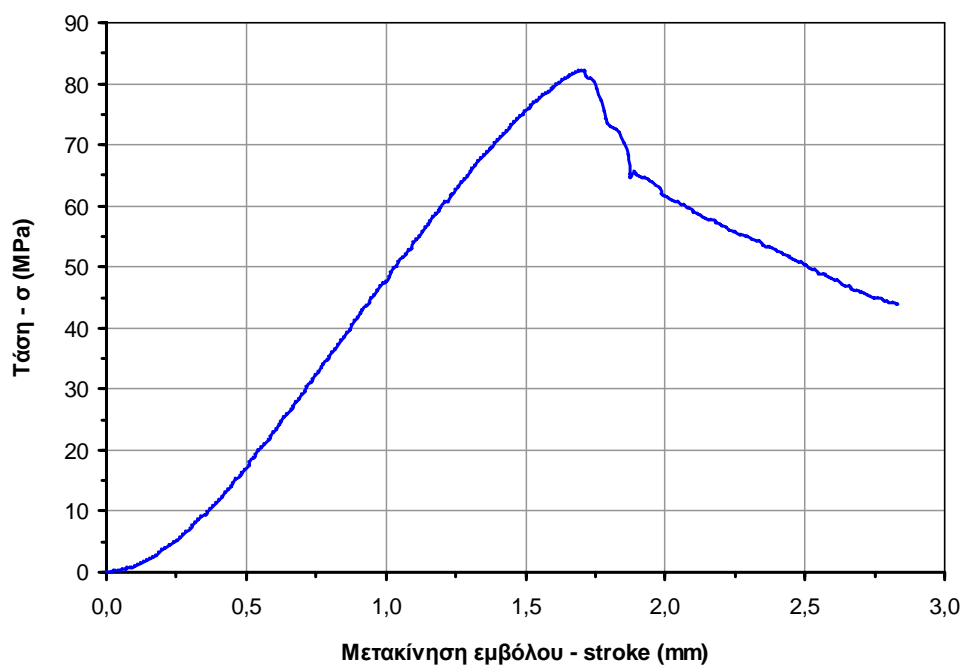
Σχήμα 2.19 - Κυλινδρικό δοκίμιο για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.20 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου κυβικού δοκιμίου συμβατικού σκυροδέματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 2.21 - Κυβικό δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος μετά την αστοχία σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



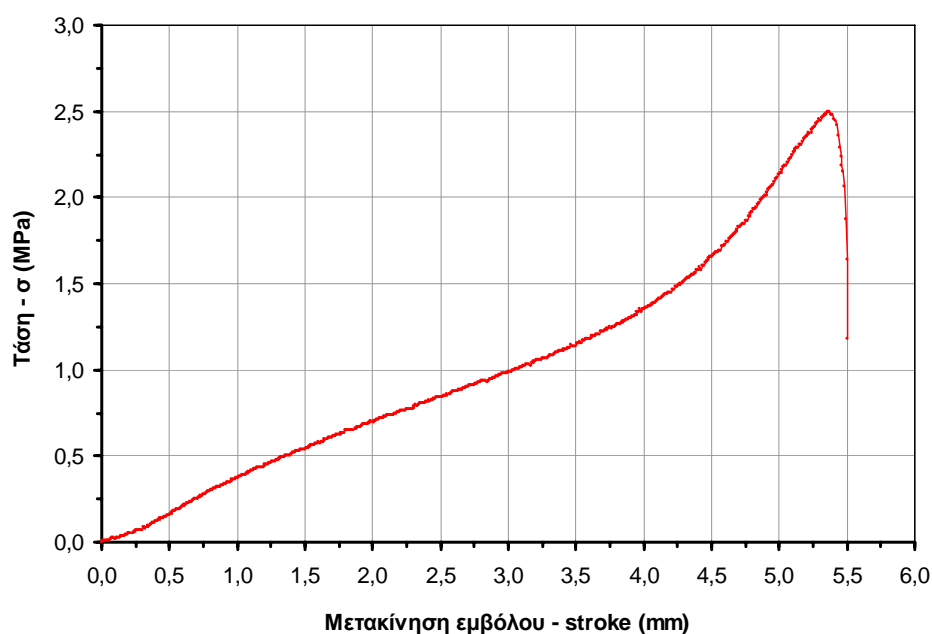
Σχήμα 2.22 - Διάγραμμα φορτίου - μετακίνησης εμβόλου κυβικού δοκιμίου ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 2.23 - Κυβικό δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 2.24 - Κυβικό δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά την αστοχία σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



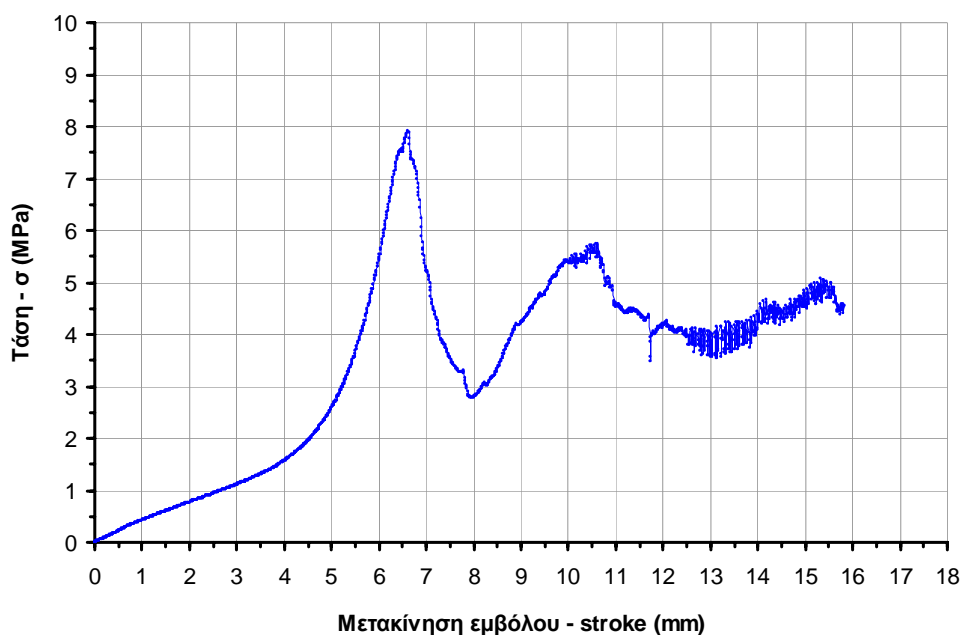
Σχήμα 2.25 - Διάγραμμα φορτίου - μετακίνησης εμβόλου κυλινδρικού δοκιμίου συμβατικού σκυροδέματος σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.26 - Κυλινδρικό δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος κατά την αστοχία σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.27 - Κυλινδρικό δοκίμιο συμβατικού σκυροδέματος αμέσως μετά την αστοχία του σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.28 - Διάγραμμα φορτίου - μετακίνησης εμβόλου κυλινδρικού δοκιμίου ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.29 - Κυλινδρικό δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στο μέγιστο φορτίο στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 2.30 - Το κυλινδρικό δοκίμιο ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά την αστοχία στη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

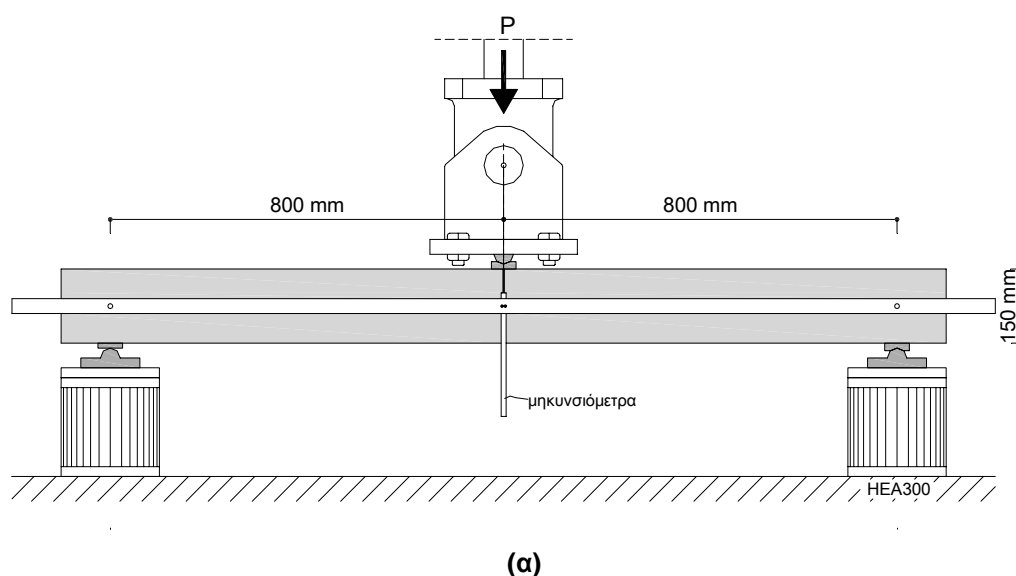
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

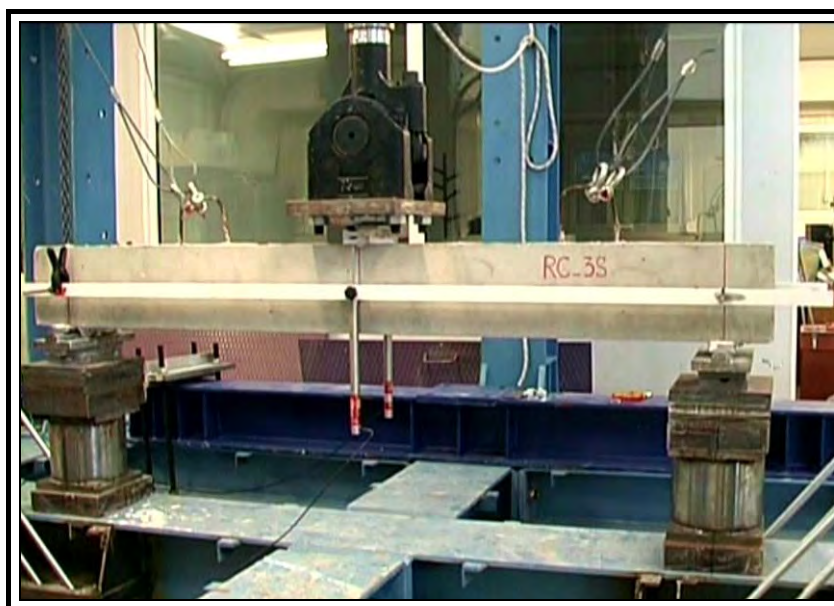
3.1 - Πειραματική διάταξη

Οι πειραματικές δοκιμές των συμβατικά οπλισμένων δοκών (RC), των συμβατικά οπλισμένων με ενίσχυση ινοπλισμένου μανδύα τσιμεντοκονιάματος (CFRT) και των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος τσιμεντοκονιάματος σε μονοαξονική θλίψη και έμμεσο εφελκυσμό πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3.1.1 - Πειραματική διάταξη δοκών σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων

Οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί RC-1S-3B, RC-2S-3B και RC-3S-3B εξετάστηκαν σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων (Σχ. 3.1(α) και (β)). Η στήριξη των δοκών ήταν αμφιέριστη, με καθαρό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ίσο με 160 cm. Το συγκεντρωμένο φορτίο ασκήθηκε στο μέσο του ανοίγματος των δοκών με σταθερό ρυθμό επιβολής. Το βέλος κάμψης των δοκών μετρήθηκε μέσω δύο μηκυσιομέτρων DCDT στο μέσο του ανοίγματος, στη θέση επιβολής του φορτίου (Σχ. 3.2). Τα μηκυσιομέτρα στηρίχθηκαν σε δύο αμφιέριστες δοκούς αλουμινίου διαστάσεων 200x1,5x3 cm, οι οποίες στηρίχθηκαν σε μεταλλικές ράβδους Φ8 εγκάρσια τοποθετημένες σε ειδικές οπές στη θέση στηρίξεων των δοκών, στο μέσο του ύψους της διατομής (Σχ. 3.3). Το επιβαλλόμενο φορτίο P, η μετατόπιση του εμβόλου και το βέλος κάμψης καταγράφονταν στο αυτόματο σύστημα καταγραφής.





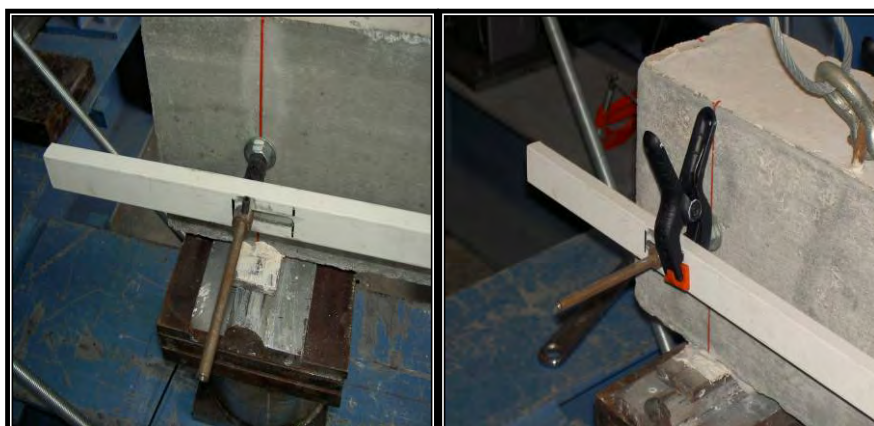
(β)

Σχήμα 3.1 - (α): Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.

(β): Πειραματική διάταξη δοκού σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.



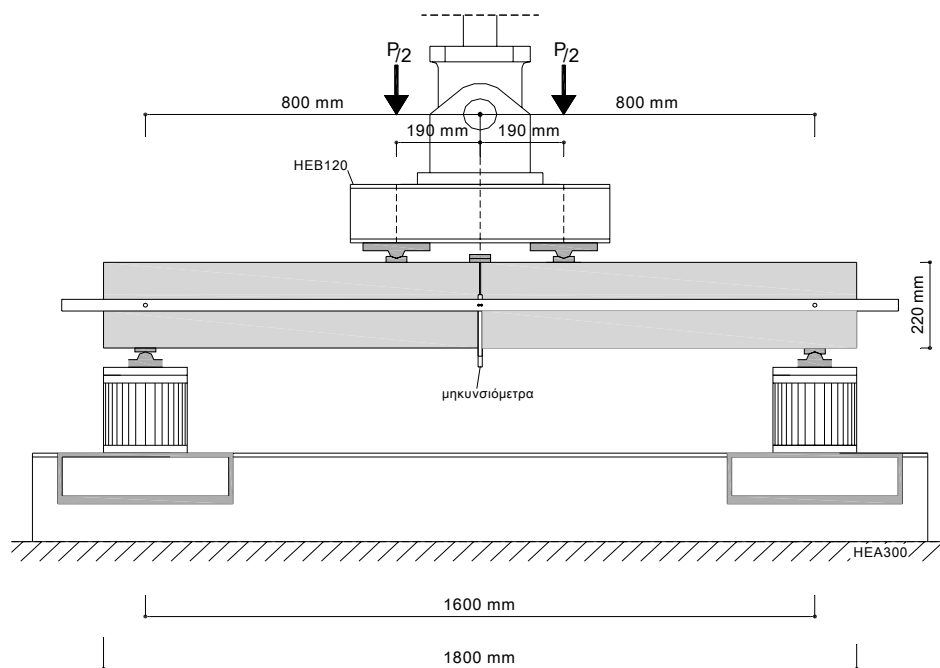
Σχήμα 3.2 - Δοκός στήριξης των μηχανοσυστημάτων, στο μέσον του ανοίγματος της δοκού, για την μέτρηση του μέγιστου βέλους κάμψης.



Σχήμα 3.3 - Η δοκός στήριξης των μηχανοσυστημάτων, στη στήριξη της δοκού.

3.1.2 - Πειραματική διάταξη δοκών σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων

Οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί με ενίσχυση μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος CFRT-1S-4B, CFRT-2S-4B, CFRT-3S-4B και CFRT-4S-4B υπεβλήθησαν σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων (Σχ.3.4(α) και (β)). Η πειραματική διάταξη ήταν παρόμοια με αυτή της μονοτονικής φόρτισης 3-σημείων. Μοναδική διαφορά ήταν το σημείο επιβολής του φορτίου, το οποίο εφαρμόστηκε σε δύο σημεία σε απόσταση 19 cm εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος των δοκών μέσω μιας μεταλλικής δοκού HEB120 μήκους 62 cm και δύο μεταλλικών πλακών 42x16x2,5 cm στο κάτω μέρος της (Σχ. 3.6, 3.7). Οι πλάκες με τη σειρά τους μέσω δύο μεταλλικών πλακιδίων διαστάσεων 22,0x5,0x1,5 cm (Σχ. 3.8) έρχονταν σε επαφή με τη δοκό. Η βοηθητική δοκός HEB120 ενώθηκε με το έμβολο επιβολής της δύναμης με τέσσερις ντίζες Φ24 σε μεταλλική πλάκα διαστάσεων 25,3x25,3x2,5 cm στο πάνω πέλμα της.



(α)



(β)

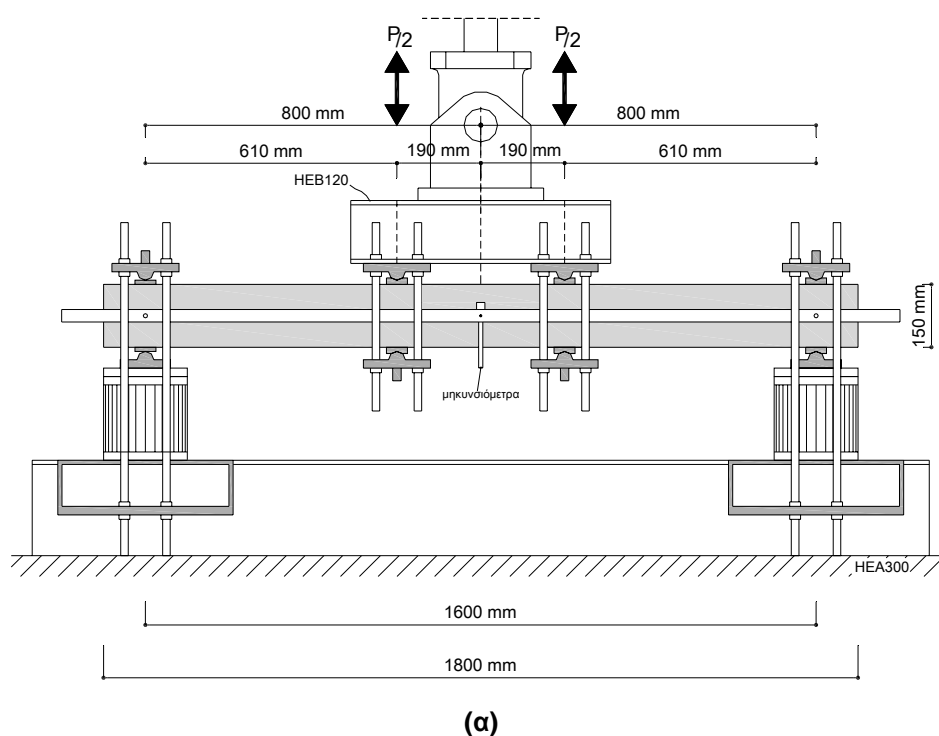
Σχήμα 3.4 - (α): Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.

(β): Πειραματική διάταξη δοκού σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.

3.1.3 - Πειραματική διάταξη δοκών σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων

Οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί RC-5C-4B, RC-6C-4B και οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί με ενίσχυση μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος CFRT-5C-4B, CFRT-6C-4B, CFRT-7C-4B, CFRT-8C-4B, CFRT-9C-4B και CFRT-10C-4B εξετάστηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων (Σχ. 3.5(α) και (β)). Η στήριξη των δοκών και η πειραματική διάταξη ήταν παρόμοια με αυτή για τη μονοτονική φόρτιση 4-σημείων. Για την ανακύκλιση της επιβαλλόμενης φόρτισης (αρνητική ροπή), τέσσερις ντίζες διαμέτρου $\Phi 20$ και μήκους 45 cm συγκρατούσαν την κάθε μία από τις δύο πλάκες με δύο άλλες (Σχ. 3.9) παρόμοιου σχήματος και διαστάσεων, οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στις ίδιες θέσεις αλλά στο κάτω μέρος της δοκού και έρχονταν σε επαφή μαζί της μέσω δύο πλακιδίων ίδιων με αυτά που είχαν τοποθετηθεί στα αντίστοιχα σημεία στο πάνω τμήμα της δοκού. Με όμοιο τρόπο, υλοποιήθηκαν και οι στηρίξεις για την αντίθετη διεύθυνση φόρτισης. Δύο μεταλλικές πλάκες 42x18x2,5 cm είχαν κοχλιωθεί η κάθε μία μέσω τεσσάρων ντιζών $\Phi 20$ μήκους 140cm πάνω στη κεντρική μεταλλική δοκό HEA300 της βάσεως του πλαισίου, ώστε τελικά να παραμείνουν οι στηρίξεις σταθερές και προς τις δύο διευθύνσεις (Σχ. 3.9).

Το βέλος κάμψης μετρήθηκε μέσω δύο μηκυσιομέτρων DCDT που τοποθετήθηκαν στο μέσο του ανοίγματος των δοκών. Οι κεφαλές των μηκυσιομέτρων στηρίζονταν σε μεταλλικές γωνίες που τοποθετήθηκαν στο μέσο του ύψους των δοκιμίων στο μέσον του ανοίγματος του δοκιμίου με ειδικό στόκο (Σχ. 3.10). Τα μηκυσιόμετρα στηρίχθηκαν σε δοκούς αλουμινίου (200x1,5x3 cm) με τον ίδιο τρόπο όπως στη διάταξη για τη μονοτονική φόρτιση,

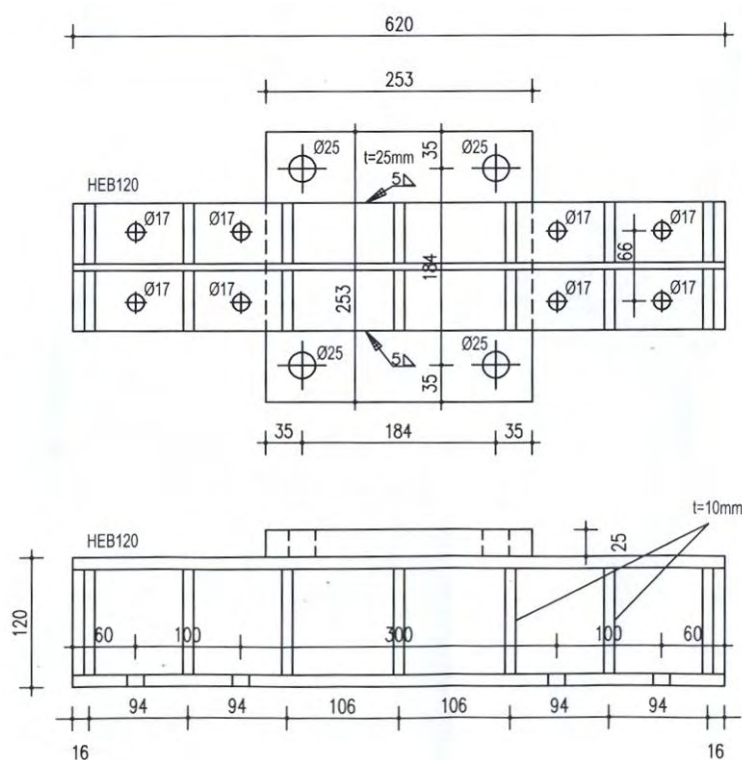




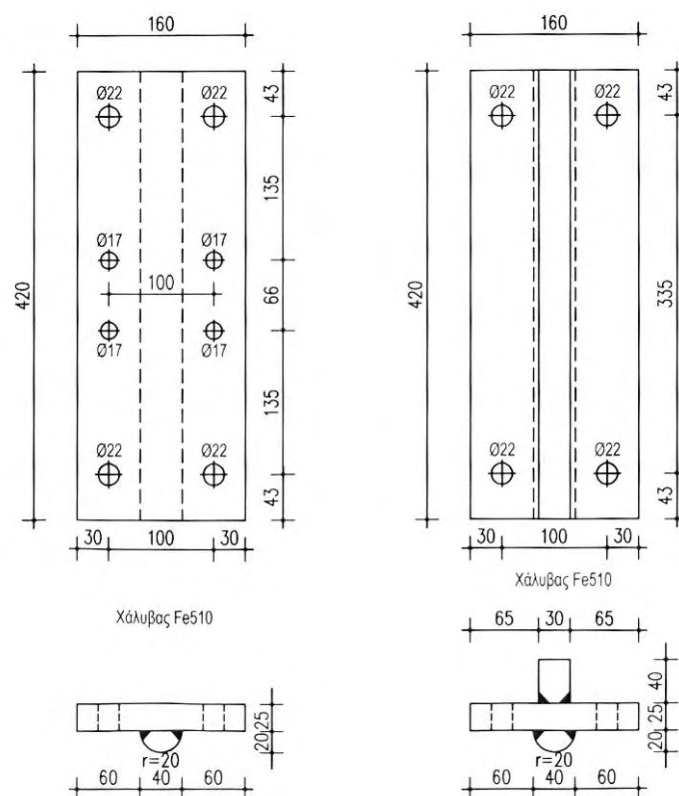
(β)

Σχήμα 3.5 - (α): Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.

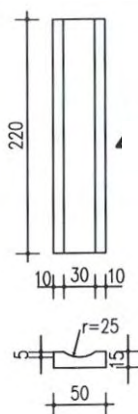
(β): Πειραματική διάταξη της δοκού RC-6C σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 3.6 - Μεταλλική βοηθητική δοκός HEB120.



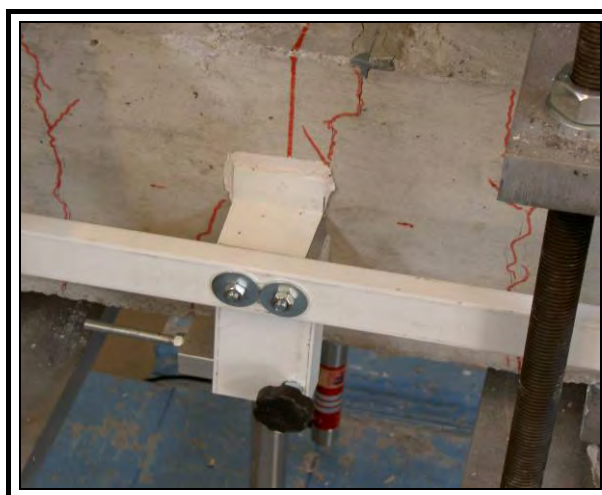
Σχήμα 3.7 - Μεταλλικές πλάκες επιβολής φορτίου μιας ή δύο κατευθύνσεων.



Σχήμα 3.8 - Τα μεταλλικά πλακίδια επαφής.



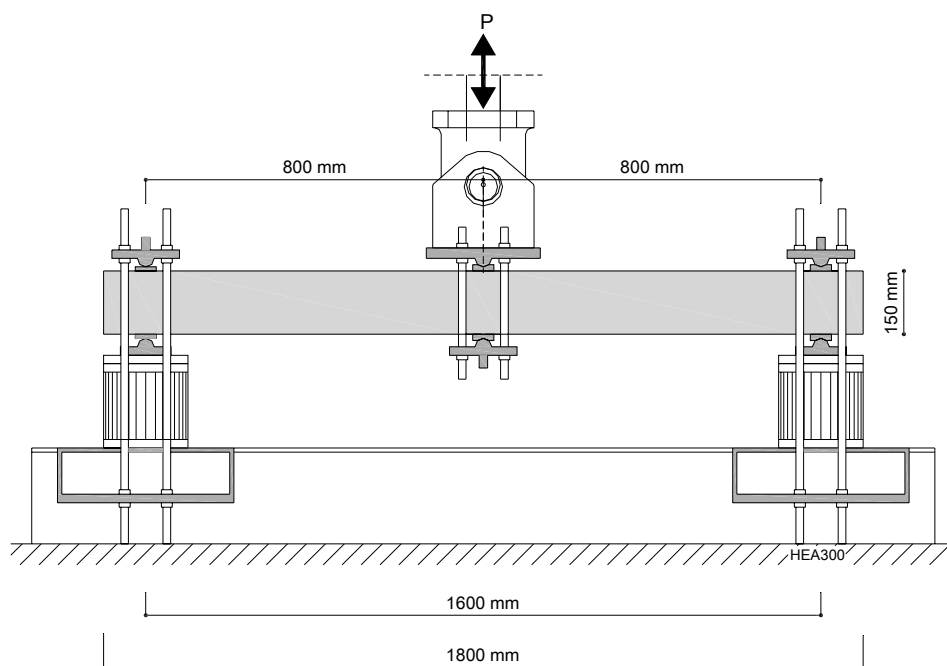
Σχήμα 3.9 - Λεπτομέρεια της πειραματικής διάταξης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στη θέση της επιβολής του φορτίου (άνοιγμα δοκών) και στις στηρίξεις.



Σχήμα 3.10 - Η διάταξη του μηχανομορίου στο μέσον του ανοίγματος στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

3.1.4 - Πειραματική διάταξη δοκού σε ανακυλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3-σημείων

Η συμβατικά οπλισμένη δοκός RC-4C-3B υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τριών (3) σημείων (Σχήμα 3.11(α) και (β)). Η διάταξη ήταν παρόμοια με εκείνη της ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων, με μόνη διαφορά το σημείο επιβολής του φορτίου το οποίο βρισκόταν στο μέσο του ανοίγματος της δοκού. Λόγω της διάταξης επιβολής του ανακυκλιζόμενου φορτίου στο μέσο της δοκού, δεν χρησιμοποιήθηκαν μηχανομόμετρα για την καταγραφή του βέλους κάμψης. Ο έλεγχος των επιβαλλόμενων μετακινήσεων έγινε μόνο μέσω της μετακίνησης του εμβόλου (stroke control).



(α)



(β)

Σχήμα 3.11 - (α): Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3-σημείων.
(β): Η δοκός RC-4C-3B σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3-σημείων.

3.2 - Εργαστηριακός εξοπλισμός

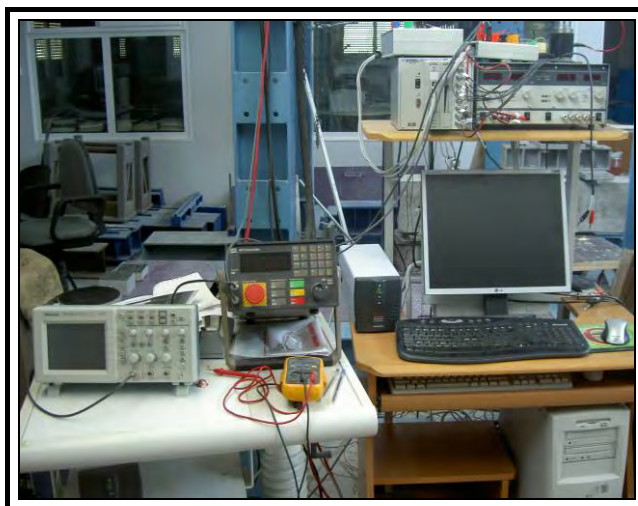
3.2.1 - Σερβοϋδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου

Οι πειραματικές δοκιμές των δοκών σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση έγιναν σε μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης 3x3x4 m (μήκος x πλάτος x ύψος), με ενεργοποιητή φορτίου MTS±250 kN ελεγχόμενο από ψηφιακό σερβοϋδραυλικό σύστημα λειτουργίας MTS 407 (Σχ. 3.12), αντλία υδραυλικής ισχύος 40 lpm και αυτόματο σύστημα καταγραφής μετρήσεων SCXI της National Instruments (Σχ. 3.13).

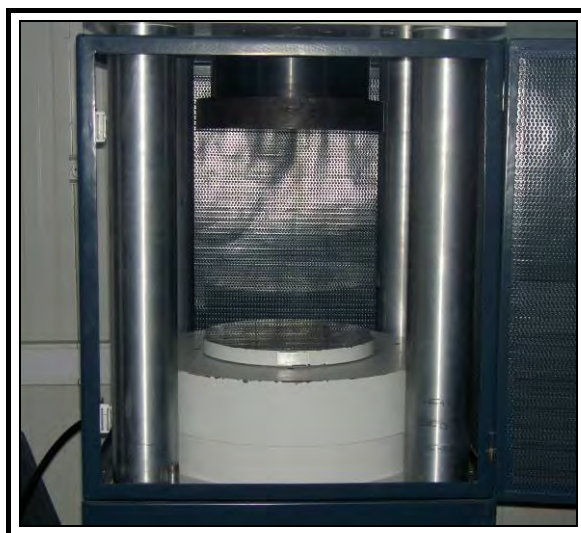
Για τις δοκιμές της μονοαξονικής θλίψης και του έμμεσου εφελκυσμού των δοκιμών του συμβατικού και του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε "πρέσα" μονοαξονικής θλίψης DMG 3000 kN (Σχ. 3.14) με αυτόματο σύστημα ελέγχου και καταγραφής των μετρήσεων (Σχ. 3.15).



Σχήμα 3.12 - Το σερβοϋδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου MTS.



Σχήμα 3.13 - Αυτόματο σύστημα καταγραφής της National Instruments (SCXI).



Σχήμα 3.14 - Μηχανή μονοαξονικής θλίψης DMG.



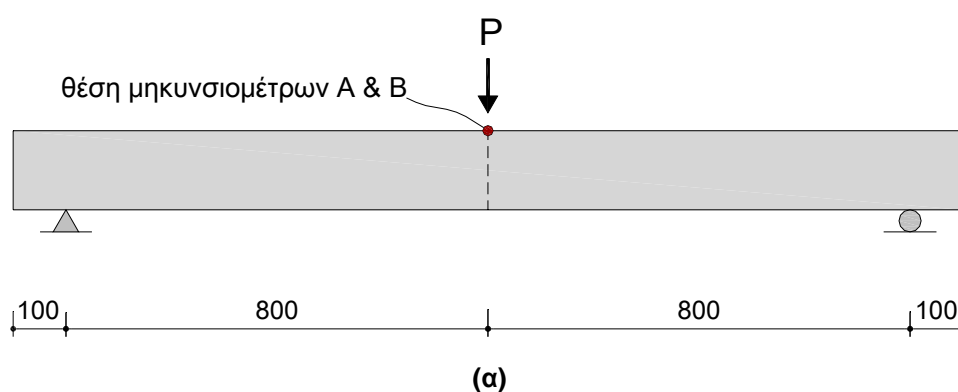
Σχήμα 3.15 - Αυτόματο σύστημα καταγραφής της πρέσας DMG.

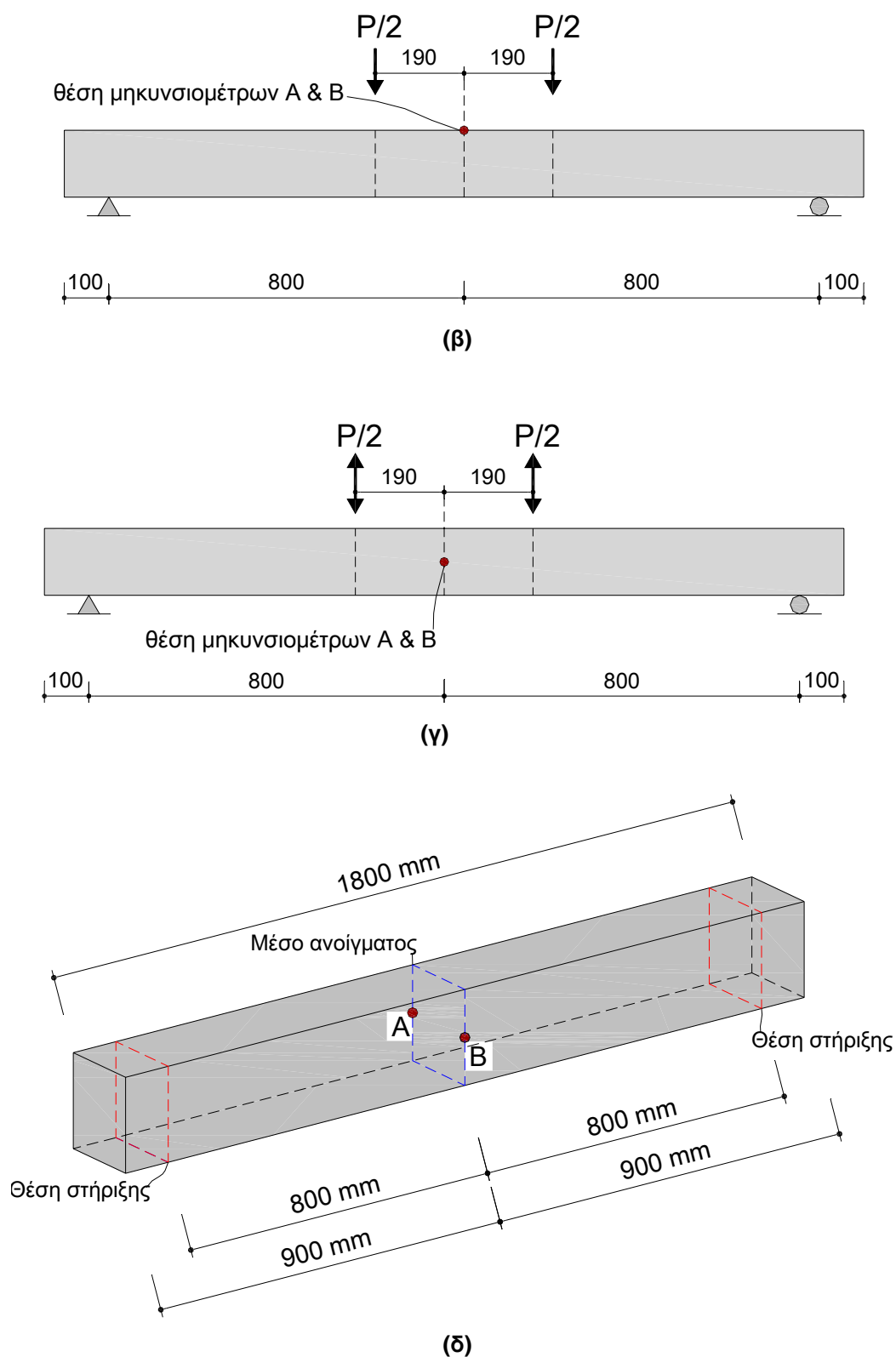
3.2.2 - Μετρητικά όργανα

Για τη μέτρηση του βέλους κάμψης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) μηκυσιόμετρα (DCDT) της εταιρίας RDP Group (Σχ. 3.16) με μέγιστη δυνατότητα μετακίνησης 100 mm (μηκυσιόμετρα 'A' και 'B') (Σχ.3.17(α), (β), (γ) και (δ)). Για την μέτρηση του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκαν δύο μηκυσιόμετρα προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή αξιοπιστία στην καταγραφή του βέλους κάμψης, ως ο μέσος όρος των δύο καταγραφών.



Σχήμα 3.16 - Μηκυσιόμετρα A, B





Σχήμα 3.17 - α): Θέση μηχανομετρών στο μέσον του ανοίγματος των δοκών για μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων
β): Θέση μηχανομετρών για μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων
γ): Θέση μηχανομετρών στο μέσον του ανοίγματος των δοκών για ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων
δ): Προοπτική απεικόνιση της θέσης των μηχανομετρών

3.3 - Πειραματική διαδικασία

3.3.1 - Πειραματική διαδικασία δοκών

Από τις έξι (6) συμβατικά οπλισμένες δοκούς οι τρεις υποβλήθηκαν σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων και οι υπόλοιπες τρεις (3) σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3- και 4-σημείων. Από τις δέκα (10) δοκούς που ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα, οι πέντε (5) διέθεταν διαμήκη οπλισμό Φ10 και συνδετήρες ΣΦ8 και οι άλλες πέντε (5) μεταλλικό πλέγμα T131. Από τις πέντε δοκούς της κάθε ομάδας που ενισχύθηκαν με μανδύα, δύο υποβλήθηκαν σε στατική μονοτονική φόρτιση και τρεις σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.

Στον Πίν. 3.1 παρουσιάζονται οι το πρόγραμμα δοκιμών όλων των δοκών.

Πίνακας 3.1 - Πειραματικό πρόγραμμα δοκών.

α/α	κωδικός δοκού	Οπλισμός δοκού	Φόρτιση
1	RC-1S-3B	Διαμήκης & εγκάρσιος οπλισμός	Μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων
2	RC-2S-3B		
3	RC-3S-3B		
4	RC-4C-3B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 3-σημείων
5	RC-5C-4B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων
6	RC-6C-4B		
7	CFRT-1S-4B	Ινοπλισμένος μανδύας με διαμήκη & εγκάρσιο οπλισμό σε συμβατική δοκό Ο/Σ	Μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων
8	CFRT-6C-4B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων
9	CFRT-7C-4B		
10	CFRT-4S-4B	Ινοπλισμένος μανδύας με διαμήκη & εγκάρσιο οπλισμό σε συμβατική δοκό Ο/Σ χωρίς συνδετήρες	Μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων
11	CFRT-5C-4B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων
12	CFRT-2S-4B	Ινοπλισμένος μανδύας με μεταλλικό πλέγμα σε συμβατική δοκό Ο/Σ	Μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων
13	CFRT-8C-4B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων
14	CFRT-10C-4B		

15	CFRT-3S-4B	Ινοπλισμένος μανδύας με μεταλλικό πλέγμα σε συμβατική δοκό Ο/Σ χωρίς συνδετήρες	Μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων
16	CFRT-9C-4B		Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο της μετατόπισης του εμβόλου της πρέσας (stroke-control), ενώ η καταγραφή του βέλους κάμψης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών έγινε με δύο μηκυσιόμετρα DCDT's. Οι δοκιμές σε μονοτονική φόρτιση έγιναν μέσω επιβολής μετατόπισης με σταθερό ρυθμό φόρτισης (mm/sec). Οι δοκιμές σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση πραγματοποιήθηκαν με επιβολή προκαθορισμένων μετατοπίσεων για δύο πλήρεις κύκλους φόρτισης, με σταθερό ρυθμό φόρτισης (mm/sec) (Πιν. 3.2 έως 3.5).

Πίνακας 3.2 - Ρυθμός μονοτονικής φόρτισης συμβατικά οπλισμένων δοκών Ο/Σ.

κωδικός δοκού	Ρυθμός φόρτισης (mm/sec)
RC-1S-3B	0,02
RC-2S-3B	0,02±0,5
RC-3S-3B	0,02

Πίνακας 3.3 - Ρυθμός μονοτονικής φόρτισης ινοπλισμένων δοκών με συμβατικό οπλισμό.

κωδικός δοκού	Ρυθμός φόρτισης (mm/sec)
CFRT-1S-4B	0,005±0,05
CFRT -2S-4B	0,005±0,05
CFRT -3S-4B	0,005±0,05`
CFRT -4S-4B	0,005

Πίνακας 3.4 - Ιστορικό ανακυκλιζόμενης φόρτισης συμβατικά οπλισμένων δοκών.

κωδικός δοκού	Επιβαλλόμενη μετατόπιση (mm)	Αριθμός κύκλων φόρτισης	Ρυθμός φόρτισης (mm/sec)
RC-4C-3B	±4,0	2	0,0167
	±8,0	2	0,0167
	±12,0	2	0,0167
	±20,0	2	0,05

	±28,0	2	0,05
	±32,0	2	0,05
	±40,0	2	0,1
	±48,0	2	0,5
RC-5C-4B	±4,0	2	0,0167
	±8,0	2	0,0167
	±12,0	2	0,05
	±20,0	2	0,1
	±40,0	2	0,5
	±50,0	2	0,5
RC-6C-4B	±4,0	2	0,05
	±8,0	2	0,05
	±12,0	2	0,05
	±20,0	2	0,1
	±40,0	2	0,5
	±50,0	2	0,5

Πίνακας 3.5 - Ιστορικό ανακυκλιζόμενης φόρτισης ινοπλισμένων δοκών με συμβατικό οπλισμό.

κωδικός δοκού	Επιβαλλόμενη μετατόπιση (mm)	Αριθμός κύκλων φόρτισης	Ρυθμός φόρτισης (mm/sec)
CFRT-5C-4B	±4,0	2	0,03
	±8,0	2	0,04
	±12,0	2	0,1
	±16,0	2	0,2
	±20,0	2	0,3
	±24,0	2	0,3
	±28,0	2	0,3
CFRT-6C-4B	±2,0	2	0,04
	±4,0	2	0,1
	±8,0	2	0,2
	±12,0	2	0,2
	±16,0	2	0,4
	±20,0	2	0,4
	±24,0	2	0,6
	±28,0	2	0,6

CFRT-7C-4B	±2,0	2	0,05
	±4,0	2	0,1
	±8,0	2	0,2
	±12,0	2	0,2
	±16,0	2	0,4
	±20,0	2	0,4
	±24,0	2	0,6
CFRT-8C-4B	±4,0	2	0,05
	±8,0	2	0,1
	±12,0	2	0,2
	±16,0	2	0,4
	±20,0	2	0,4
	±24,0	2	0,4
	±28,0	2	0,4
	±32,0	2	0,4
CFRT-9C-4B	±4,0	2	0,05
	±8,0	2	0,2
	±12,0	2	0,2
	±16,0	2	0,4
	±20,0	2	0,4
	±24,0	2	0,4
	±28,0	2	0,4
CFRT-10C-4B	±4,0	2	0,05
	±8,0	2	0,1
	±12,0	2	0,2
	±16,0	2	0,4
	±20,0	2	0,4
	±24,0	2	0,6
	±28,0	2	0,6
	±32,0	2	0,8
	±36,0	2	0,8
	±40,0	1	0,8

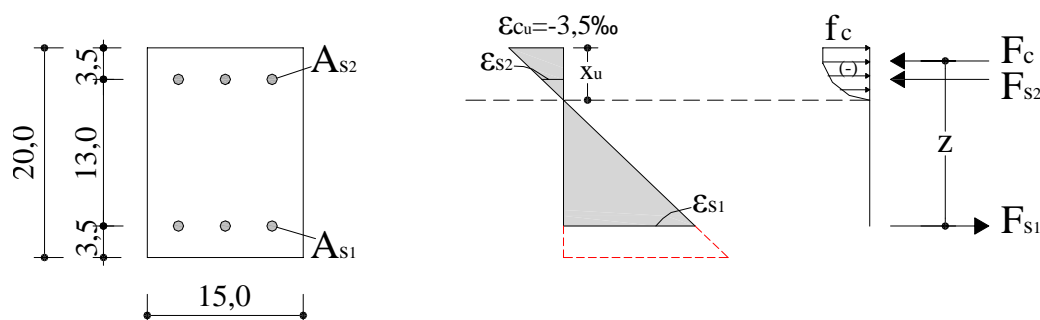
3.3.2 - Δοκίμια σκυροδέματος

Οι δοκιμές των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής τόσο του συμβατικού σκυροδέματος όσο και του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο της μετακίνησης του εμβόλου (stroke-control) της πρέσας DMG με ταχύτητα 0,01mm/sec.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός

4.1.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.1 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της συμβατικά οπλισμένης δοκού στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u των δοκών στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέει ο εφελκόμενος οπλισμός και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος.

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} \Rightarrow 0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s2} \cdot f_{s2} = A_{s1} \cdot f_{s1} \Rightarrow$$

$$0,8 \cdot 28,12 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot x_u + 2,36 \cdot \frac{x_u - 0,035}{x_u} \cdot 3,5 \text{‰} \cdot 200 \cdot 10^2 = 2,36 \cdot 55 \Rightarrow$$

$$x_u = 0,033 \text{ m} \text{ ή } 3,3 \text{ cm}$$

$$M_u = F_c \cdot z + F_{s2} \cdot (d - d_2) \Leftrightarrow$$

$$M_u = 0,8 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u \cdot (d - 0,416 \cdot x_u) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (d - d_2) = 20,05 \text{ kNm}$$

όπου: $F_{s1} = A_{s1} \cdot f_{s1}$, δύναμη του εφελκόμενου οπλισμού στην αστοχία

$F_{s2} = A_{s2} \cdot f_{s2}$, δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

$F_c = 0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u$, θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

$A_{s1} = 2,36 \text{ cm}^2$, εμβαδόν του εφελκόμενου οπλισμού (3Ø10)

$A_{s2} = 2,36 \text{ cm}^2$, εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού (3Ø10)

$f_{s1} = 550 \text{ MPa}$, τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές

$f_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s$, τάση του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

$f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$, μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του σκυροδέματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

$E_s=200$ GPa, μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

$d=16,5$ cm, στατικό ύψος της δοκού

$d_1 = d_2 = 3,5$ cm

$b=15$ cm, πλάτος της δοκού

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 14,0 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_u - d_2}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 0,32 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο του εφελκόμενου οπλισμού κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συγκεντρωμένο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός στο μέσο του ανοίγματος εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = \frac{4 \cdot M_u}{L} = \frac{4 \cdot 20,05}{1,60} = 50,13 \text{ kN}$$

4.1.2 - Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης και διαρροής διαμήκους οπλισμού

α) Αρηγμάτωση διατομή (φάση I)

Το φορτίο ρηγμάτωσης εκτιμάται με τη μέθοδο της ισοδύναμης διατομής. Η ροπή αδράνειας της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(x_I - \frac{h}{2}\right)^2 + (n-1) \cdot A_{s1} \cdot (x_I - d_1)^2 + (n-1) \cdot A_{s2} \cdot (x_I - d_2)^2 \Leftrightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 5,37 \cdot 2,36 \cdot (10 - 3,5)^2 + 5,37 \cdot 2,36 \cdot (10 - 3,5)^2 \Leftrightarrow$$

$$I_I = 11071 \text{ cm}^4$$

όπου: $\eta = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{31,4} = 6,4$, ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

προς του συμβατικού σκυροδέματος

$E_s=200$ GPa, μέτρο ελαστικότητας χάλυβα οπλισμού

$E_c = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 9,5 \cdot (28,12 + 8)^{1/3} = 31,4$ GPa, μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος

Η ροπή ρηγμάτων εκτιμάται:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{y_t} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,25 \cdot 11071}{20 - 10} = 2,49 \text{ kNm}$$

όπου $f_{ctm} = 2,25 \text{ MPa}$, το 90% της μέσης εφελκυστική αντοχής του σκυροδέματος σε διάρρηξη κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

Το φορτίο ρηγμάτων στο μέσο του ανοίγματος της δοκού είναι:

$$P_{cr} = \frac{4 \cdot 2,49}{1,60} = 6,23 \text{ kN}$$

β) Ρηγματωμένη διατομή (φάση II)

Από τις εξισώσεις ισορροπίας - ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή M_y της δοκού στη διαρροή υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} \Leftrightarrow \alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_y + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s = A_{s1} \cdot f_{s1} \Leftrightarrow$$

$$\alpha \cdot 28120 \cdot 0,15 \cdot x_y + 2,36 \cdot \varepsilon_{s2} \cdot 200 \cdot 10^2 = 2,36 \cdot 55 \quad (1)$$

$$\frac{x_y}{\varepsilon_{cy}} = \frac{d - x_y}{0,00275} \Rightarrow x_y = \frac{0,165 \cdot \varepsilon_{cy}}{0,00275 + \varepsilon_{cy}} \quad (2)$$

$$\frac{x_y}{\varepsilon_{cy}} = \frac{x_y - d_2}{\varepsilon_{s2}} \Rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{x_y - d_2}{x_y} \cdot \varepsilon_{cy} = \frac{x_y - 0,035}{x_y} \cdot \varepsilon_{cy}$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \varepsilon_{cy} \cdot (8 - \varepsilon_{cy}) \quad (3)$$

$$k_a = \frac{8 - \varepsilon_{cy}}{4 \cdot (8 - \varepsilon_{cy})} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος των εξισώσεων δίνει:

$$\varepsilon_{cy} = 1,21 \text{ ‰}$$

$$\alpha = 0,483$$

$$x_y = 5,83 \text{ cm}$$

$$k_a = 0,354$$

Η τιμή της καμπτικής ροπής αρχικής διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού είναι:

$$M_y = F_{cy} \cdot z + F_{s2} \cdot (d - d_2) \Leftrightarrow$$

$$M_y = \alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_y \cdot (d - k_{ay} \cdot x_y) + A_{s2} \cdot \varepsilon_{cy} \cdot \frac{x_y - d_2}{x_y} \cdot E_{s2} \cdot (d - d_2) \Leftrightarrow$$

$$M_y = 0,483 \cdot 28120 \cdot 0,15 \cdot 0,0583 \cdot (0,165 - 0,354 \cdot 0,0583) + 2,36 \cdot 0,48\% \cdot 200 \cdot 10^2 \cdot 0,13 \Leftrightarrow$$

$$M_y = 20,04 \text{ kNm}$$

και συνεπώς το συγκεντρωμένο φορτίο της δοκού στο μέσο του ανοίγματος εκτιμάται ότι είναι:

$$P_y = \frac{4 \cdot 20,04}{1,60} = 50,1 \text{ kN}$$

4.1.4 - Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση

Οι υπολογισμοί των αντοχών σε διάτμηση έγιναν με βάση τον ΕΚΩΣ 2000. Η αντοχή της δοκού σε τέμνουσα είναι:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd}$$

όπου: V_{Rd1} , η αντοχή σε τέμνουσα της δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

V_{wd} , η αντοχή σε τέμνουσα του εγκάρσιου οπλισμού (κατακόρυφοι συνδετήρες) της δοκού

Η αντοχή του σκυροδέματος σε τέμνουσα εκτιμάται ως:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,20 + 40 \cdot \rho_\ell) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d = 22,82 \text{ kN}$$

όπου: $\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctm} = 0,25 \cdot 2,25 = 0,57 \text{ MPa}$, η διατμητική αντοχή του σκυροδέματος έναντι ρηγματώσεως

$$\rho_\ell = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \Rightarrow \frac{2,36 \cdot 10^{-4}}{0,15 \cdot 0,17} = 9,25 \cdot 10^{-3} \leq 0,02, \text{ το ποσοστό του διαμήκη}$$

εφελκυσμένου οπλισμού

$$k = (1,6 - d) = 1,435 \geq 1,0, \text{ όπου } d \text{ το στατικό ύψος σε m}$$

$b_w = 15 \text{ cm}$ το πλάτος της δοκού

$d = 16,5 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού

Η αντοχή σε τέμνουσα λόγω των εγκάρσιων συνδετήρων:

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot 0,9 \cdot d = 80,86 \text{ kN}$$

όπου: $A_{sw} = 2 \cdot 0,50 = 1 \text{ cm}^2$ ($\Sigma \varnothing 8/10$ δίτημος), το εμβαδόν του κάθε συνδετήρα

$s = 10 \text{ cm}$, η απόσταση των συνδετήρων

$f_{ywk} = 526 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των συνδετήρων όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές

$d = 16,5 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού

Άρα η συνολική αντοχή της δοκού σε τέμνουσα εκτιμάται:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd} = 103,68 \text{ kN}$$

Το μέγιστο συγκεντρωμένο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός στο μέσον της δοκού με βάση τον έλεγχο οριακής κατάστασης έναντι τέμνουσας είναι:

$$P_u = 2 \cdot V_{sd} = 2 \cdot 103,68 = 207,36 \text{ kN}$$

Η αντοχή της δοκού έναντι διαγώνιας θλίψης του σκυροδέματος ($\theta=45^\circ$)

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cm} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d = 180,70 \text{ kN}$$

$$\text{όπου: } v = 0,70 - \frac{f_{cm}}{200} = 0,56 \geq 0,50$$

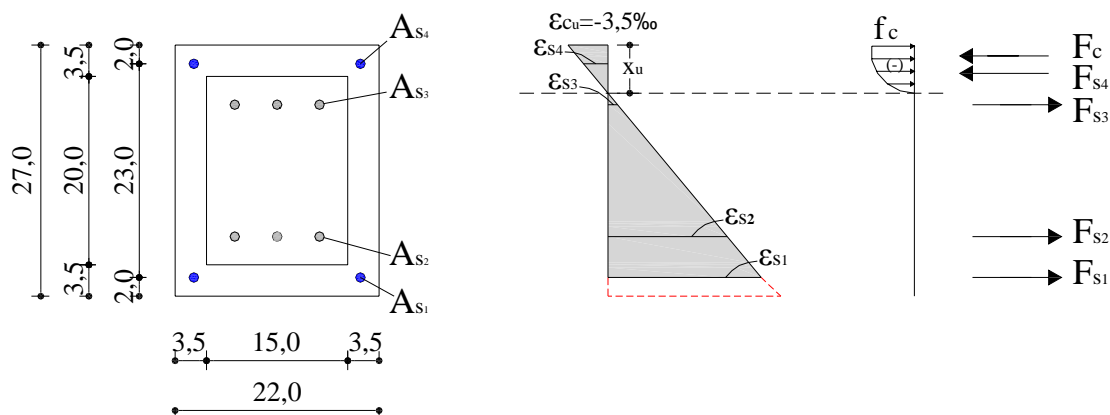
$f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$ η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

$b_w = 15 \text{ cm}$ το πλάτος της δοκού

$d = 16,5 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού

4.2 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμό Φ10

4.2.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.2 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της δοκού ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Γίνεται η υπόθεση ότι ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή ίδια με εκείνη της αρχικής δοκού ($f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$), προκειμένου να εκτιμηθεί η διαφορά στη μέγιστη καμπτική αντοχή της ενισχυμένης δοκού από την αντικατάσταση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα. Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u των δοκών στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέουν οι εφελκόμενοι οπλισμοί A_{s1} , και A_{s2} , δεν διαρρέει ο εφελκόμενος A_{s3} και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος A_{s4} :

$$\begin{aligned}
 F_c + F_{s4} &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} \Rightarrow \\
 0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s4} \cdot f_{s4} &= A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} \Leftrightarrow \\
 0,8 \cdot 28,12 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u + 1,57 \cdot 0,0035 \cdot \frac{x_u - 0,02}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 &= 1,57 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 + \\
 + 2,36 \cdot 0,0035 \cdot \frac{0,07 - x_u}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 &\Leftrightarrow \\
 x_u &= 0,047 \text{ m ή } 4,7 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_u &= F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,416 \cdot x_u \right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) \Leftrightarrow \\
 M_u &= 47,4 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

όπου: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , οι δυνάμεις των εφελκόμενων οπλισμών στην αστοχία

F_{s4} , η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

F_c , η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

$A_{s1} = 1,57 \text{ cm}^2$ ($2\varnothing 10$) και $A_{s2} = A_{s3} = 2,36 \text{ cm}^2$ ($3\varnothing 10$) , το εμβαδόν των
 εφελκόμενων οπλισμών
 $A_{s4} = 1,57 \text{ cm}^2$, το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού ($2\varnothing 10$)
 $f_{s1} = f_{s2} = 550 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από
 εργαστηριακές δοκιμές
 f_{s3} , η τάση του εφελκόμενου οπλισμού στην αστοχία
 f_{s4} , η τάση του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία
 $f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$ η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και
 τσιμεντοκονιάματος
 $E_s = 200 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού
 $d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού
 $d_1 = d_4 = 2 \text{ cm}$
 $d_2 = d_3 = 7 \text{ cm}$
 $h = 27 \text{ cm}$, το ύψος της δοκού
 $b = 22 \text{ cm}$, το πλάτος της δοκού

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 15,1 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{h - d_2 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 11,4 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d_3 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 1,71 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{x_u - d_4}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 2,0 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

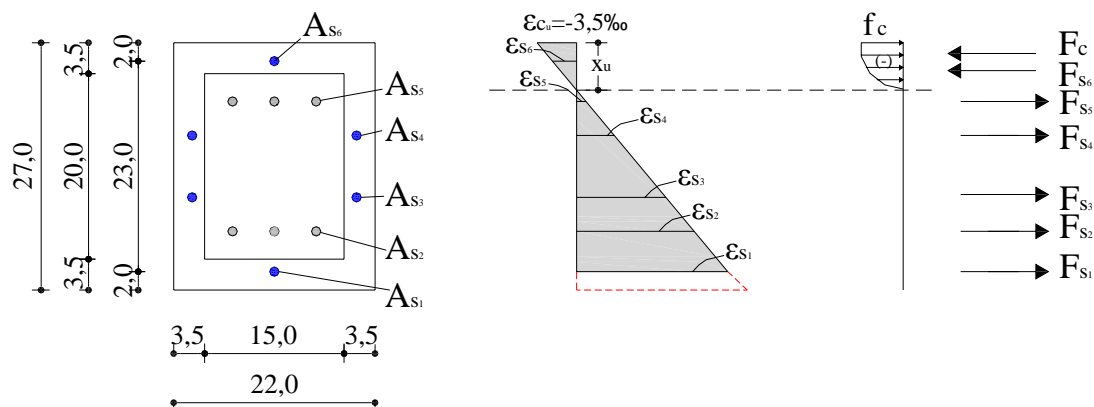
οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο των εφελκόμενων οπλισμών κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4 σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = 2 \cdot \frac{M_u}{L} = 2 \cdot \frac{47,4}{0,61} = 155,4 \text{ kN}$$

4.3 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικό πλέγμα T131

4.3.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.3 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της δοκού ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Γίνεται η υπόθεση ότι ο μανδύας αποτελείται από σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή ίδια με εκείνη της αρχικής δοκού ($f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$), προκειμένου να εκτιμηθεί η διαφορά στη μέγιστη καμπτική αντοχή της ενισχυμένης δοκού από την αντικατάσταση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα. Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u των δοκών στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέουν οι εφελκόμενοι οπλισμοί A_{s1} , A_{s2} , A_{s3} , και A_{s4} , δεν διαρρέει ο εφελκόμενος A_{s5} και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος A_{s6} :

$$F_c + F_{s6} = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} \Rightarrow$$

$$0,8 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s6} \cdot f_{s6} = A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} + A_{s4} \cdot f_{s4} + A_{s5} \cdot f_{s5} \Leftrightarrow$$

$$0,8 \cdot 28,12 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u + 0,196 \cdot 0,0035 \cdot \frac{x_u - 0,02}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 = 0,196 \cdot 50 + 2,36 \cdot 55 + 0,39 \cdot 50 +$$

$$+ 0,39 \cdot 50 + 2,36 \cdot 0,0035 \cdot \frac{0,07 - x_u}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 \Leftrightarrow$$

$$x_u = 0,049 \text{ m} \text{ ή } 4,9 \text{ cm}$$

$$M_u = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,416 \cdot x_u \right) + F_{s6} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_6 \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) + F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) -$$

$$F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) - F_{s5} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_5 \right) \Leftrightarrow$$

$$M_u = 32,8 \text{ kNm}$$

όπου: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , F_{s4} , F_{s5} , οι δυνάμεις των εφελκόμενων οπλισμών στην αστοχία
 F_{s6} , η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού
 F_c , η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία
 $A_{s1} = 0,196 \text{ cm}^2$ (1Ø5), $A_{s2} = A_{s5} = 2,36 \text{ cm}^2$ (3Ø10), $A_{s3} = A_{s4} = 0,39 \text{ cm}^2$ (2Ø5) το
εμβαδόν των εφελκόμενων οπλισμών
 $A_{s6} = 0,196 \text{ cm}^2$ το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού (1Ø5)
 $f_{s1} = f_{s3} = f_{s4} = 500 \text{ MPa}$, η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα του πλέγματος
T131
 $f_{s2} = 550 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από
εργαστηριακές δοκιμές
 f_{s5} , η τάση του εφελκόμενου οπλισμού στην αστοχία
 f_{s6} , η τάση του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία
 $f_{cm} = 28,12 \text{ MPa}$ η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
 $E_s = 200 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού
 $d = 25 \text{ cm}$ το στατικό ύψος της δοκού
 $d_1 = d_6 = 2 \text{ cm}$
 $d_2 = d_5 = 7 \text{ cm}$
 $d_3 = d_4 = 10,5 \text{ cm}$
 $h = 27 \text{ cm}$ το ύψος της δοκού
 $b = 22 \text{ cm}$ το πλάτος της δοκού

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 14,4 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{h - d_2 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 10,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{h - d_3 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 8,3 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d_4 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 4,0 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d_5 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 1,5 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s6} = \frac{x_u - d_6}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 2,1 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

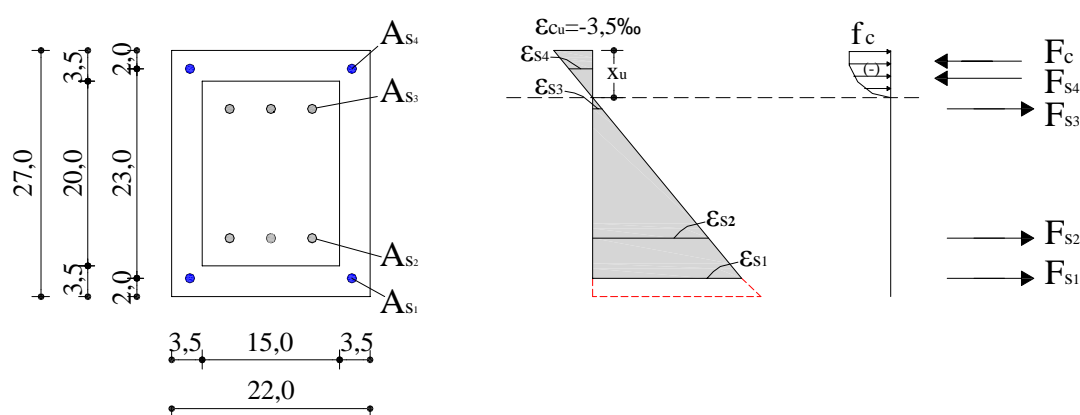
οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο των εφελκόμενων οπλισμών κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4-σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = 2 \cdot \frac{M_u}{L} = 2 \cdot \frac{32,8}{0,61} = 107,5 \text{ kN}$$

4.4 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής 90 MPa

4.4.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.4 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της δοκού ενισχυμένη με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Γίνεται η υπόθεση ότι ο μανδύας αποτελείται από συμβατικό σκυρόδεμα προκειμένου να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί καμπτική αντοχή της ενισχυμένης δοκού εφάμιλλη εκείνης που προσδίδει ο μανδύας με το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα. Από τις εξισώσεις ισορροπίας - ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u των δοκών στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέει ο εφελκόμενος οπλισμός και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος.

$$F_c + F_{s4} = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} \Rightarrow$$

$$0,8 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot 0,7 \cdot x_u + A_{s4} \cdot f_{s4} = A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} \Leftrightarrow$$

$$0,8 \cdot 90 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot 0,7 \cdot x_u + 1,57 \cdot 0,0026 \cdot \frac{x_u - 0,02}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 = 1,57 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 \Leftrightarrow$$

$$x_u = 0,029 \text{ m ή } 2,9 \text{ cm}$$

$$M_u = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,35 \cdot x_u\right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) \Leftrightarrow$$

$$M_u = 54,0 \text{ kNm}$$

όπου: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , οι δυνάμεις των εφελκόμενων οπλισμών στην αστοχία

F_{s4} , η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

F_c , η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

$A_{s1} = 1,57 \text{ cm}^2$ ($2\varnothing 10$) και $A_{s2} = A_{s3} = 2,36 \text{ cm}^2$ ($3\varnothing 10$), το εμβαδόν των εφελκόμενων οπλισμών

$A_{s4} = 1,57 \text{ cm}^2$, το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού ($2\varnothing 10$)

$f_{s1} = f_{s2} = f_{s3} = 550 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές

f_{s4} , η τάση του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

$f_{ck} = 90 \text{ MPa}$, η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του σκυροδέματος

$E_s = 200 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

$d = 25 \text{ cm}$ το στατικό ύψος της δοκού

$d_1 = d_4 = 2 \text{ cm}$

$d_2 = d_3 = 7 \text{ cm}$

$h = 27 \text{ cm}$ το ύψος της δοκού

$b = 22 \text{ cm}$ το πλάτος της δοκού

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 2,6 \text{ ‰} = 19,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{h - d_2 - x_u}{x_u} \cdot 2,6 \text{ ‰} = 15,3 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d_3 - x_u}{x_u} \cdot 2,6 \text{ ‰} = 3,7 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{x_u - d_4}{x_u} \cdot 2,6 \text{ ‰} = 0,8 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

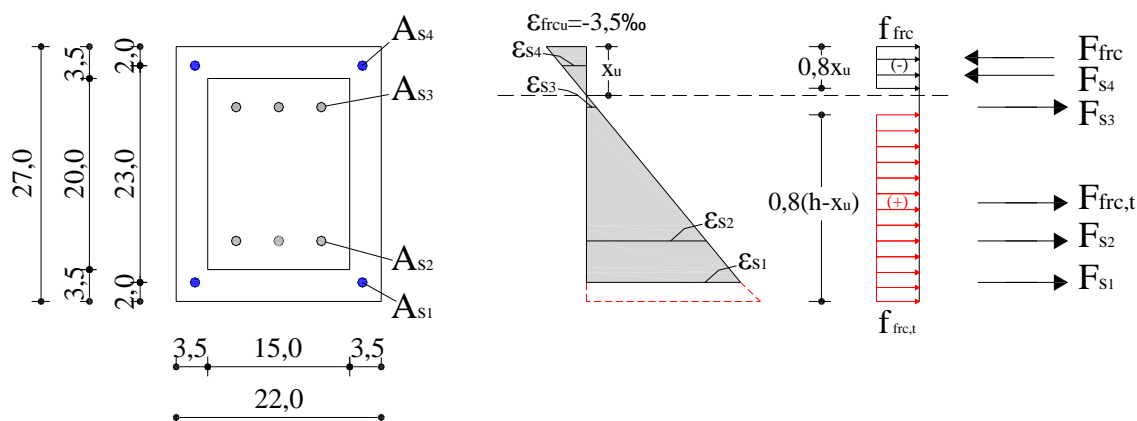
οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο των εφελκόμενων οπλισμών κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4-σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = 2 \cdot \frac{M_u}{L} = 2 \cdot \frac{53,5}{0,61} = 175,4 \text{ kN}$$

4.5 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό Φ10

4.5.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.5 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της δοκού ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και διαμήκη οπλισμό στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u της δοκού στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέουν οι εφελκόμενοι οπλισμοί A_{s1} , A_{s2} και A_{s3} και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος A_{s4} . Θεωρείται ορθογωνική κατανομή των εφελκυστικών τάσεων του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στο 80% του ύψους του εφελκόμενου τμήματος της διατομής και η ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ίση με 3,5‰. Έστω ύψος θλιβόμενης ζώνης $x_u \leq 3,5$ cm.

$$\begin{aligned}
 F_{frc} + F_{s4} &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{frct1} + F_{frct2} + F_{frct3} + F_{frct4} \Rightarrow \\
 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot b \cdot x_u + A_{s4} \cdot f_{s4} &= A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot b_c \cdot h_j + \\
 + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot (h - x_u) \cdot b_j &+ 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot (h - x_u) \cdot b_j + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot (h_j - x_u) \cdot b_c \Leftrightarrow \\
 0,8 \cdot 73,14 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u + 1,57 \cdot 0,0035 \cdot \frac{x_u - 0,02}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 &= 1,57 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 + \\
 + 0,48 \cdot 7,3 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,035 + 2 \cdot 0,48 \cdot 7,3 \cdot 10^3 \cdot (0,27 - x_u) \cdot 0,035 &+ 0,48 \cdot 7,3 \cdot 10^3 \cdot (0,035 - x_u) \cdot 0,15 \Leftrightarrow \\
 x_u &= 0,031 \text{ m ή } 3,1 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_u &= F_{frc} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot x_u \right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) + \\
 + F_{frct1} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot h_j \right] &+ F_{frct2} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u) \right] + F_{frct3} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u) \right] - \\
 - F_{frct4} \cdot \left[\frac{h}{2} - x_u - 0,4 \cdot (h_j - x_u) \right] &\Leftrightarrow \\
 M_u &= 67,29 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

όπου: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , οι δυνάμεις των εφελκόμενων οπλισμών στην αστοχία
 F_{s4} , η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού
 F_{frc} , η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία
 F_{frct1} , F_{frct2} , F_{frct3} , F_{frct4} η εφελκυστική δύναμη του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στην αστοχία
 $A_{s1} = 1,57 \text{ cm}^2$ ($2\emptyset 10$) και $A_{s2} = A_{s3} = 2,36 \text{ cm}^2$ ($3\emptyset 10$), το εμβαδόν των εφελκόμενων οπλισμών
 $A_{s4} = 1,57 \text{ cm}^2$ το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού ($2\emptyset 10$)
 $f_{s1} = f_{s2} = f_{s3} = 550 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές
 f_{s4} , η τάση του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία
 $f_{frcm} = 73,14 \text{ MPa}$, η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών
 $f_{frcm} = 7,3 \text{ MPa}$, το 90% της μέσης εφελκυστική αντοχής του τσιμεντοκονιάματος σε διάρρηξη κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών
 $E_s = 200 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού
 $d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού
 $d_1 = d_4 = 2 \text{ cm}$
 $d_2 = d_3 = 7 \text{ cm}$
 $h = 27 \text{ cm}$, το ύψος της δοκού
 $h_c = 20 \text{ cm}$, το ύψος της αρχικής δοκού
 $b = 22 \text{ cm}$, το πλάτος της δοκού
 $b_c = 15 \text{ cm}$, το πλάτος της αρχικής δοκού
 $h_j = b_j = 3,5 \text{ cm}$, το πάχος περιμετρικά του μανδύα

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 24,7 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{h - d_2 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 16,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d_3 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 4,4 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{x_u - d_4}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 1,2 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο των εφελκόμενων οπλισμών κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4-σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = 2 \cdot \frac{M_u}{L} = 2 \cdot \frac{67,29}{0,61} = 220,6 \text{ kN}$$

4.5.2 - Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης & διαρροής διαμήκους οπλισμού

α) Αρηγμάτωση διατομή (φάση I)

Το φορτίο ρηγμάτωσης εκτιμάται με τη μέθοδο της ισοδύναμης διατομής. Η ροπή αδράνειας είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n-1) \cdot A_{s1} \cdot (x_I - 7)^2 + (n-1) \cdot A_{s2} \cdot (x_I - 7)^2 + (n-1) \cdot A_{s3} \cdot (x_I - 2)^2 + (n-1) \cdot A_{s4} \cdot (x_I - 2)^2 + n_j \cdot \frac{b \cdot h^3 - b_c \cdot h_c^3}{12} \Leftrightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 5,4 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 5,4 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 5,4 \cdot 1,57 \cdot (13,5 - 2)^2 + 5,4 \cdot 1,57 \cdot (13,5 - 2)^2 + 1,3 \cdot \frac{22 \cdot 27^3 - 15 \cdot 20^3}{12} \Leftrightarrow$$

$$I_I = 47230 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης εκτιμάται:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{y_t} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,25 \cdot 47230}{27 - 13,5} = 7,87 \text{ kNm}$$

όπου $f_{ctm} = 2,25 \text{ MPa}$, το 90% της μέσης εφελκυστική αντοχής του σκυροδέματος σε διάρρηξη κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

Το φορτίο ρηγμάτωσης στο μέσο του ανοίγματος της δοκού για κάμψη 4-σημείων είναι:

$$P_{cr} = 2 \cdot \frac{7,87}{0,61} = 25,8 \text{ kN}$$

όπου: $\eta = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{31,4} = 6,4$, ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

προς του συμβατικού σκυροδέματος

$$\eta_j = \frac{E_{frc}}{E_c} = \frac{41,12}{31,4} = 1,3, \text{ ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του ινοπλισμένου}$$

τσιμεντοκονιάματος προς του συμβατικού σκυροδέματος

$$E_{frc} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 9,5 \cdot (73,14 + 8)^{1/3} = 41,12 \text{ ΜΡα το μέτρο ελαστικότητας του}$$

ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

β) Ρηγματωμένη διατομή (φάση II)

Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή M_y της δοκού στη διαρροή υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_{frc} + F_{s4} &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{frct1} + F_{frct2} + F_{frct3} \Rightarrow \\ \alpha \cdot f_{frcm} \cdot b \cdot x_y + A_{s4} \cdot f_{s4} &= A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} + 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot b_c \cdot h_j + \\ &+ 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot (h - x_y) b_j + 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot (h - x_y) b_j \Leftrightarrow \\ \alpha \cdot 73,14 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_y + 1,57 \cdot \varepsilon_{s4} \cdot 200 \cdot 10^2 &= 1,57 \cdot 55 + 2,36 \cdot 55 + 2,36 \cdot \varepsilon_{s3} + \\ &+ 18,25 + 120,96 \cdot (h - x_y) b_j + 120,96 \cdot (h - x_y) b_j \quad (1) \end{aligned}$$

$$\frac{x_y}{\varepsilon_{cy}} = \frac{d - x_y}{0,00275} \Rightarrow x_y = \frac{0,25 \cdot \varepsilon_{cy}}{0,00275 + \varepsilon_{cy}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{x_u - d_4}{x_u} \cdot \varepsilon_{cy} = \frac{x_u - 2}{x_u} \cdot \varepsilon_{cy}$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \varepsilon_{cy} \cdot (6 - \varepsilon_{cy}) \quad (3)$$

$$k_a = \frac{8 - \varepsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \varepsilon_{cy})} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{yk} = 2,75\text{‰}$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος των εξισώσεων δίνει:

$$\varepsilon_{cy} = 0,75\text{‰}$$

$$\alpha = 0,328$$

$$x_y = 5,4 \text{ cm}$$

$$k_a = 0,345$$

Η τιμή της καμπτικής ροπής για αρχική διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού είναι:

$$\begin{aligned}
M_y &= F_{frctm} \cdot \left(\frac{h}{2} - k_a \cdot x_y\right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) + F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) + \\
&+ 0,9 \cdot F_{frct1} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot h_j\right) + 0,9 \cdot F_{frct2} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_y)\right] + 0,9 \cdot F_{frct3} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_y)\right] \Leftrightarrow \\
M_u &= 62,5 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

και συνεπώς το συνολικό φορτίο της δοκού στο μέσο του ανοίγματος εκτιμάται ότι είναι:

$$P_y = 2 \cdot \frac{62,5}{0,61} = 204,9 \text{ kN}$$

4.5.3 - Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση

Οι υπολογισμοί των αντοχών σε διάτμηση έγιναν με βάση τον ΕΚΩΣ 2000. Η αντοχή της ενισχυμένης δοκού σε τέμνουσα είναι:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd} + V_{Rd1,frc} + V_{wd,frc}$$

όπου: V_{Rd1} , η αντοχή σε τέμνουσα της αρχικής δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

V_{wd} , η αντοχή σε τέμνουσα του εγκάρσιου οπλισμού της αρχικής δοκού

$V_{Rd1,frc}$, η αντοχή σε τέμνουσα του μανδύα χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

$V_{wd,frc}$, η αντοχή σε τέμνουσα του εγκάρσιου οπλισμού του μανδύα

Η αντοχή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε τέμνουσα εκτιμάται ως:

$$V_{Rd1,frc} = \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,20 + 40 \cdot \rho_\ell) \cdot b \cdot d - b_c \cdot d_c \approx 100,73 \text{ kN}$$

όπου: $\tau_{Rd,frc} = 0,25 \cdot f_{frctm} = 0,25 \cdot 7,3 = 1,82 \text{ MPa}$, η διατμητική αντοχή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος έναντι ρηγματώσεως

$$\rho_\ell = \frac{A_s}{b \cdot d} \leq 0,02 \Rightarrow \frac{6,29 \cdot 10^{-4}}{0,22 \cdot 0,25} = 0,011 \leq 0,02 \quad \text{το ποσοστό του διαμήκη}$$

εφελκυσμένου οπλισμού

$k = (1,6 - d) = 1,35 \geq 1,0$, όπου d το στατικό ύψος σε m

$b = 22 \text{ cm}$, το πλάτος της ενισχυμένης δοκού

$d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της ενισχυμένης δοκού

$b_c = 15 \text{ cm}$, το πλάτος της αρχικής δοκού

$d_c = 16,5 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της αρχικής δοκού

Η αντοχή των εγκάρσιων συνδετήρων σε τέμνουσα:

$$V_{wd,frc} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot 0,9 \cdot d = 118,35 \text{ kN}$$

όπου: $A_{sw} = 2 \cdot 0,50 = 1 \text{ cm}^2$ (ΣØ8/10 δίμητος), το εμβαδόν του κάθε συνδετήρα
 $s = 10 \text{ cm}$, η απόσταση των συνδετήρων
 $f_{ywk} = 526 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των συνδετήρων όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές
 $d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού

Άρα η συνολική αντοχή της ενισχυμένης δοκού τέμνουσα εκτιμάται:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd} + V_{Rd1,frc} + V_{wd,frc} = 103,68 + 219,08 = 322,76 \text{ kN}$$

Το μέγιστο συγκεντρωμένο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός στο μέσον της δοκού με βάση τον έλεγχο οριακής κατάστασης έναντι τέμνουσας είναι:

$$P_u = 2 \cdot V_{sd} = 2 \cdot 322,76 = 645,52 \text{ kN}$$

Η αντοχή της δοκού έναντι διαγώνιας θλίψης του σκυροδέματος ($\theta=45^\circ$):

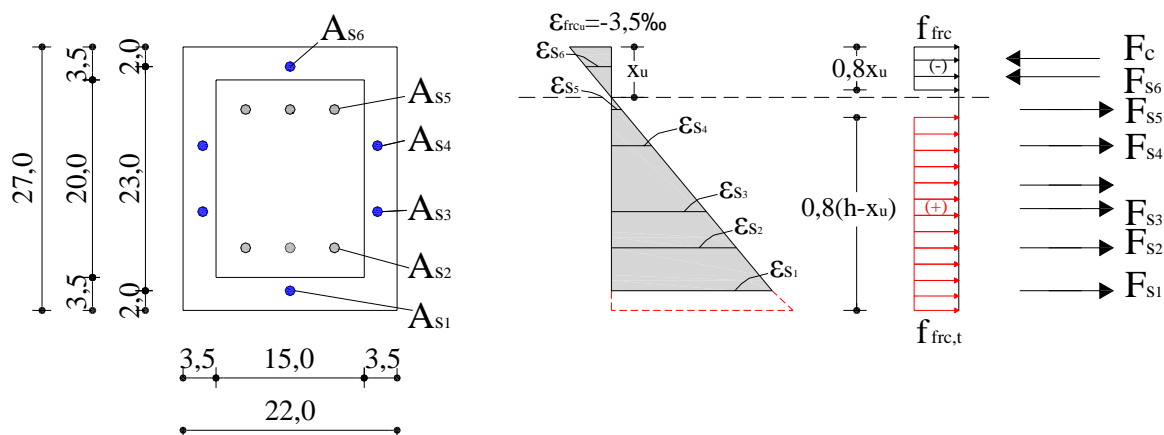
$$V_{Rd2} = V_{Rd2,c} + V_{Rd2,frc} = 180,7 + \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{frcm} \cdot 0,9 \cdot (b \cdot d - b_c \cdot d_c) = 180,7 + 497,8 = 678,5 \text{ kN}$$

$$\text{όπου: } v = 0,70 - \frac{f_{frcm}}{200} = 0,33 \Rightarrow v = 0,50$$

$f_{frcm} = 73,14 \text{ MPa}$, η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του τσιμεντοκονιάματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

4.6 - Συμβατικά οπλισμένη δοκός ενισχυμένη με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και μεταλλικό πλέγμα T131

4.6.1 - Καμπτική ροπή αντοχής



Σχήμα 4.6 - Διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή της δοκού ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και μεταλλικό πλέγμα στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κάμψης.

Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_u και η μέγιστη καμπτική ροπή M_u της δοκού στην αστοχία. Θεωρείται ότι διαρρέουν οι εφελκόμενοι οπλισμοί A_{s1} , A_{s2} , A_{s3} , A_{s4} και A_{s5} και ότι δεν διαρρέει ο θλιβόμενος A_{s6} . Θεωρείται ορθογωνική κατανομή των εφελκυστικών τάσεων του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στο 80% του ύψους του εφελκόμενου τμήματος της διατομής και η ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ίση με 3,5‰. Έστω ύψος θλιβόμενης ζώνης $x_u \leq 3,5$ cm.

$$\begin{aligned}
 F_{frc} + F_{s6} &= F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{frct1} + F_{frct2} + F_{frct3} + F_{frct4} \Rightarrow \\
 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot b \cdot x_u + A_{s6} \cdot f_{s6} &= A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} + A_{s4} \cdot f_{s4} + A_{s5} \cdot f_{s5} + \\
 + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot b_c \cdot h_j &+ 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot (h - x_u) b_j + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot (h - x_u) b_j + \\
 + 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frctm} \cdot (h_j - x_u) b_c &\Leftrightarrow \\
 0,8 \cdot 73,14 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u &+ 0,196 \cdot 0,0035 \cdot \frac{x_u - 0,02}{x_u} \cdot 200 \cdot 10^2 = 0,196 \cdot 50 + 2,36 \cdot 55 + 0,39 \cdot 50 + \\
 + 0,39 \cdot 50 + 2,36 \cdot 55 &+ 0,48 \cdot 8,05 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,035 + 0,48 \cdot 8,05 \cdot 10^3 \cdot (0,27 - x_u) 0,07 + \\
 + 0,48 \cdot 8,05 \cdot 10^3 \cdot (0,035 - x_u) &0,15 \Leftrightarrow \\
 x_u &= 0,03 \text{ m ή } 3,0 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$M_u = F_{frc} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot x_u \right) + F_{s6} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_6 \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) + F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) - F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) - F_{s5} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_5 \right) + F_{frct1} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot h_j \right] + F_{frct2} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u) \right] + F_{frct3} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u) \right] - F_{frct4} \cdot \left[\frac{h}{2} - x_u - 0,4 \cdot (h_j - x_u) \right] \Leftrightarrow$$

$$M_u = 54,76 \text{ kNm}$$

όπου: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , F_{s4} , F_{s5} , οι δυνάμεις των εφελκόμενων οπλισμών την στιγμή της αστοχίας

F_{s6} , η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού

F_{frc} , η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

F_{frct1} , F_{frct2} , F_{frct3} , F_{frct4} , η εφελκυστική δύναμη του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος στην αστοχία

$A_{s1} = 0,196 \text{ cm}^2$ (1Ø5), $A_{s2} = A_{s5} = 2,36 \text{ cm}^2$ (3Ø10), $A_{s3} = A_{s4} = 0,39 \text{ cm}^2$ (2Ø5) το εμβαδόν των εφελκόμενων οπλισμών

$A_{s6} = 0,196 \text{ cm}^2$ το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού (1Ø5)

$f_{s1} = f_{s3} = f_{s4} = 500 \text{ MPa}$, η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα του πλέγματος T131

$f_{s2} = f_{s5} = 550 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των οπλισμών όπως προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές

f_{s6} , η τάση του θλιβόμενου οπλισμού την στιγμή στην αστοχία

$f_{frcm} = 73,14 \text{ MPa}$, η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του ινοπλισμένου κονιάματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

$f_{frctm} = 7,3 \text{ MPa}$, το 90% της μέσης εφελκυστική αντοχής του τσιμεντοκονιάματος σε διάρρηξη ($8,11 \cdot 0,9 = 7,3 \text{ MPa}$) κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

$E_s = 200 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

$d = 25 \text{ cm}$ το στατικό ύψος της δοκού

$d_1 = d_6 = 2 \text{ cm}$

$d_2 = d_5 = 7 \text{ cm}$

$d_3 = d_4 = 10,5 \text{ cm}$

$h = 27 \text{ cm}$ το ύψος της διατομής της δοκού

$h_c = 20 \text{ cm}$ το ύψος της διατομής της αρχικής δοκού

$b = 22 \text{ cm}$ το πλάτος της δοκού

$b_c = 15 \text{ cm}$ το πλάτος της αρχικής δοκού

$h_j = b_j = 3,5 \text{ cm}$ το πάχος περιμετρικά του μανδύα

Η παραμόρφωση του εφελκόμενου και του θλιβόμενου οπλισμού τη στιγμή της αστοχίας είναι:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 25,7 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{h - d_2 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 19,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{h - d_3 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 15,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d_4 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 8,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d_5 - x_u}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 4,7 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s6} = \frac{x_u - d_6}{x_u} \cdot 3,5 \text{ ‰} = 1,2 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,75 \text{ ‰}$$

οι οποίες επαληθεύουν την αρχική υπόθεση για διαρροή μόνο των εφελκόμενων οπλισμών κατά την αστοχία.

Το μέγιστο συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4-σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_u = 2 \cdot \frac{M_u}{L} = 2 \cdot \frac{54,76}{0,61} = 179,54 \text{ kN}$$

4.6.2 - Υπολογισμός ροπών ρηγμάτωσης & διαρροής διαμήκους οπλισμού

α) Αρηγμάτωση διατομή (φάση I)

Το φορτίο ρηγμάτωσης εκτιμάται με τη μέθοδο της ισοδύναμης διατομής. Η ροπή αδράνειας της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n-1) \cdot A_{s1} \cdot (x_I - 7)^2 + (n-1) \cdot A_{s2} \cdot (x_I - 7)^2 + (n-1) \cdot A_{s3} \cdot (x_I - 2)^2 + (n-1) \cdot A_{s4} \cdot (x_I - 2)^2 + n_j \cdot \frac{b \cdot h^3 - b_c \cdot h_c^3}{12} \Leftrightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 5,4 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 5,4 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 +$$

$$+ 5,4 \cdot 0,196 \cdot (13,5 - 2)^2 + 2 \cdot 5,4 \cdot 0,39 \cdot (13,5 - 10,5)^2 + 1,3 \cdot \frac{22 \cdot 27^3 - 15 \cdot 20^3}{12} \Leftrightarrow$$

$$I_I = 45028 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης εκτιμάται:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{y_t} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,25 \cdot 45028}{27 - 13,5} = 7,50 \text{ kNm}$$

όπου $f_{ctm} = 2,25 \text{ MPa}$, το 90% της μέσης εφελκυστική αντοχής του σκυροδέματος σε διάρρηξη κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

Το συνολικό φορτίο ρηγμάτωσης στο μέσο του ανοίγματος της δοκού για κάμψη 4-σημείων είναι:

$$P_{cr} = 2 \cdot \frac{7,50}{0,61} = 24,59 \text{ kN}$$

όπου: $\eta = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{31,4} = 6,4$, ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού

προς του συμβατικού σκυροδέματος

$\eta_j = \frac{E_{frc}}{E_c} = \frac{41,12}{31,4} = 1,3$, ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του ινοπλισμένου

τσιμεντοκονιάματος προς του συμβατικού σκυροδέματος

$E_{frc} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 9,5 \cdot (73,14 + 8)^{1/3} = 41,12 \text{ MPa}$ το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

β) Ρηγματωμένη διατομή (φάση II)

Από τις εξισώσεις ισορροπίας-ισοδυναμίας εσωτερικών δυνάμεων και εξωτερικών εντατικών μεγεθών το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή M_y της δοκού στη διαρροή υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_{frc} + F_{s6} = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{frct1} + F_{frct2} + F_{frct3} + F_{frct4} \Rightarrow$$

$$\alpha \cdot f_{frcm} \cdot b \cdot x_y + A_{s6} \cdot f_{s6} = A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} + A_{s3} \cdot f_{s3} + A_{s4} \cdot f_{s4} + A_{s5} \cdot f_{s5} +$$

$$+ 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot b_c \cdot h_j + 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \cdot f_{frcm} \cdot (h - x_y) \cdot b_j \Leftrightarrow$$

$$\alpha \cdot 73,14 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_y + 0,196 \cdot \varepsilon_{s6} \cdot 200 \cdot 10^2 = 0,39 \cdot 50 + 2,36 \cdot 55 + 0,39 \cdot 50 + 2,36 \cdot \varepsilon_{s5} +$$

$$+ 18,25 + 120,96 \cdot (h - x_y) \cdot b_j + 120,96 \cdot (h - x_y) \cdot b_j \quad (1)$$

$$\frac{x_y}{\varepsilon_{cy}} = \frac{d - x_y}{0,00275} \Rightarrow x_y = \frac{0,25 \cdot \varepsilon_{cy}}{0,00275 + \varepsilon_{cy}} \quad \text{2)}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{x_u - d_4}{x_u} \cdot \varepsilon_{cy} = \frac{x_u - 2}{x_u} \cdot \varepsilon_{cy}$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \varepsilon_{cy} \cdot (6 - \varepsilon_{cy}) \quad \text{3)}$$

$$k_a = \frac{8 - \varepsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \varepsilon_{cy})} \quad \text{4)}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{s3} = \varepsilon_{s4} = \varepsilon_{yk} = 2,75\text{‰}$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος των εξισώσεων δίνει:

$$\varepsilon_{cy} = 0,68\text{‰}$$

$$\alpha = 0,305$$

$$x_y = 5,0 \text{ cm}$$

$$k_a = 0,343$$

Η τιμή της καμπτικής ροπής για αρχική διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού είναι:

$$\begin{aligned} M_y &= F_{frctm} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot x_u\right) + F_{s6} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_6\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) + F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) - F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) - \\ &- F_{s5} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_5\right) + F_{frct1} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot h_j\right) + F_{frct2} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u)\right] + F_{frct3} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u)\right] \Leftrightarrow \\ M_u &= 43,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

και συνεπώς το συνολικό φορτίο της δοκού σε φόρτιση κάμψης 4-σημείων εκτιμάται ότι είναι:

$$P_y = 2 \cdot \frac{43,7}{0,61} = 143,3 \text{ kN}$$

4.6.4 - Υπολογισμός αντοχής σε διάτμηση

Οι υπολογισμοί των αντοχών σε διάτμηση έγιναν με βάση τον ΕΚΩΣ 2000. Η αντοχή της ενισχυμένης δοκού σε τέμνουσα είναι:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd} + V_{Rd1,frc} + V_{wd,frc}$$

όπου: V_{Rd1} , η αντοχή σε τέμνουσα της αρχικής δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

V_{wd} , η αντοχή σε τέμνουσα του εγκάρσιου οπλισμού της αρχικής δοκού

$V_{Rd1,frc}$, η αντοχή σε τέμνουσα του μανδύα χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

$V_{wd,frc}$, η αντοχή σε τέμνουσα του εγκάρσιου σπλισμού του μανδύα

Η αντοχή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε τέμνουσα εκτιμάται ως:

$$V_{Rd1,frc} = \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,20 + 40 \cdot \rho_{\ell}) \cdot b \cdot d - b_c \cdot d_c = 98,82 \text{ kN}$$

όπου: $\tau_{Rd,frc} = 0,25 \cdot f_{frctm} = 0,25 \cdot 7,3 = 1,83 \text{ MPa}$, η διαμητική αντοχή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος έναντι ρηγματώσεως

$$\rho_{\ell} = \frac{A_s}{b \cdot d} \leq 0,02 \Rightarrow \frac{5,72 \cdot 10^{-4}}{0,22 \cdot 0,25} = 0,01 \leq 0,02 \text{ το ποσοστό του διαμήκη}$$

εφελκόμενου σπλισμού

$k = (1,6-d) = 1,35 \geq 1,0$, όπου d το στατικό ύψος σε m

$b = 22 \text{ cm}$, το πλάτος της ενισχυμένης δοκού

$d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της ενισχυμένης δοκού

$b_c = 15 \text{ cm}$, το πλάτος της αρχικής δοκού

$d_c = 16,5 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της αρχικής δοκού

Η αντοχή των εγκάρσιων συνδετήρων σε τέμνουσα:

$$V_{wd,frc} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot 0,9 \cdot d = 30,77 \text{ kN}$$

όπου: $A_{sw} = 2 \cdot 0,196 = 0,39 \text{ cm}^2$ ($\varnothing 5/15$ δίτητος), το εμβαδόν του κάθε συνδετήρα

$s = 15 \text{ cm}$, η απόσταση των συνδετήρων

$f_{ywk} = 500 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής των συνδετήρων

$d = 25 \text{ cm}$, το στατικό ύψος της δοκού

Άρα η συνολική αντοχή της ενισχυμένης δοκού σε τέμνουσα εκτιμάται:

$$V_{sd} = V_{Rd1} + V_{wd} + V_{Rd1,frc} + V_{wd,frc} = 103,68 + 129,59 = 233,27 \text{ kN}$$

Το μέγιστο συγκεντρωμένο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός στο μέσον της δοκού με βάση τον έλεγχο οριακής κατάστασης έναντι τέμνουσας είναι:


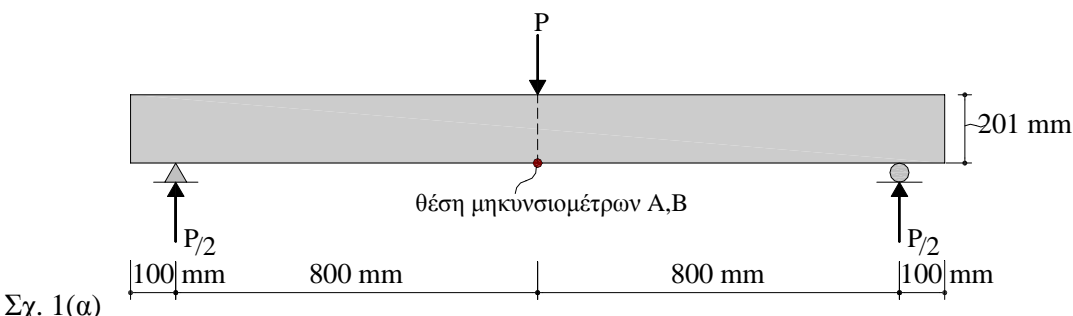
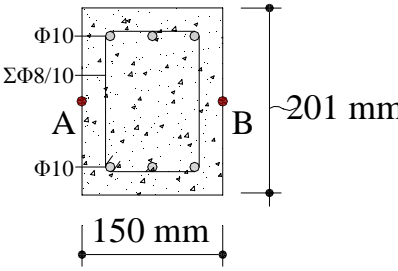
$$P_u = 2 \cdot V_{sd} = 2 \cdot 233,27 = 466,54 \text{ kN}$$

Η αντοχή της δοκού έναντι διαγώνιας θλίψης του σκυροδέματος ($\theta=45^\circ$):

$$V_{Rd2} = V_{Rd2,c} + V_{Rd2,frc} = 180,7 + \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{frcm} \cdot 0,9 \cdot b \cdot d - b_c \cdot d_c = 180,7 + 497,8 = 678,5 \text{ kN}$$

όπου: $v = 0,70 - \frac{f_{frcm}}{200} = 0,33 \Rightarrow v = 0,50$

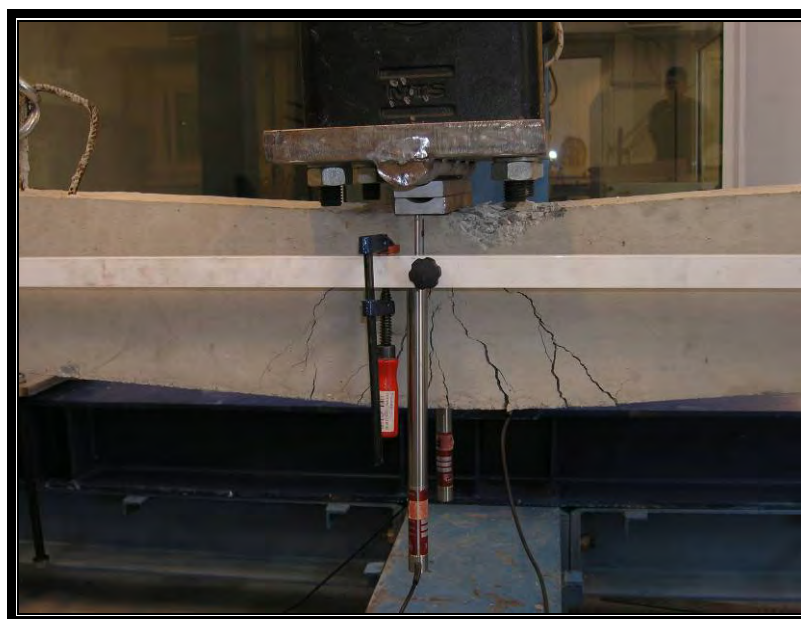
$f_{frcm} = 73,14$ MPa, η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου του τσιμεντοκονιάματος κατά την περίοδο της δοκιμής των δοκών

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	RC-1S-3B		
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 3 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	150	201
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	02-Νοε-06 ^(*)	05-Δεκ-06 02-Νοε-06 ^(*)
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	73,14 ^(*)	77,72 78,15 ^(*)
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	12-Οκτ-06		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			

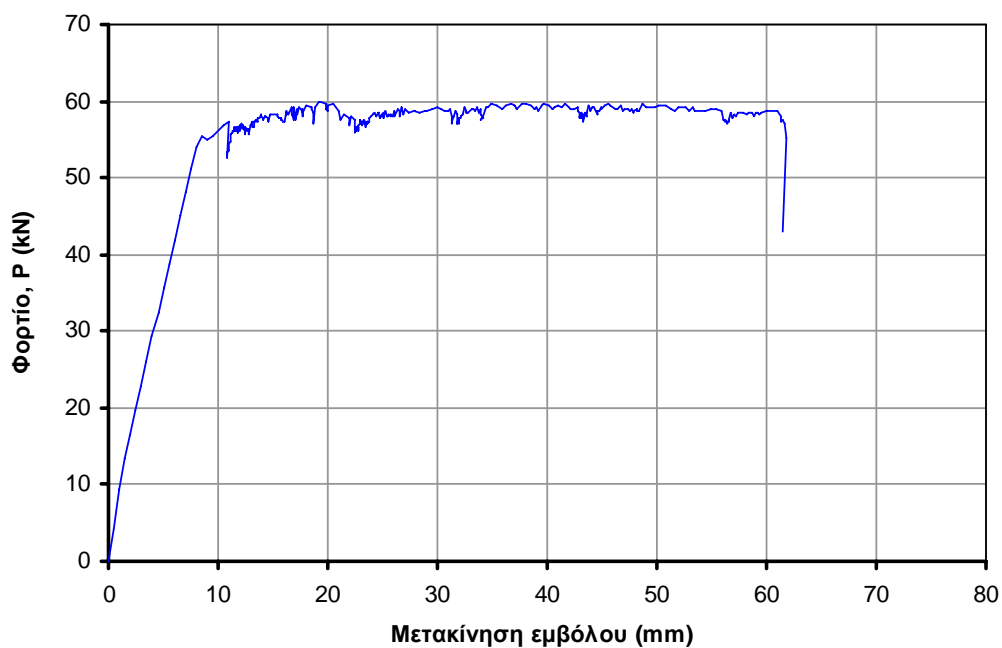
^(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



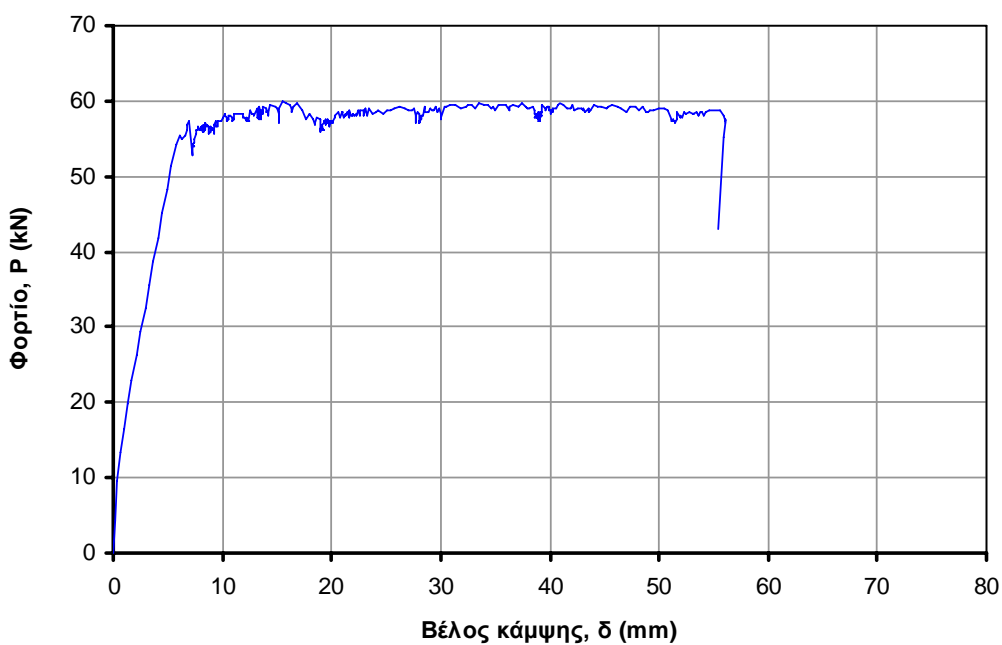
Σχήμα 2 - Δοκός RC-1S-3B.



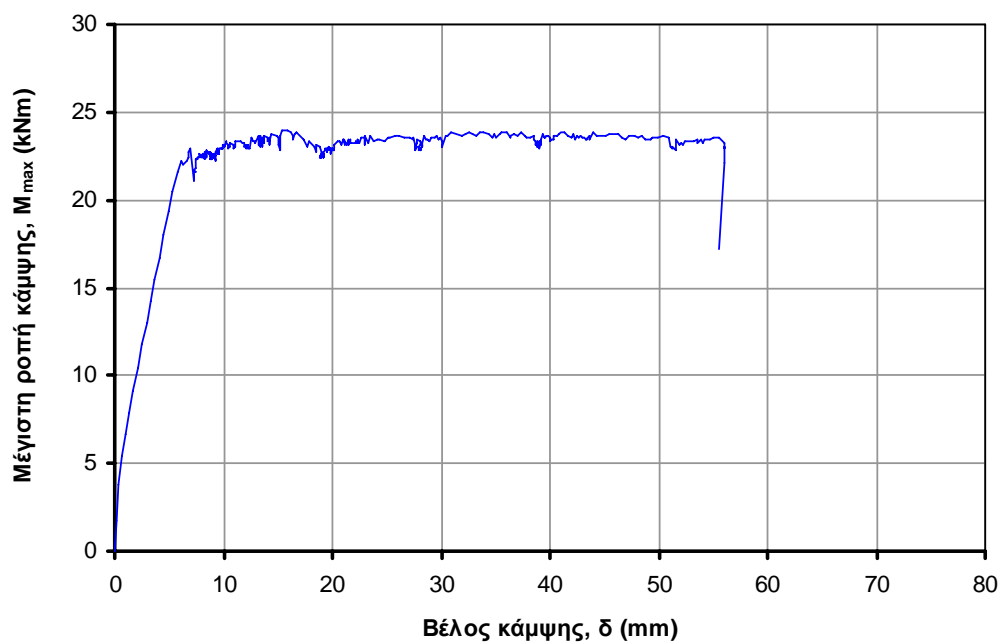
Σχήμα 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




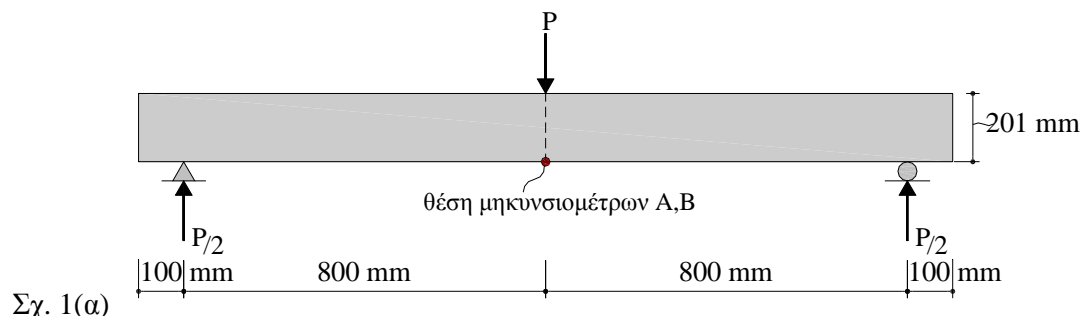
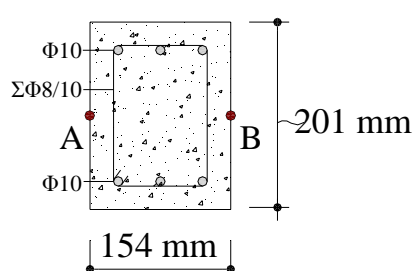
Σχήμα 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχήμα 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	RC-2S-3B		
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυροδέμα		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 3 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	154	201
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	02-Νοε-06 ^(*)	05-Δεκ-06 02-Νοε-06 ^(*)
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	73,14 ^(*)	77,72 78,15 ^(*)
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	16-Οκτ-06		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			

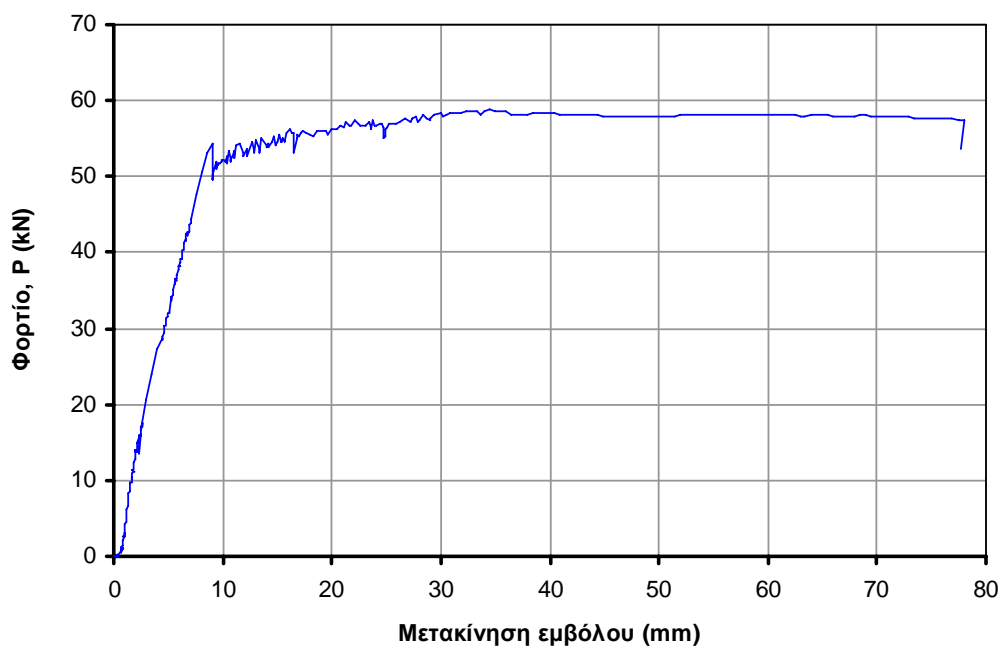
(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



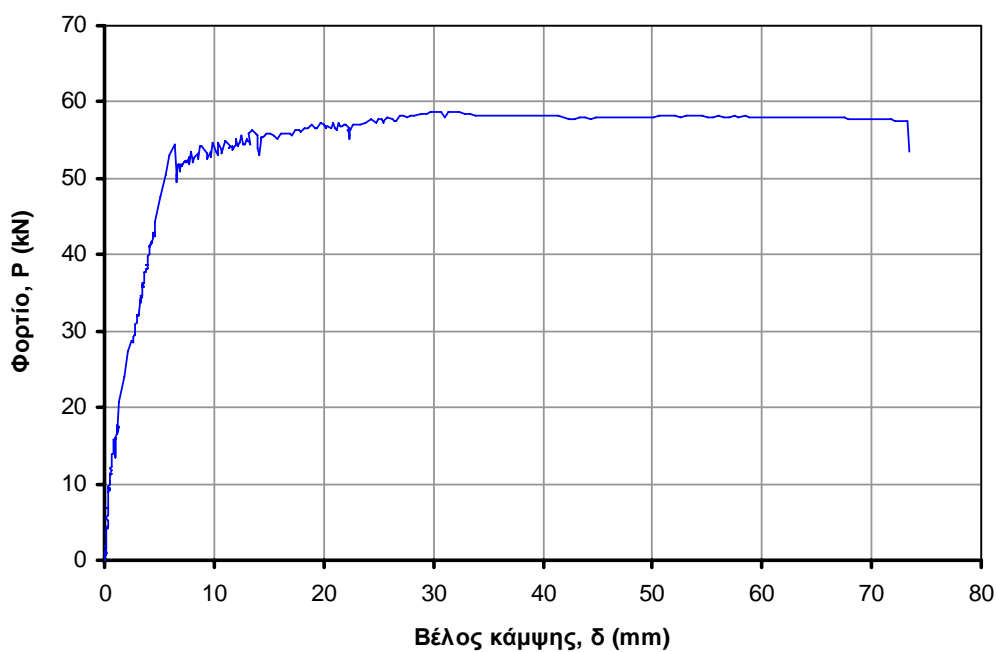
Σχήμα 2 - Δοκός RC-2S-3B.



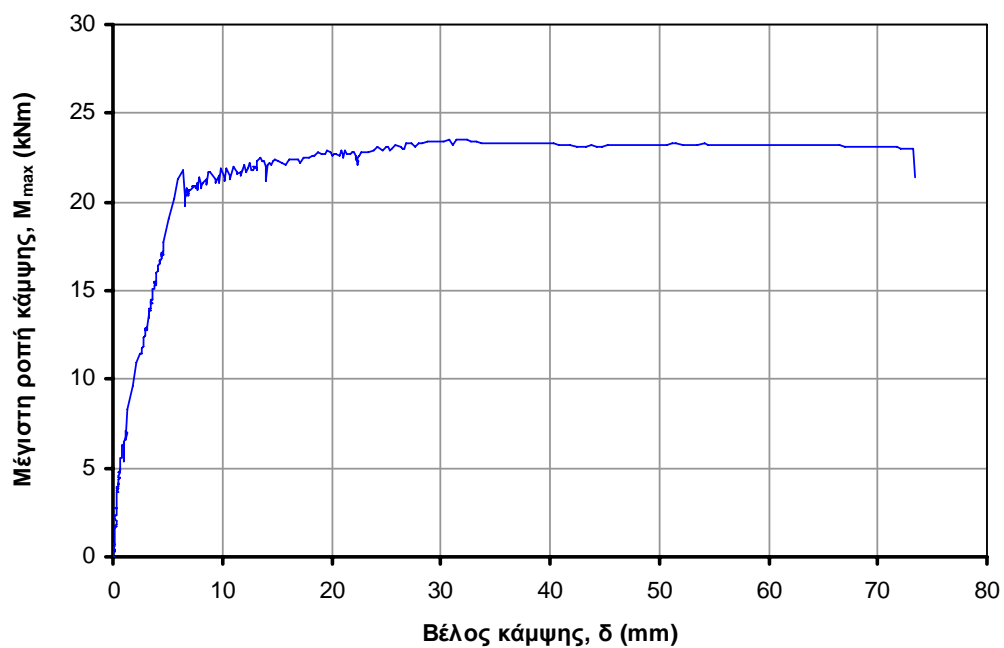
Σχήμα 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




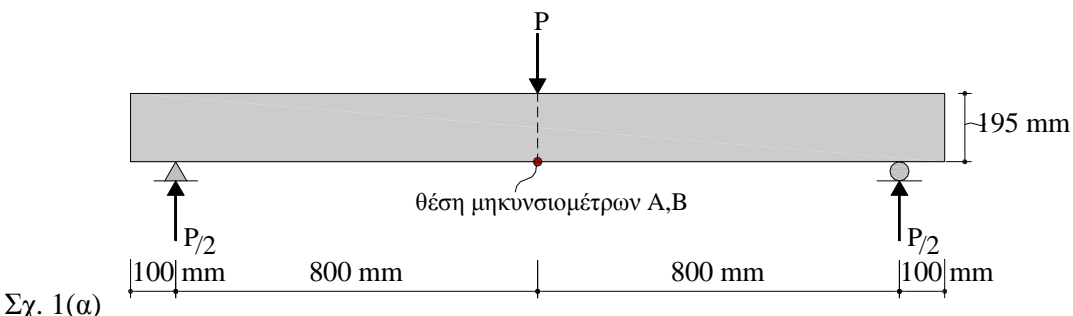
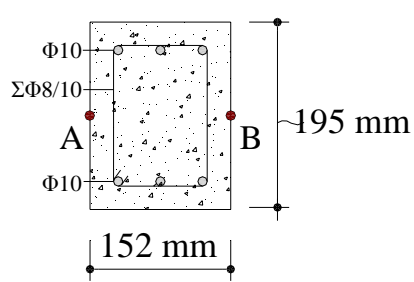
Σχήμα 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχήμα 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	RC-3S-3B		
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 3 σημείων αμφιέρειστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	152	195
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	02-Νοε-06 (*)	05-Δεκ-06 02-Νοε-06 (*)
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	73,14 (*)	77,72 78,15 (*)
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	19-ΟΚΤ-06		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			

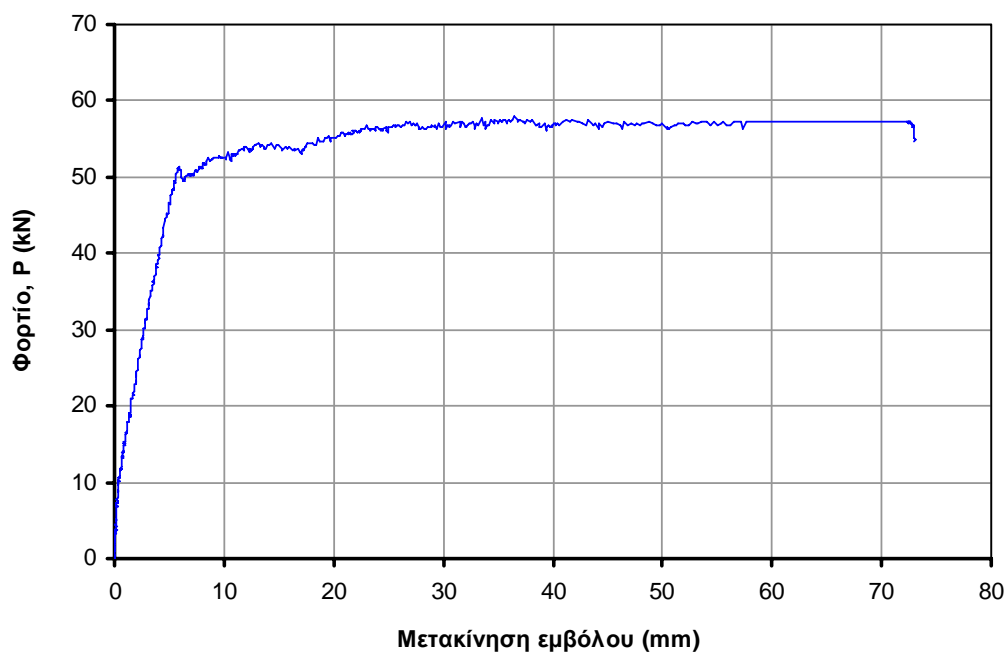
(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



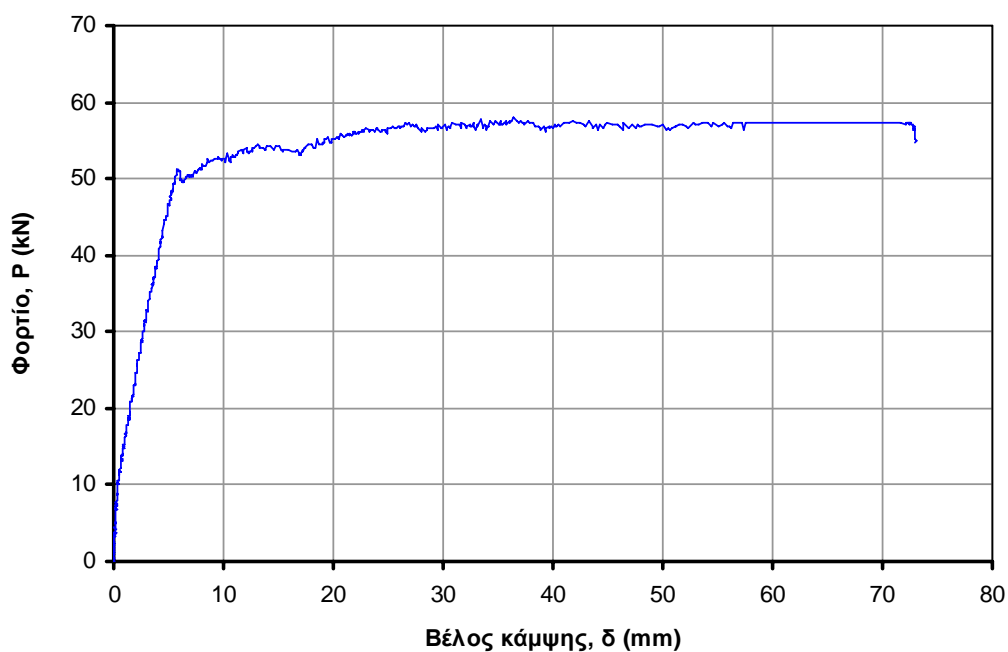
Σχήμα 2 - Δοκός RC-3S-3B.



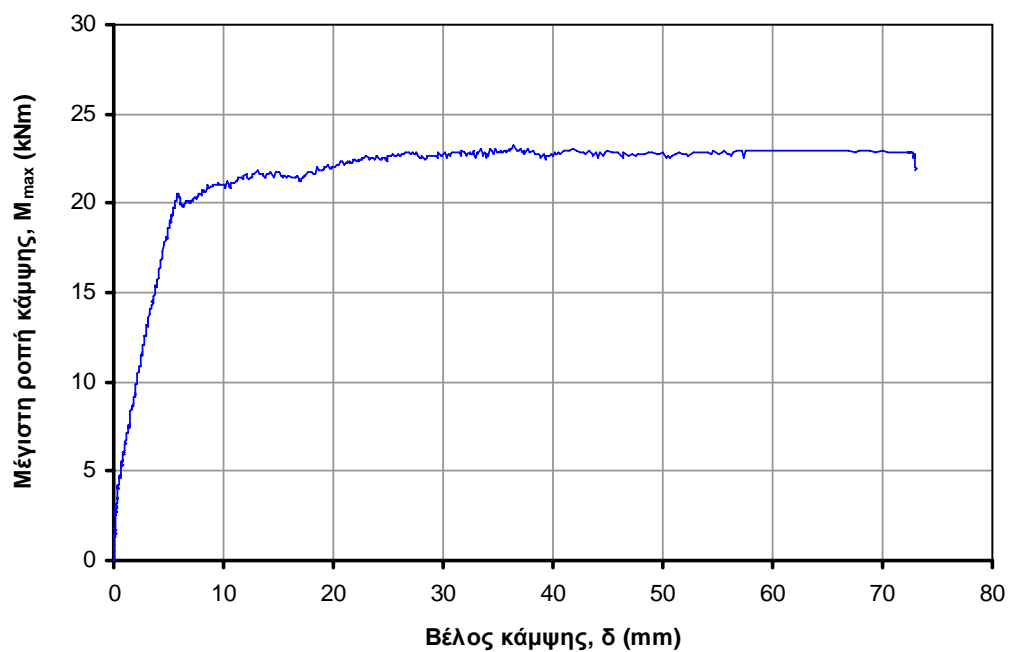
Σχήμα 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




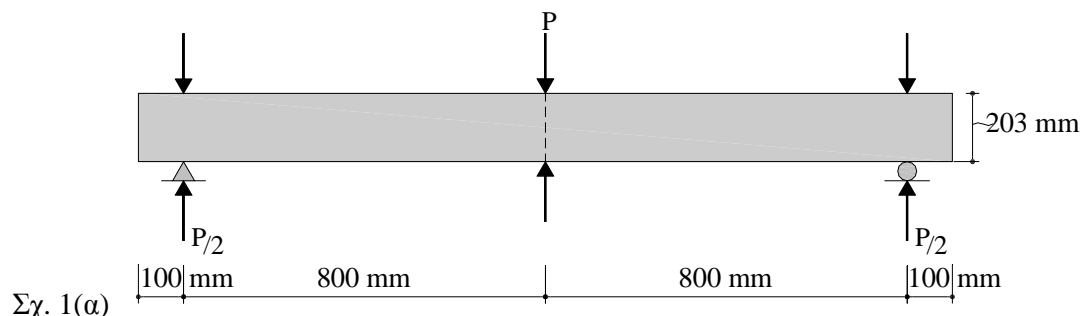
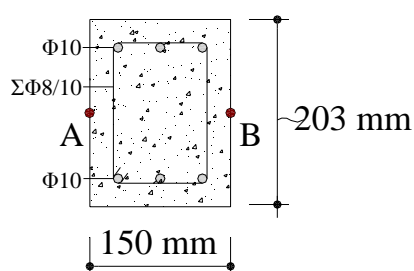
Σχήμα 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



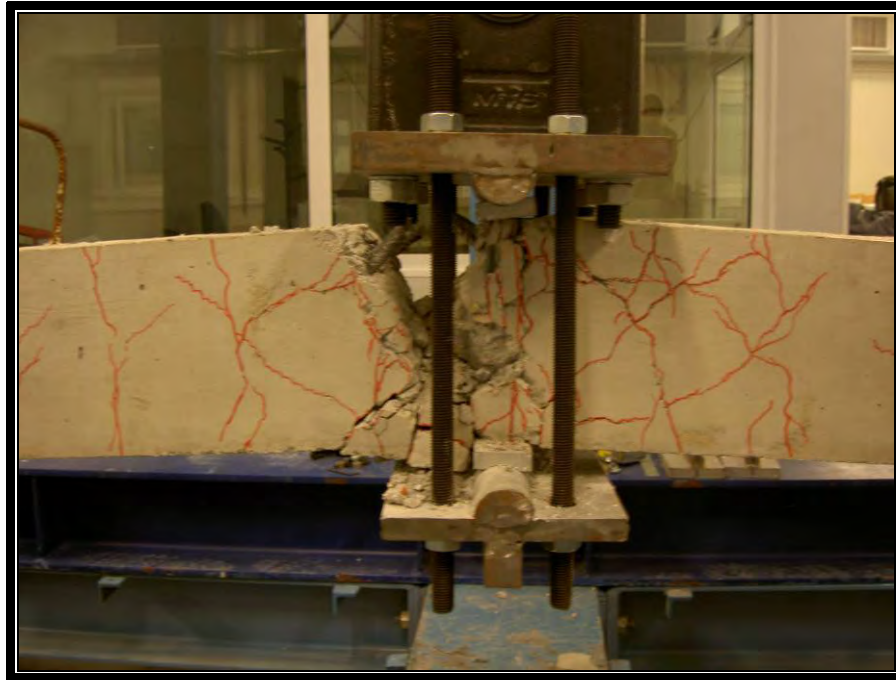
Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχήμα 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος							
Κωδικός δοκού	RC-4C-3B						
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυροδέμα						
Δοκιμή – Φόρτιση	Πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού						
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος				
	1600	150	203				
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500						
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06						
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)					
	-	02-Νοε-06 ^(*)	05-Δεκ-06	02-Νοε-06 ^(*)			
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)					
	-	73,14 ^(*)	77,72	78,15 ^(*)			
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06						
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85						
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	23-Νοε-06						
 <p>Σχ. 1(α)</p>							
 <p>Σχ. 1(β)</p>							

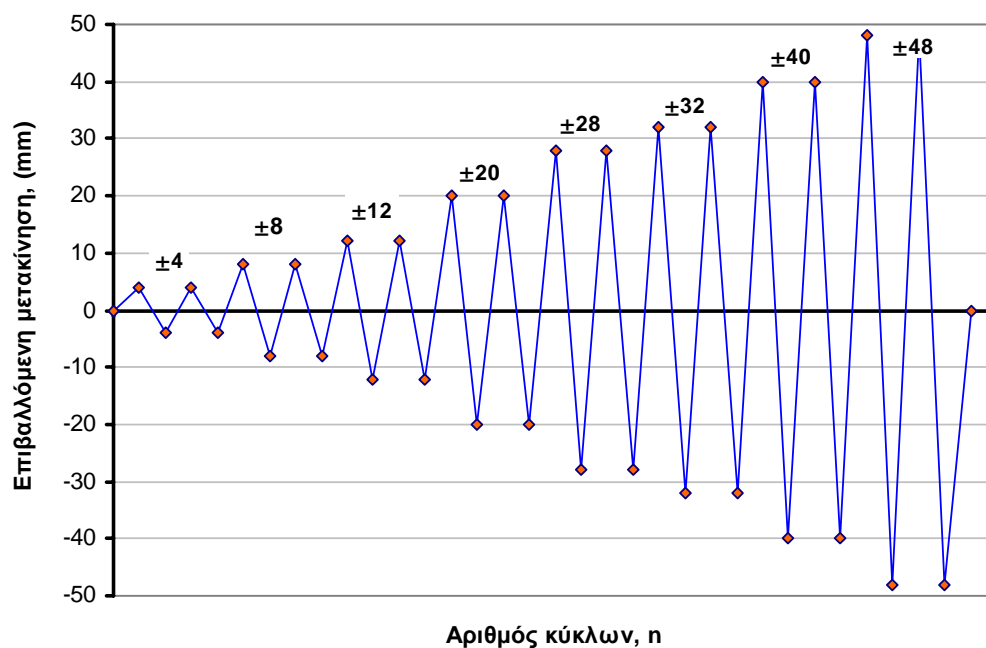
^(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



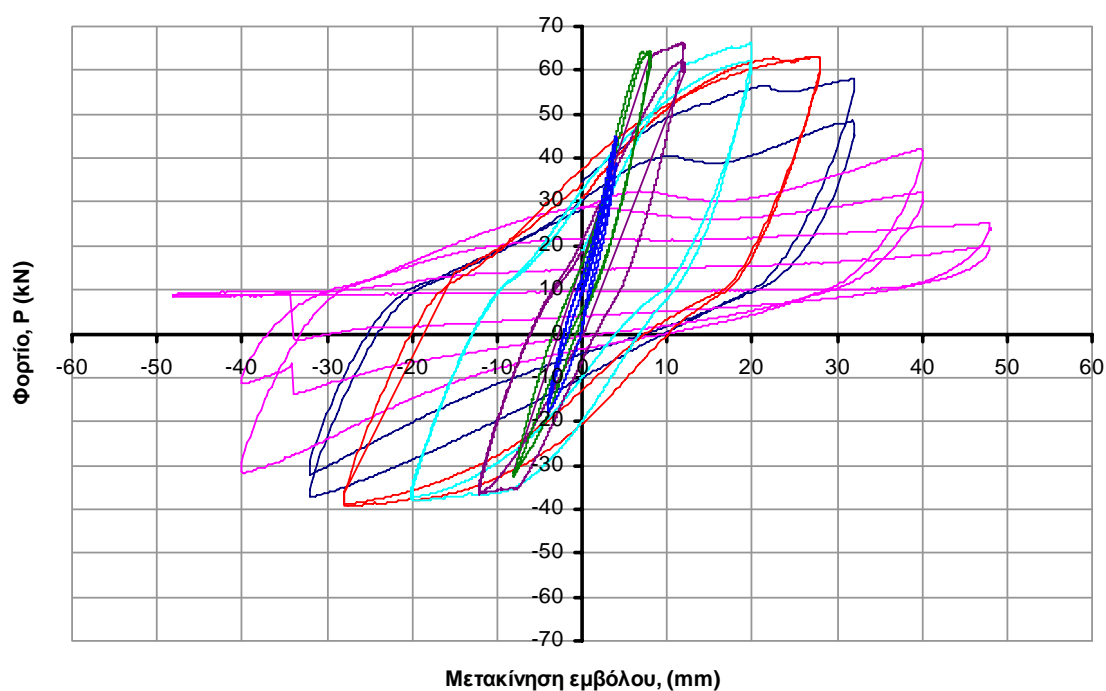
Σχήμα 2 - Δοκός RC-4C-3B.




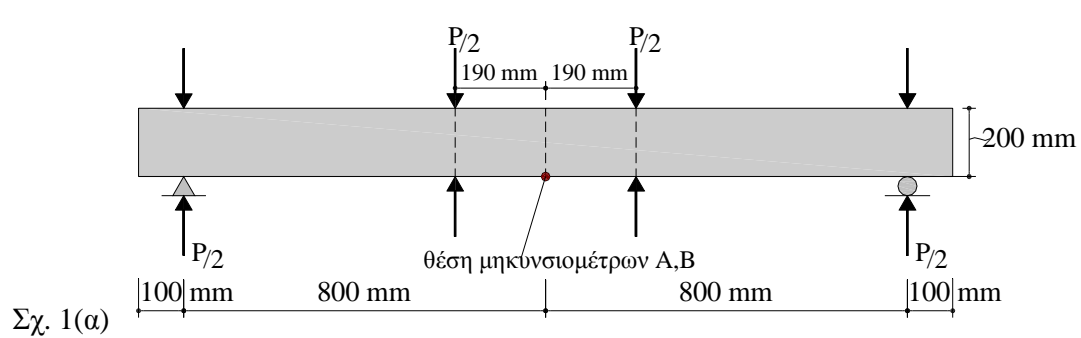
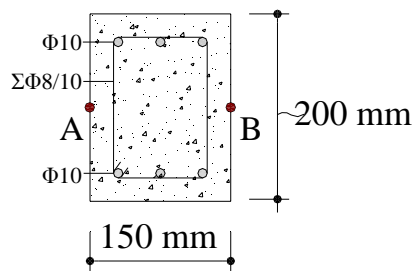
Σχήμα 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



Σχήμα 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.



Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	RC-5C-4B		
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυροδέμα		
Δοκιμή – Φόρτιση	Πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	150	200
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	02-Νοε-06 ^(*)	05-Δεκ-06 02-Νοε-06 ^(*)
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	73,14 ^(*)	77,72 78,15 ^(*)
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	08-Μαρ-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			

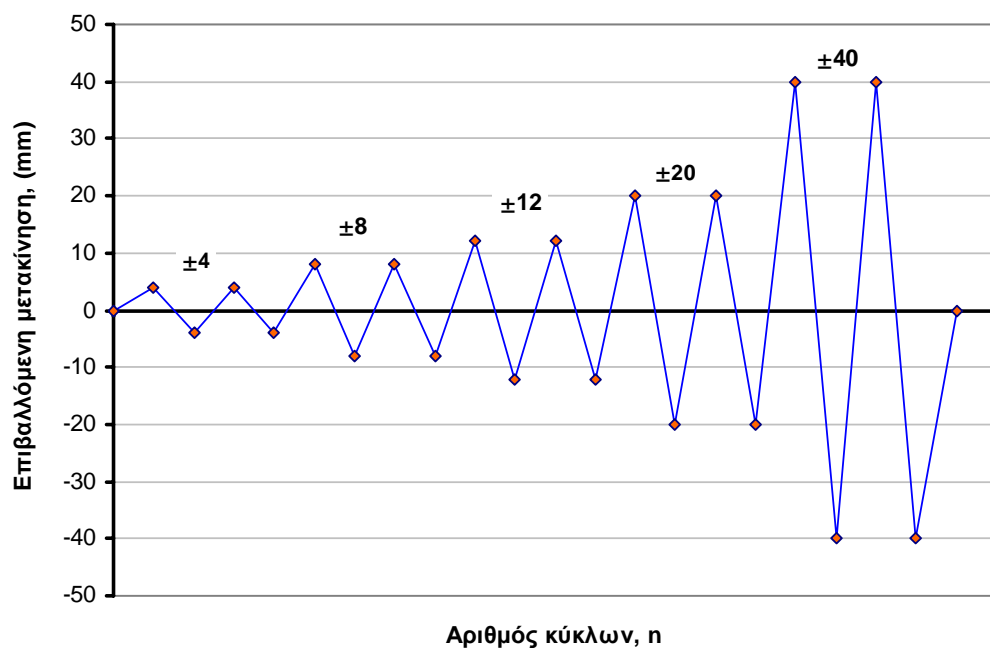
(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



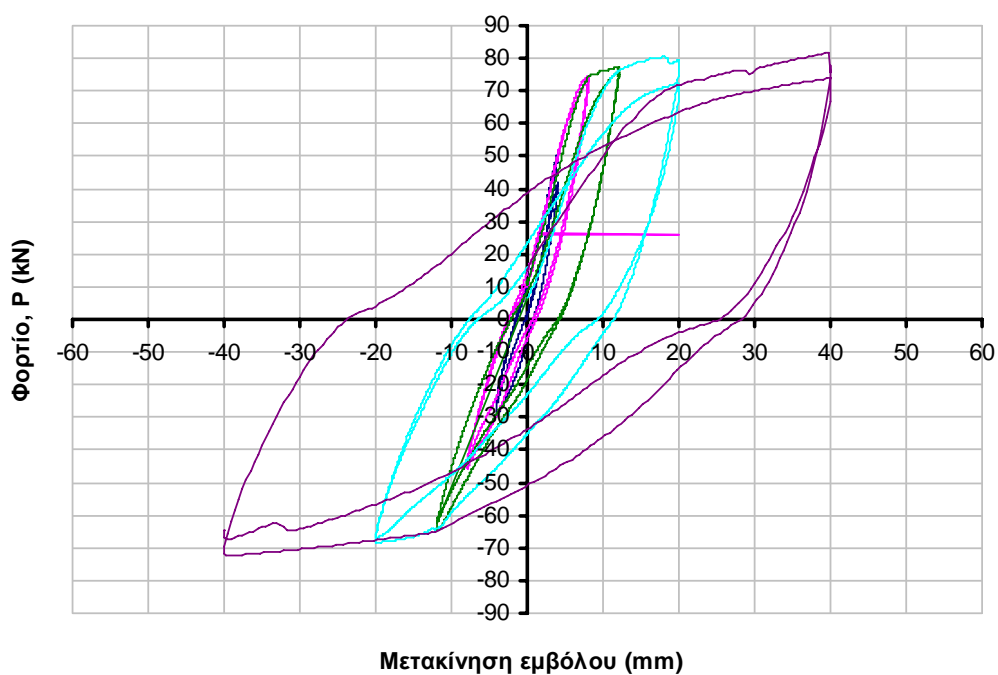
Σχήμα 2 - Δοκός RC-5C-4B.



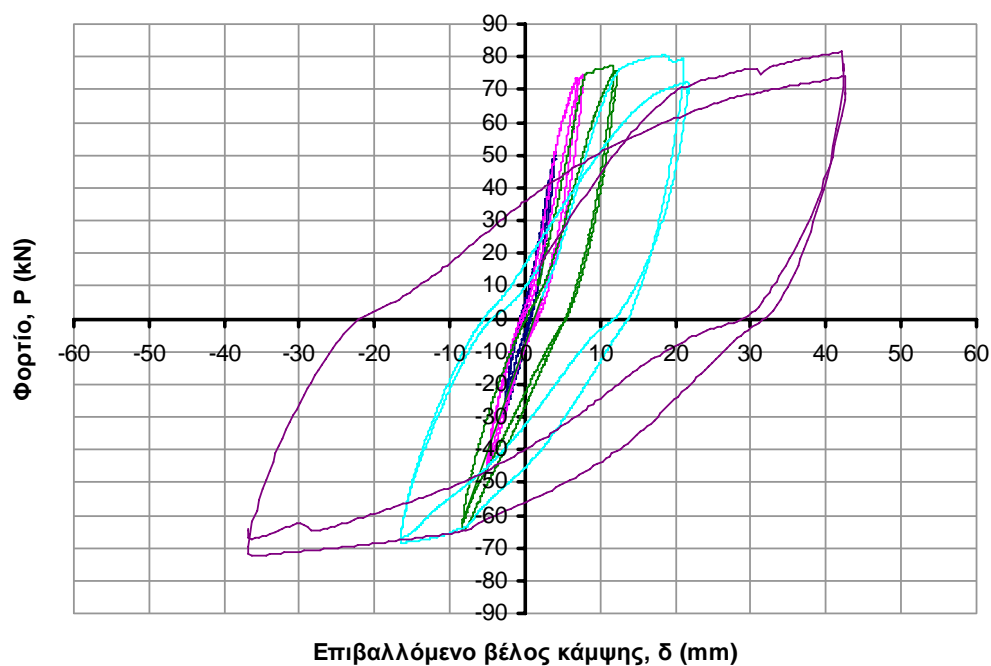
Σχήμα 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας σε αρνητική ροπή.



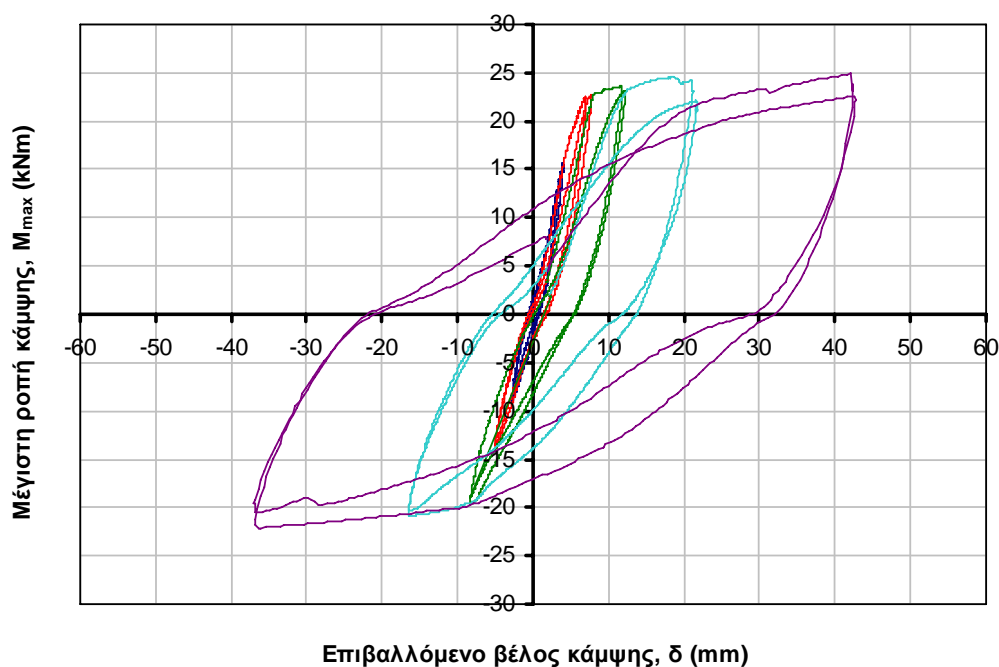
Σχήμα 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




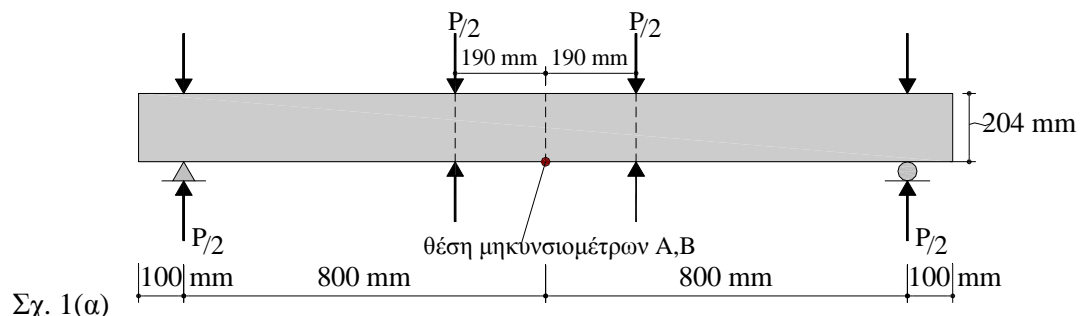
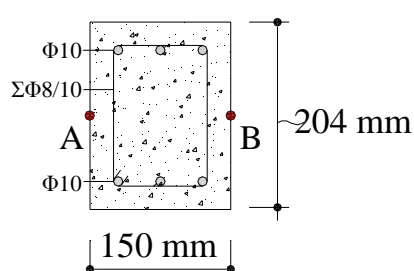
Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



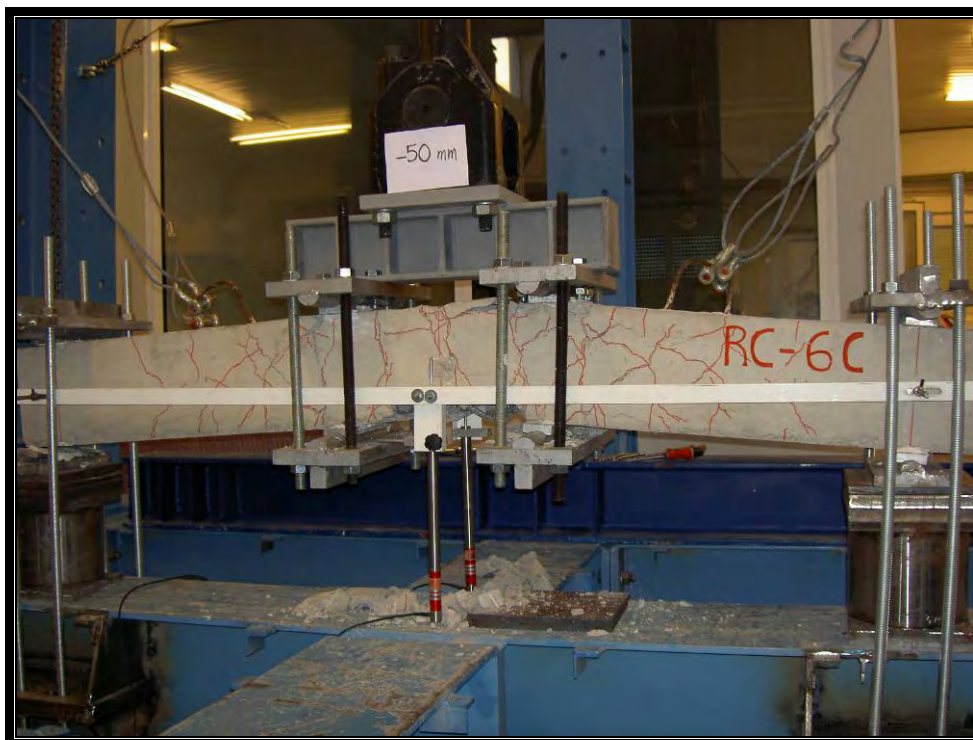
Σχήμα 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



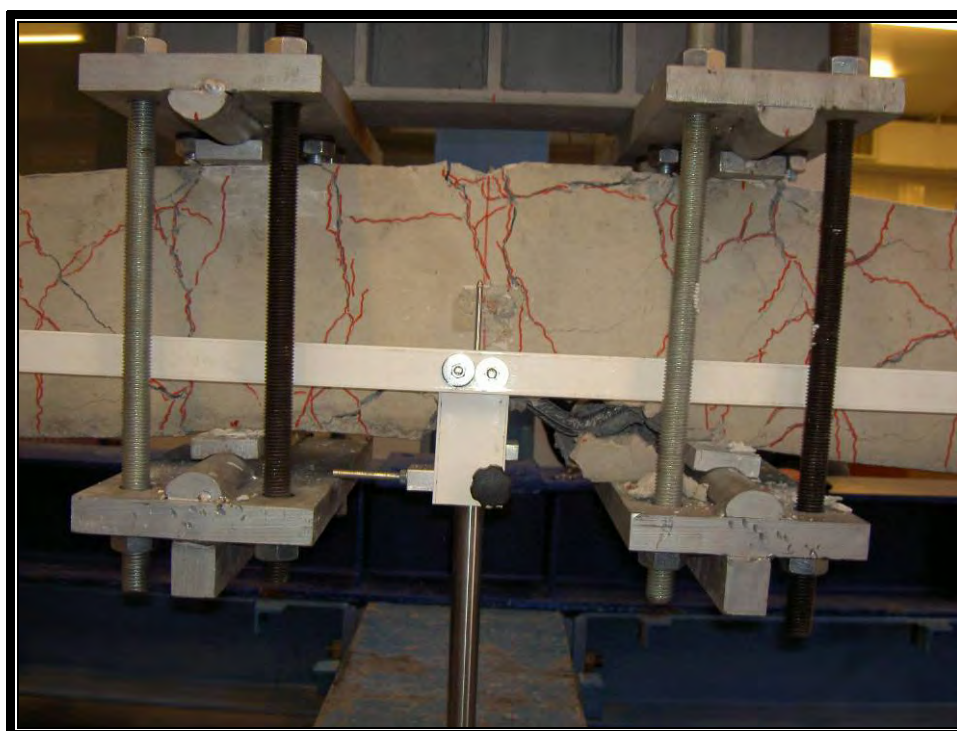
Σχήμα 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	RC-6C-4B		
Οπλισμός δοκού	Συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα		
Δοκιμή – Φόρτιση	Πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	150	204
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	10-Μαΐ-06		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	02-Νοε-06 ^(*)	05-Δεκ-06 02-Νοε-06 ^(*)
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	73,14 ^(*)	77,72 78,15 ^(*)
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	13-Δεκ-06		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	7,85		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	16-Μαρ-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			

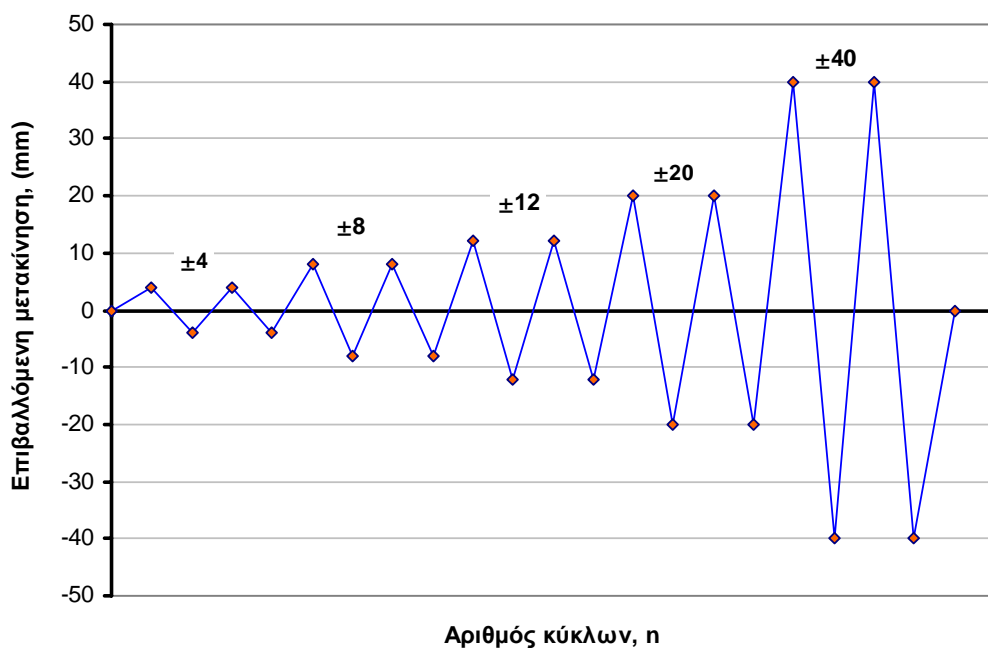
(*) Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Τ.



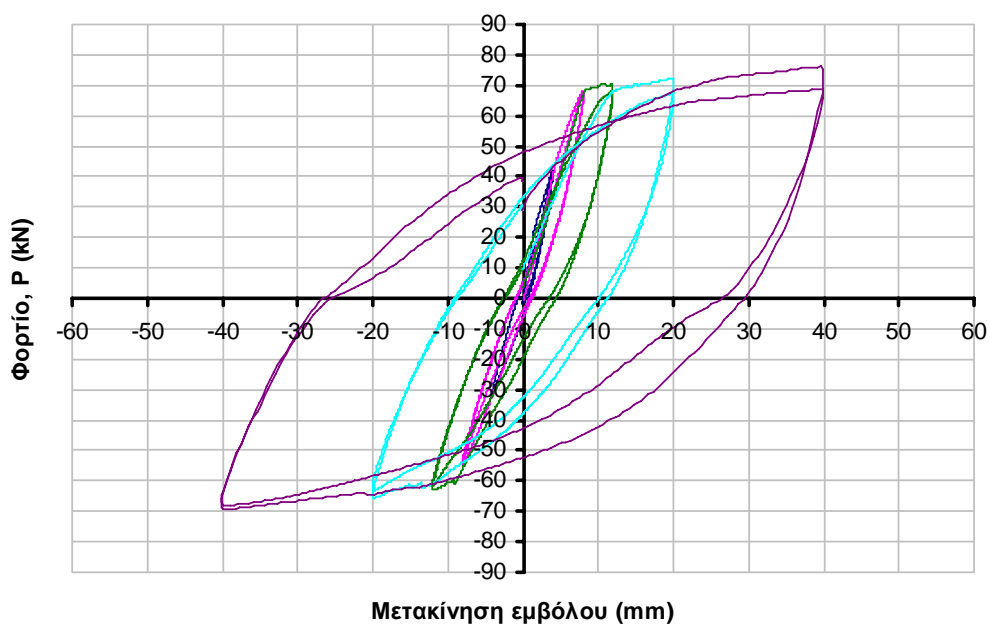
Σχήμα 2 - Δοκός RC-6C-4B.



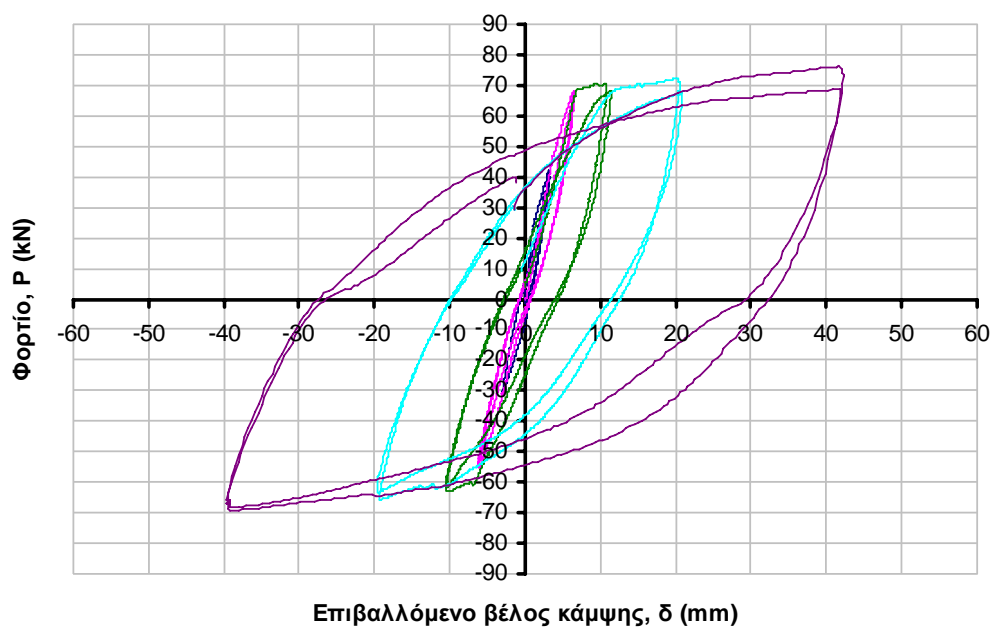
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας σε αρνητική ροπή..



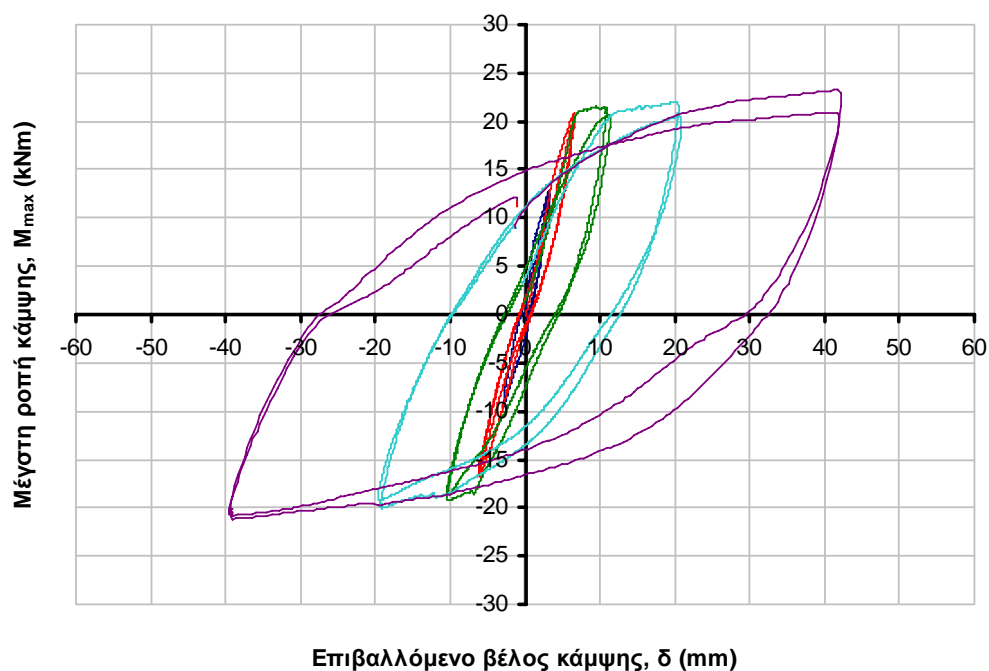
Σχήμα 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




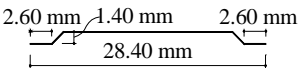
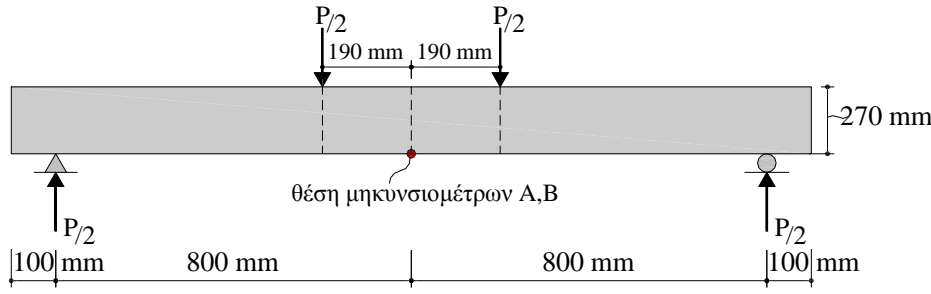
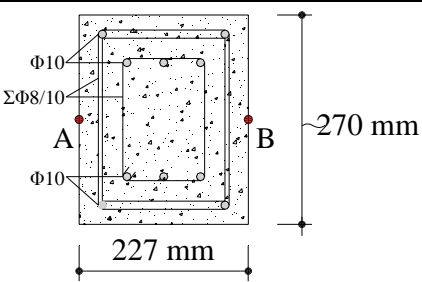
Σχήμα 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχήμα 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.

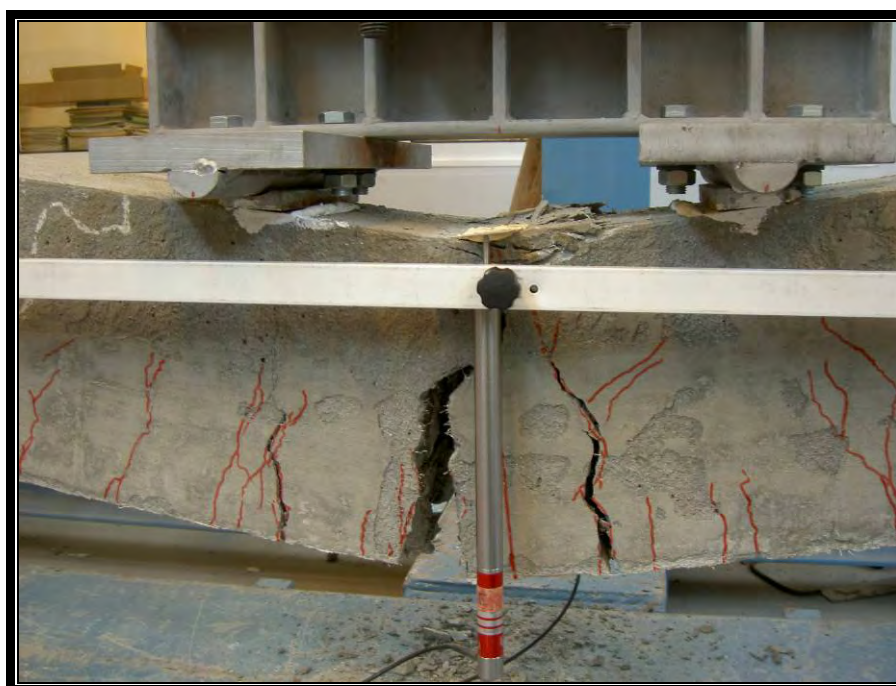


Σχήμα 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

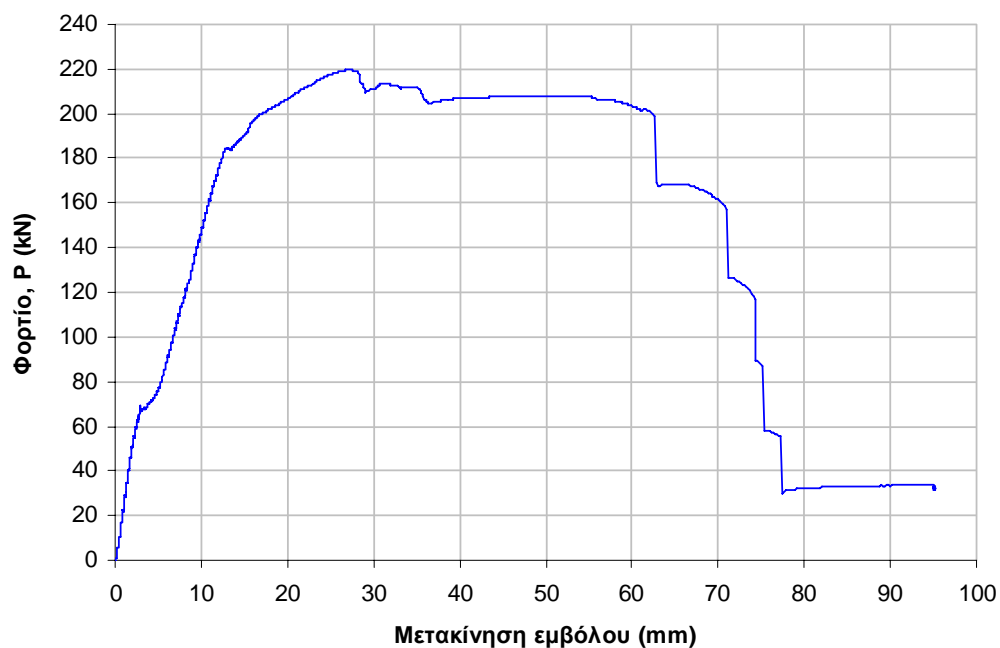
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-1S-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	227	270
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	Ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	20-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	81,05
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	28-Ιουν-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



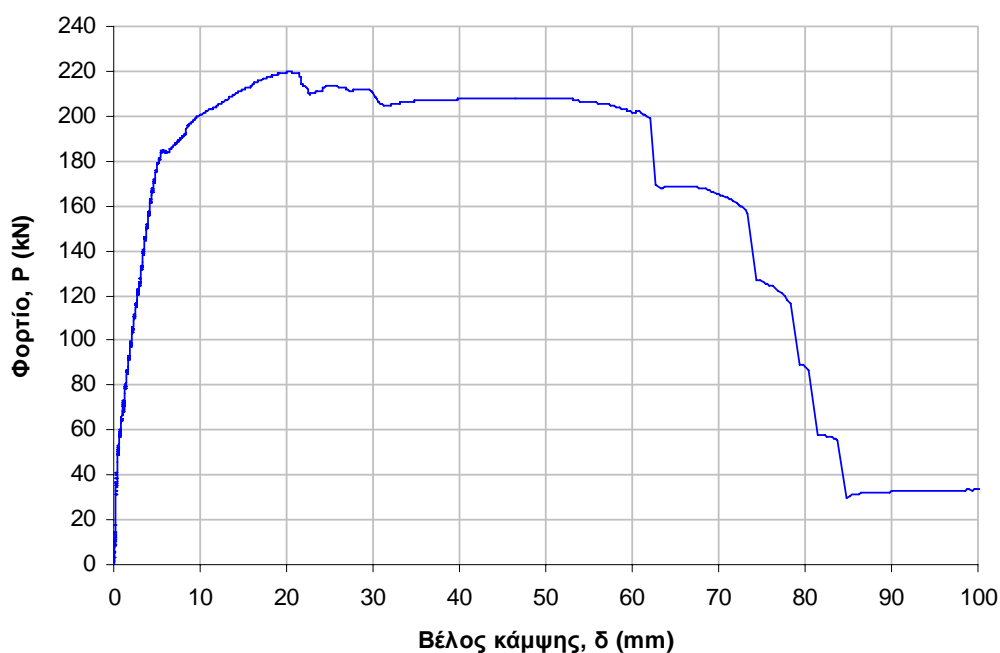
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-1S-4B.



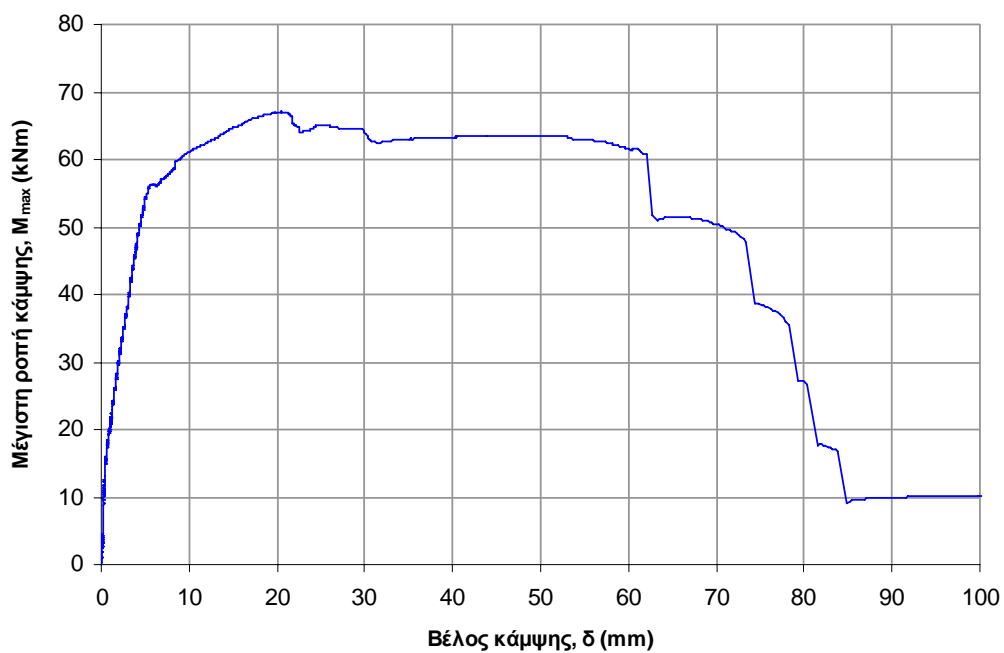
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




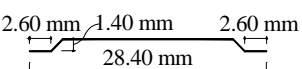
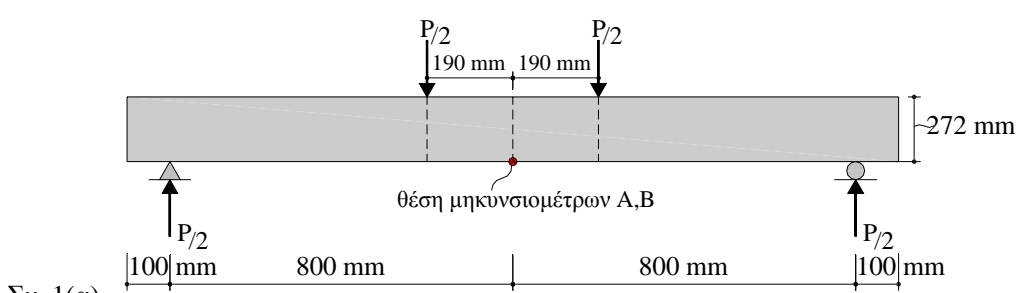
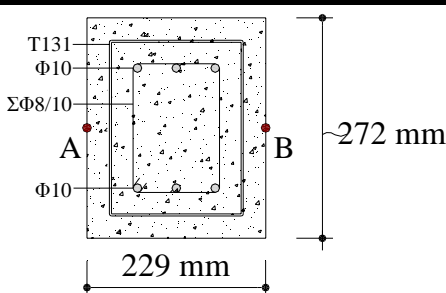
Σχ. 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχ. 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

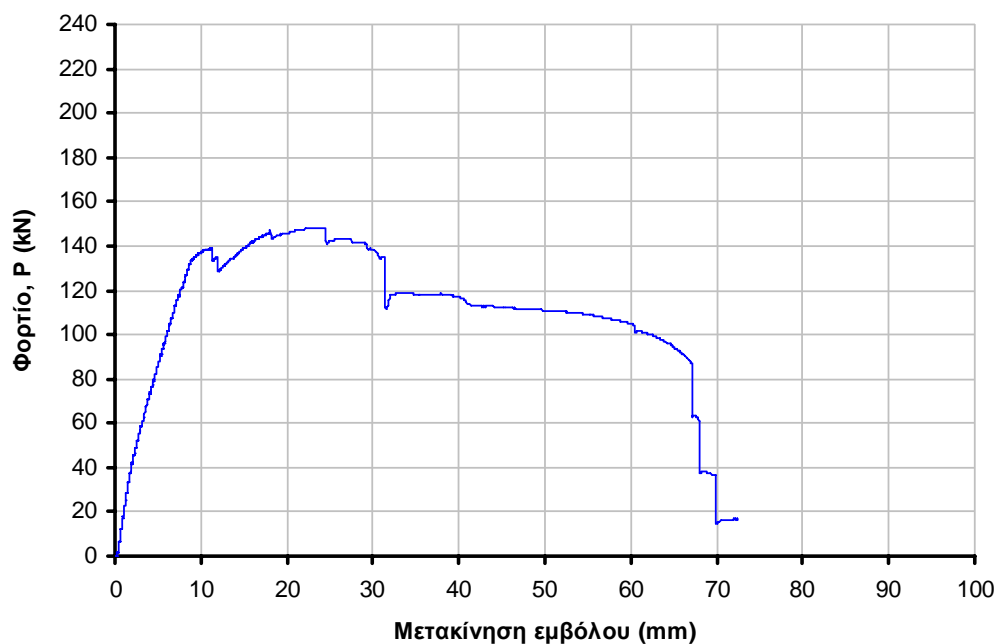
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-2S-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και πλέγμα T131		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	229	272
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	Ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	19-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	77,86
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	03-Ιουλ-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



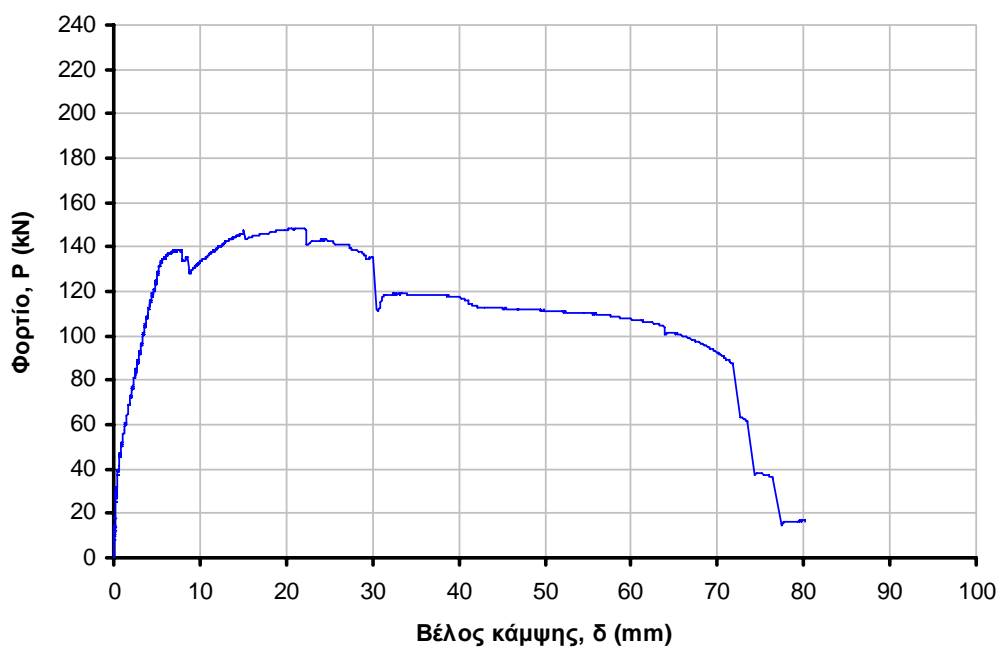
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-2S-4B.



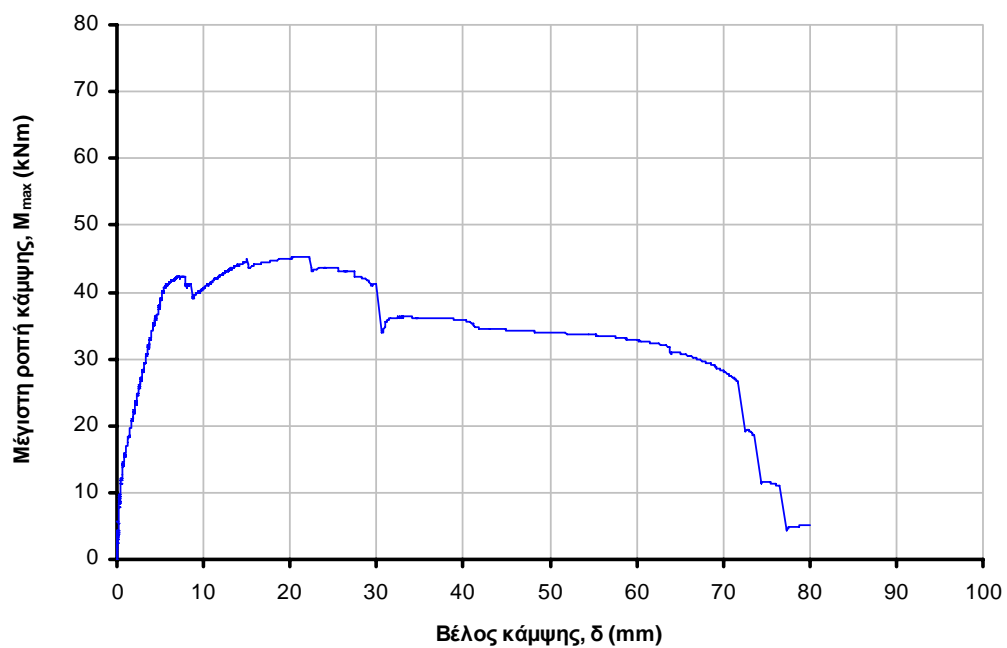
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




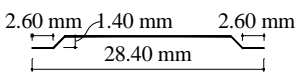
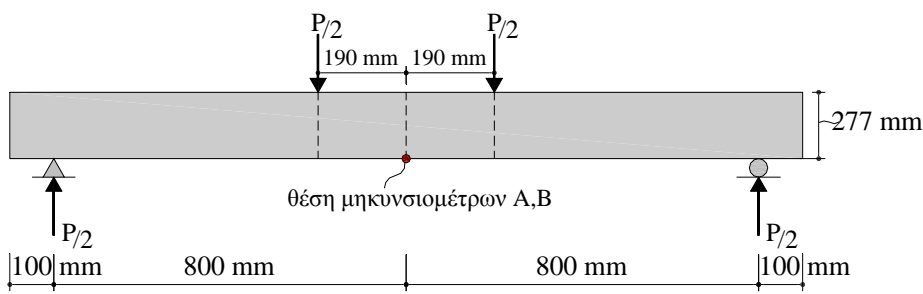
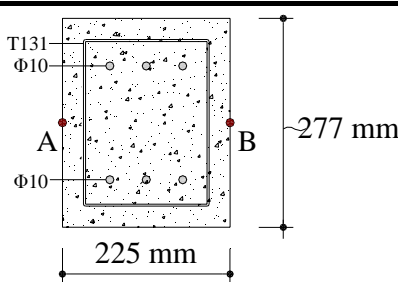
Σχ. 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχ. 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

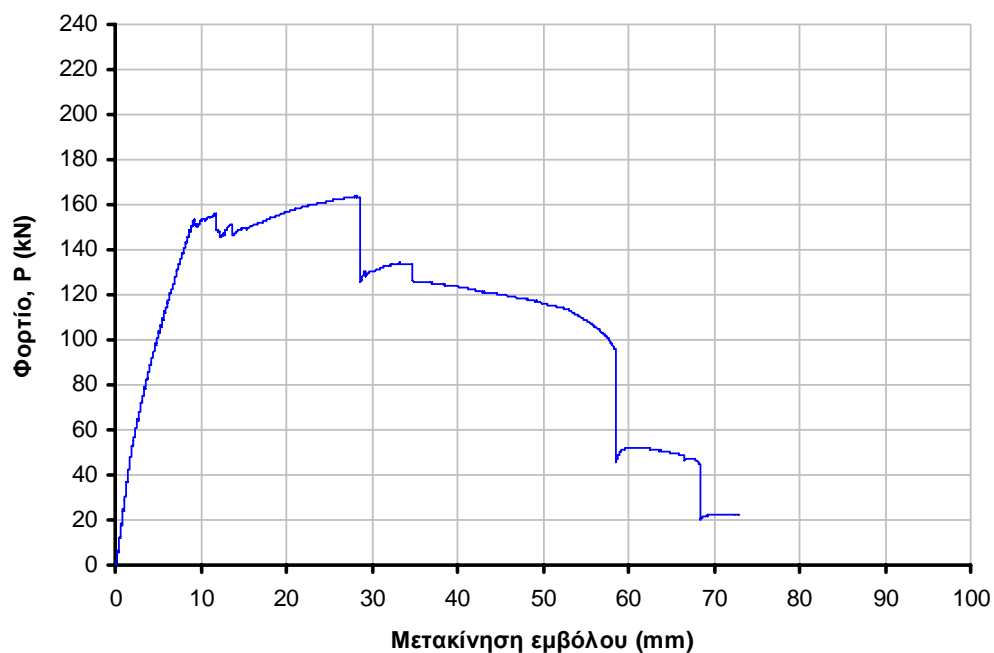
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-3S-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και πλέγμα T131		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	225	277
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	Ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	26-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	18-Ιουλ-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



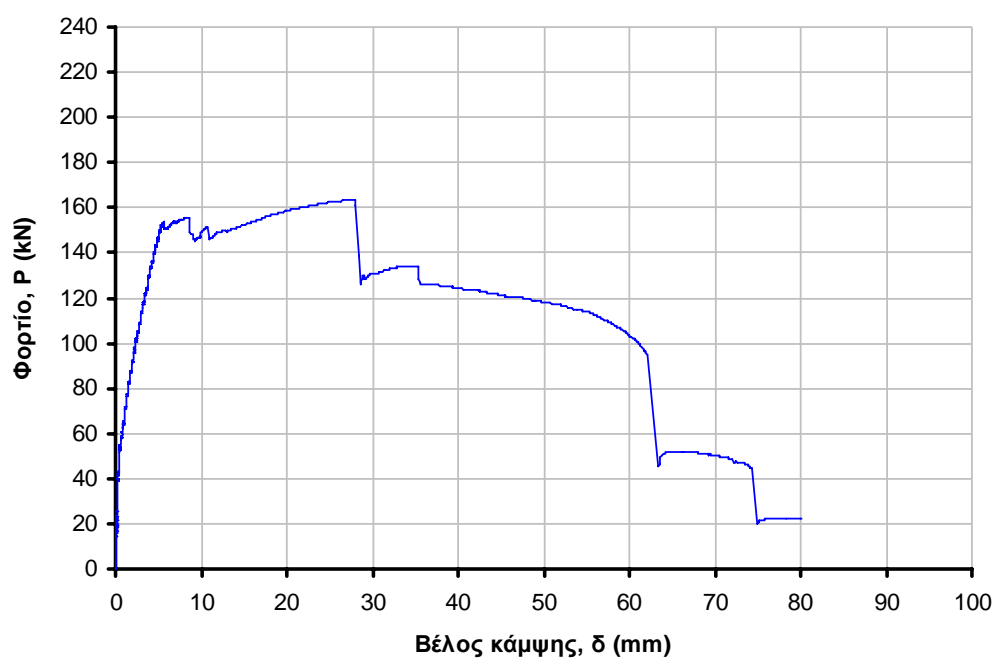
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-3S-4B.



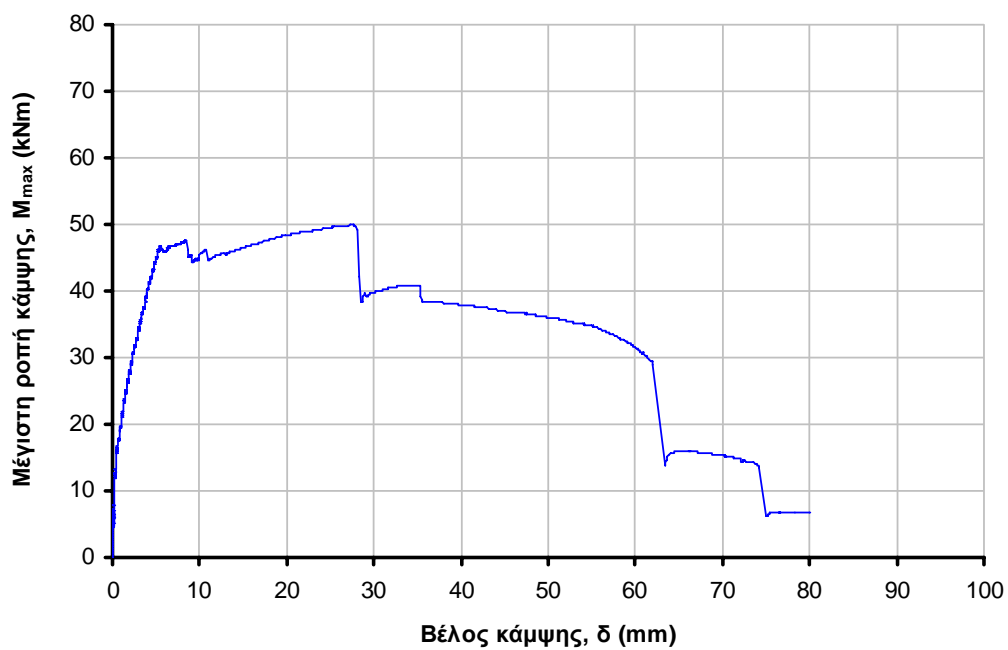
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.




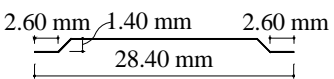
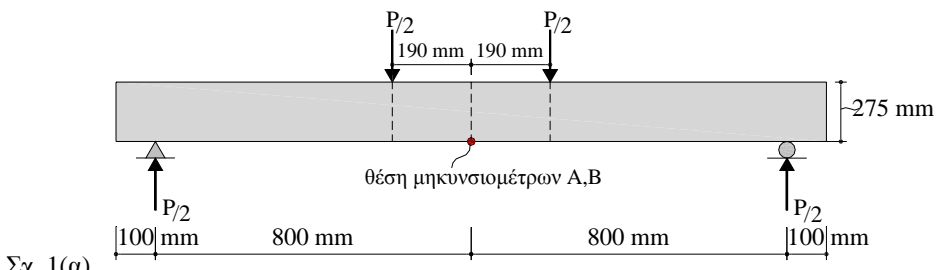
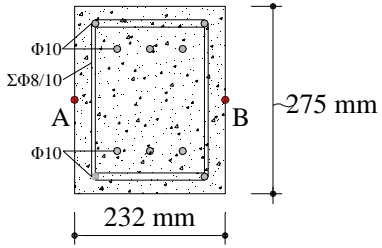
Σχ. 4 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.

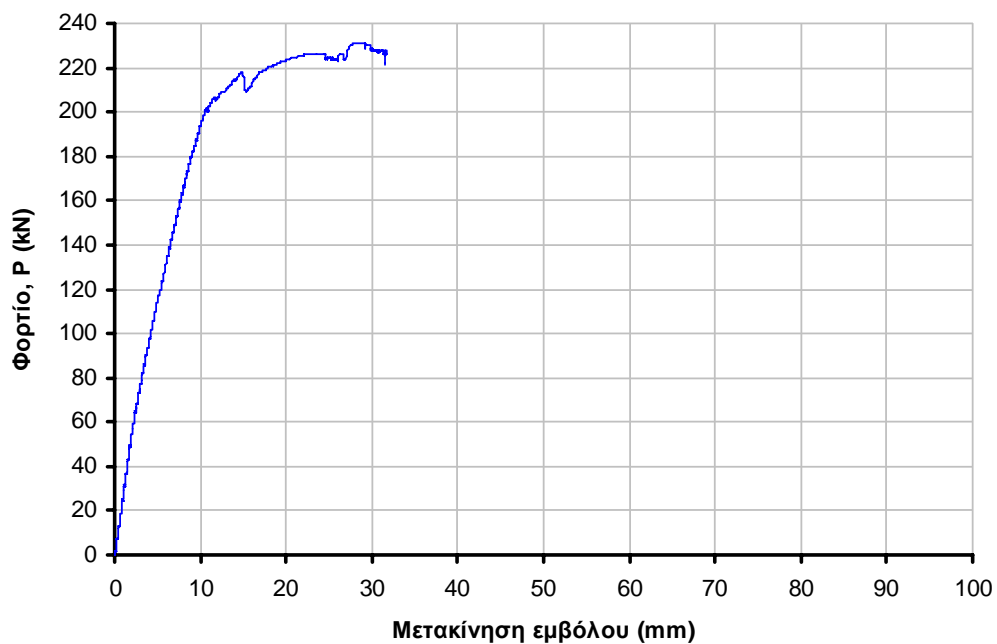


Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.

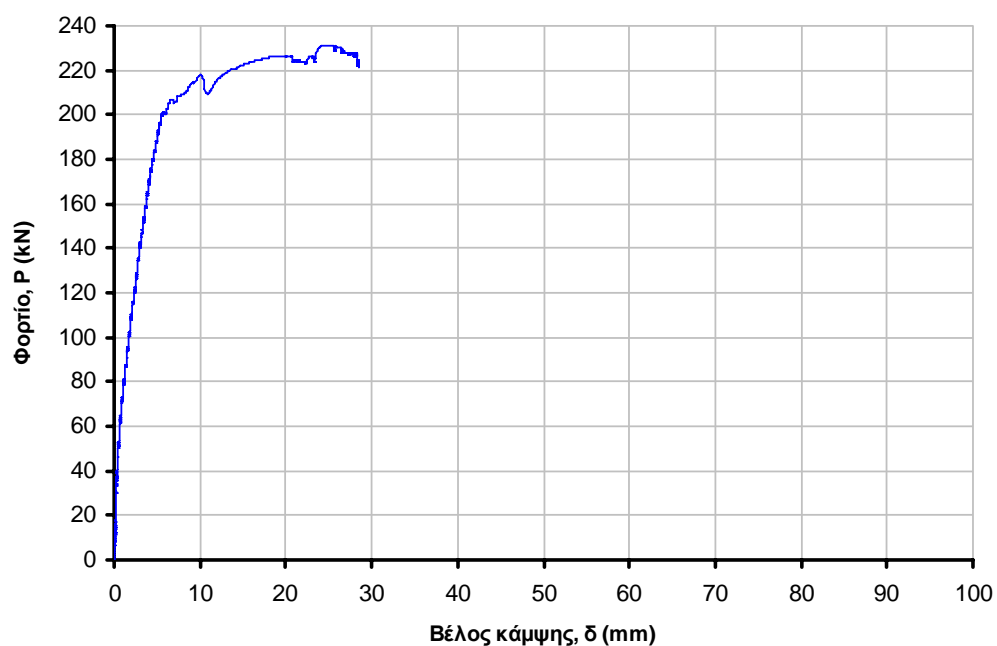


Σχ. 6 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

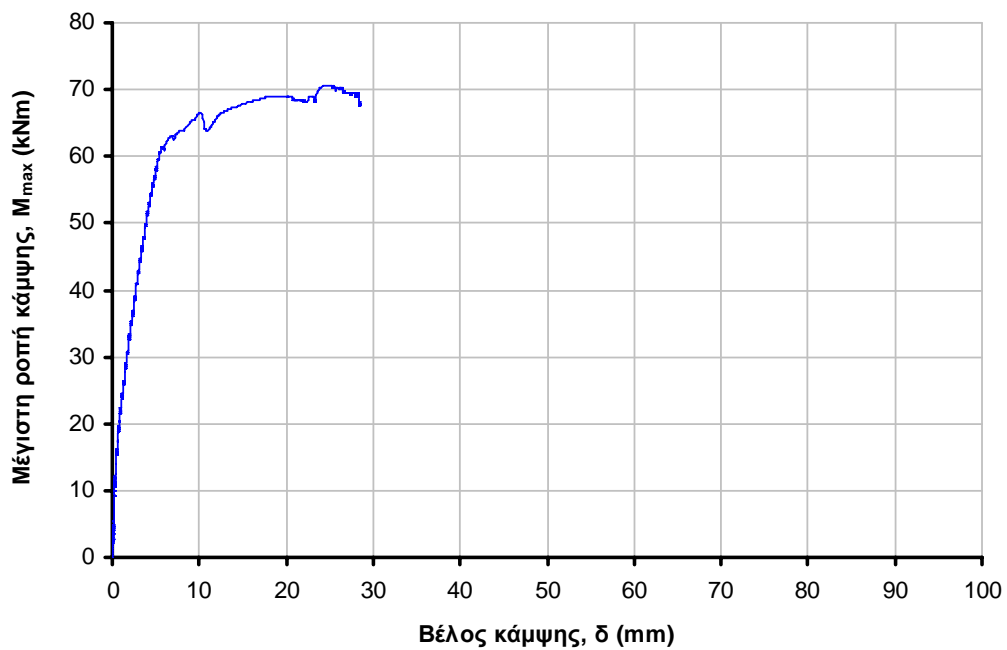
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-4S-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό		
Δοκιμή – Φόρτιση	Στατική φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	232	275
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	1νες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	20-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	27-Ιουλ-07		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			




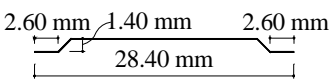
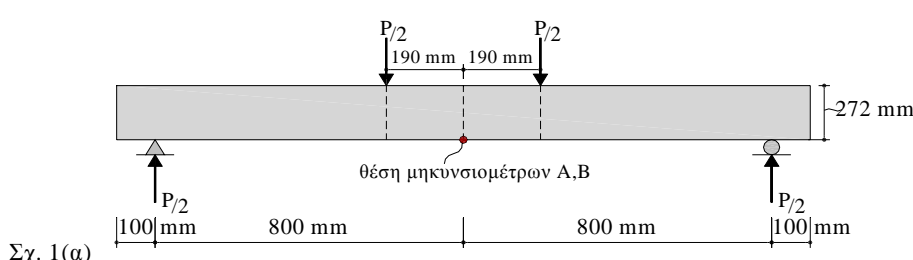
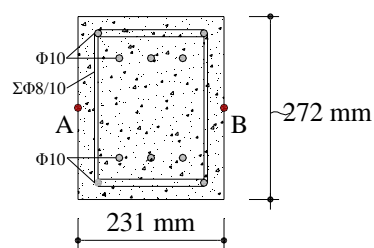
Σχ. 2 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 3 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.

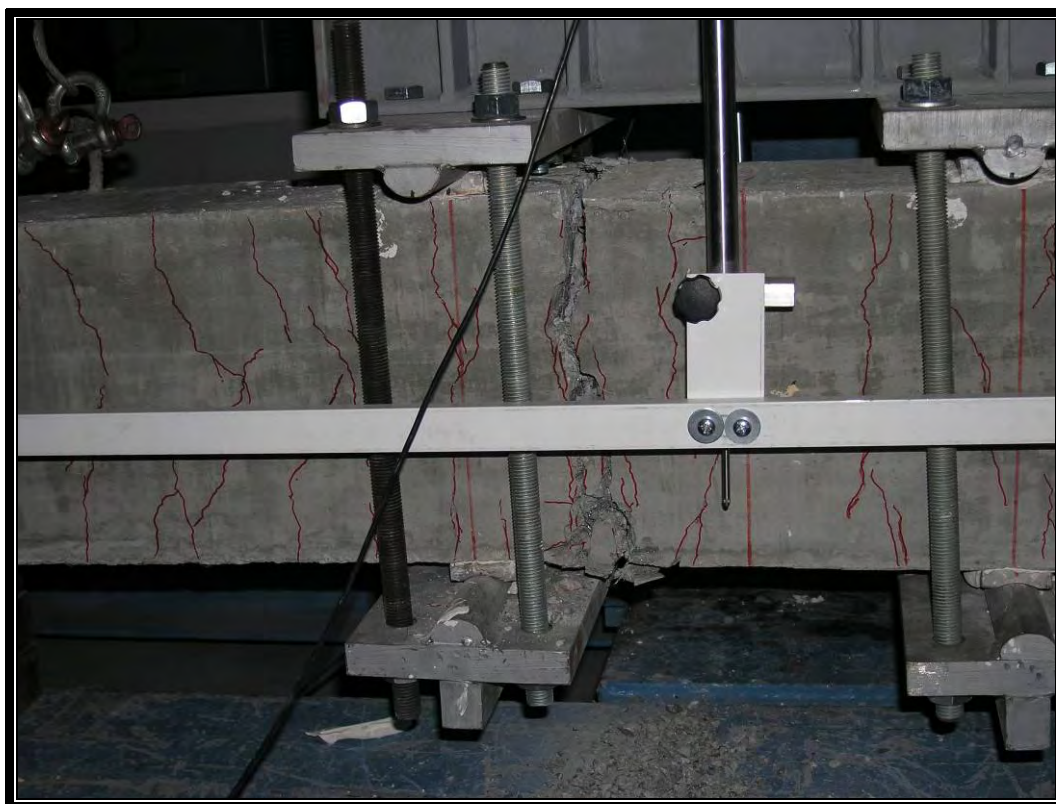


Σχ. 4 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

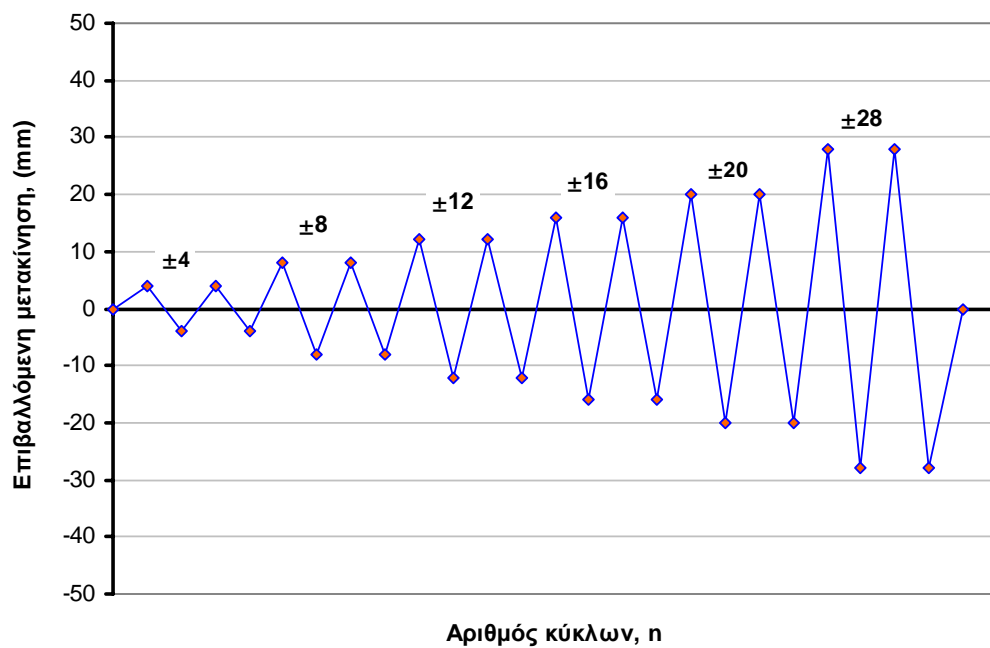
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-5C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	231	272
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	1νες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	25-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	11-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



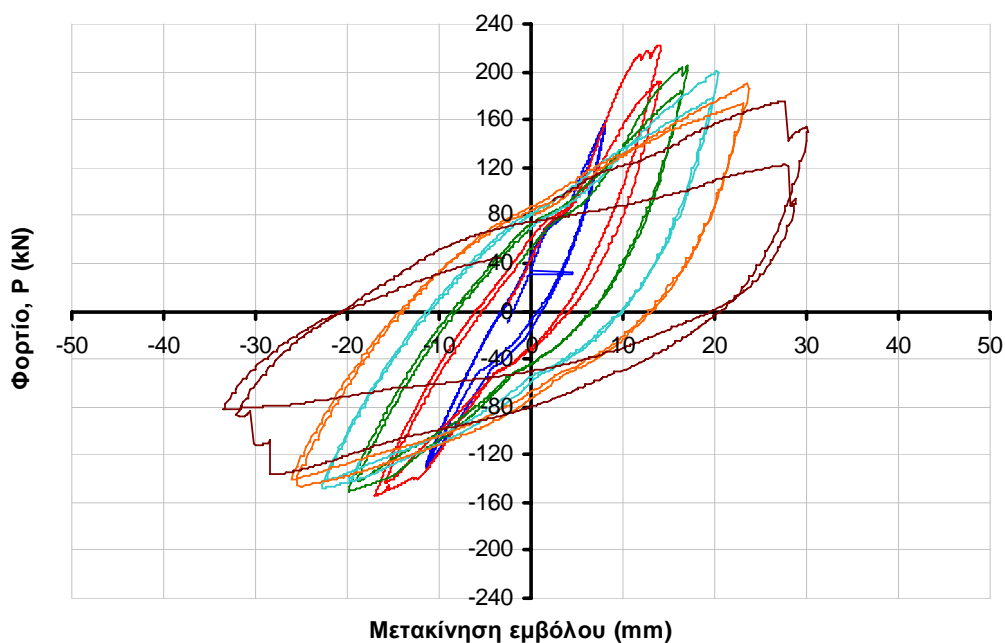
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-5C-4B.



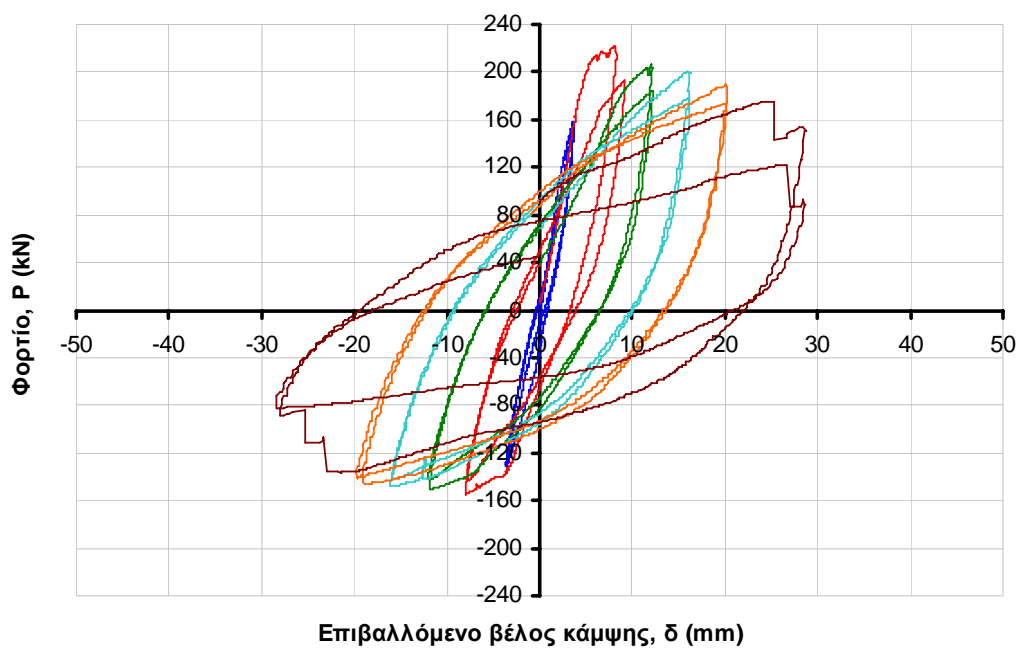
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



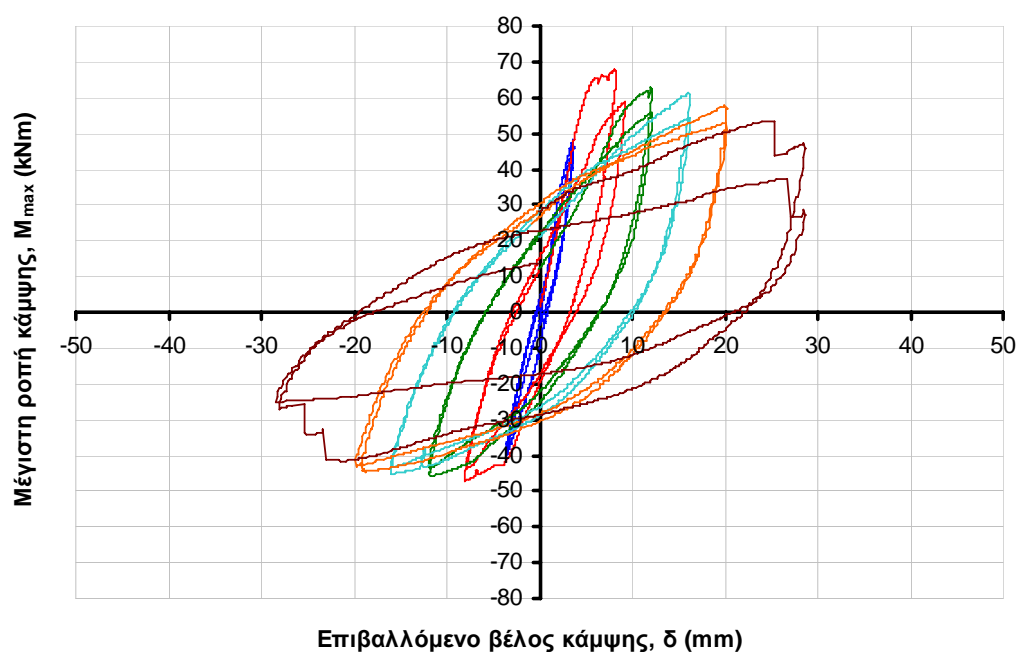
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




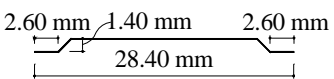
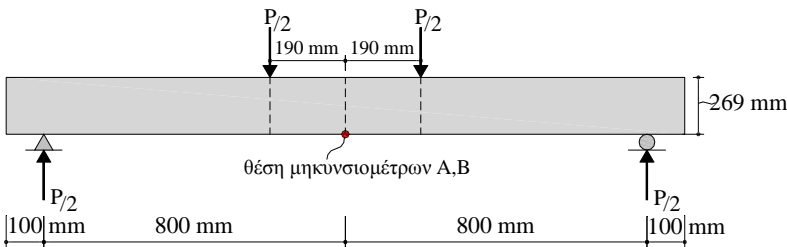
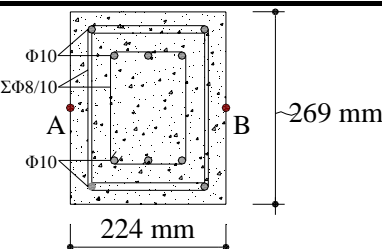
Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.

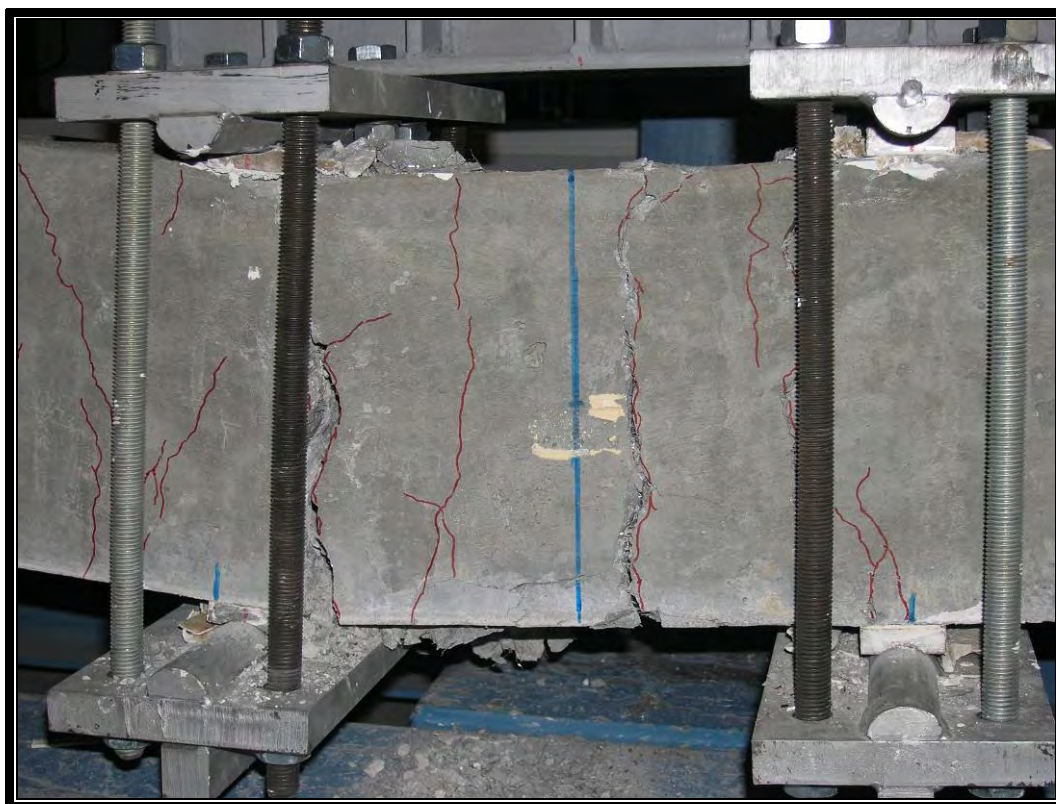


Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

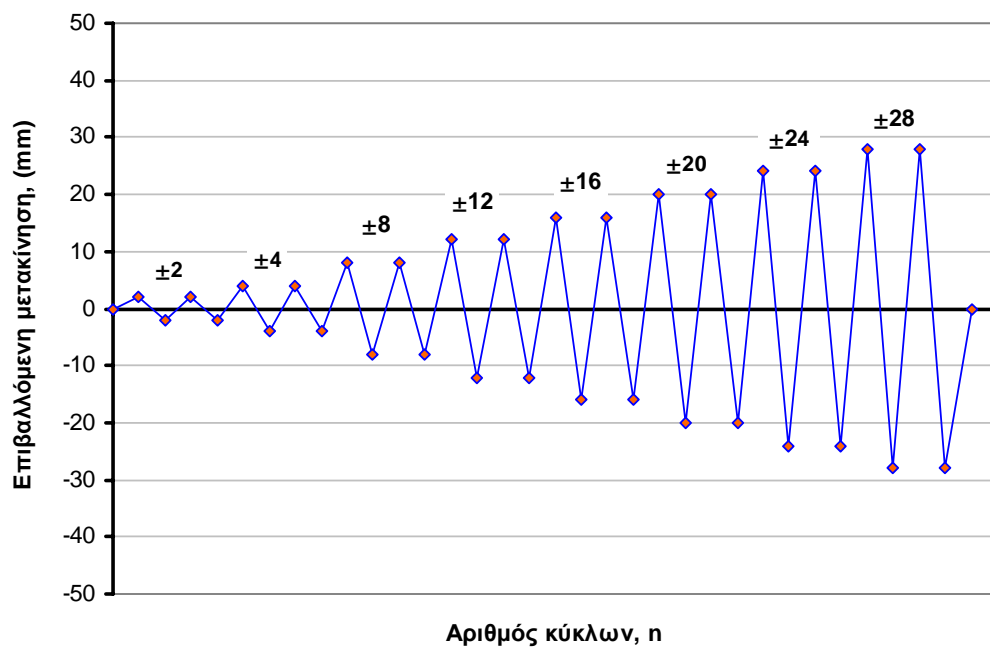
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-6C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	224	269
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	1νες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	19-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	83,36
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	12-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



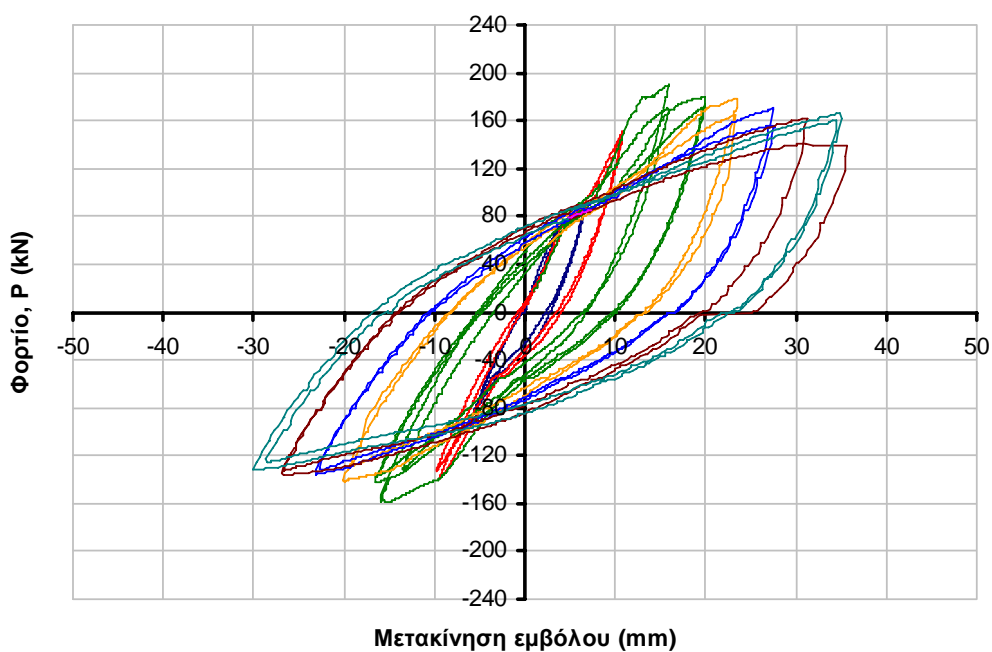
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-6C-4B.



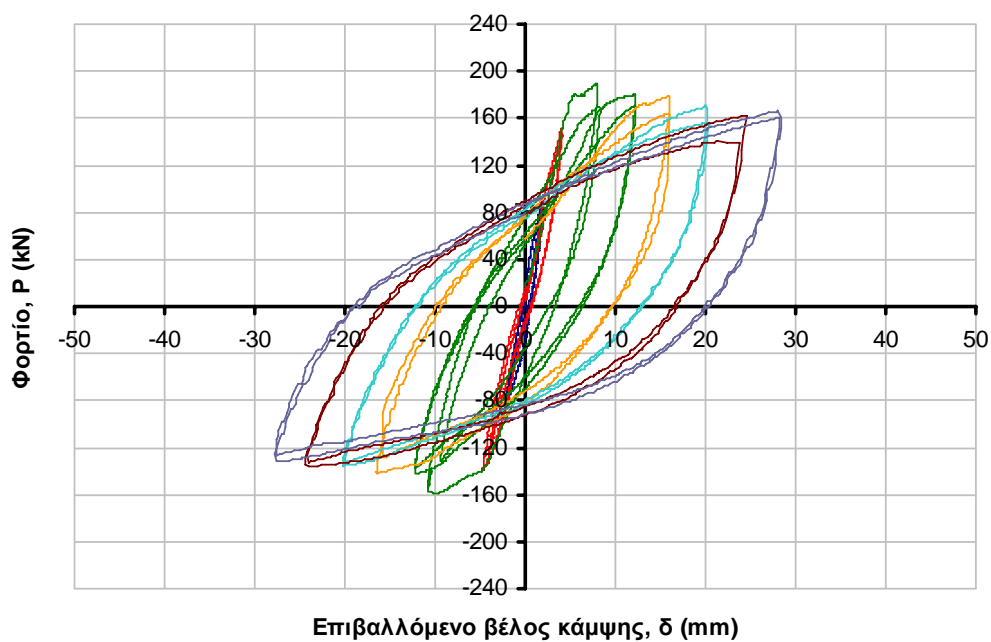
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



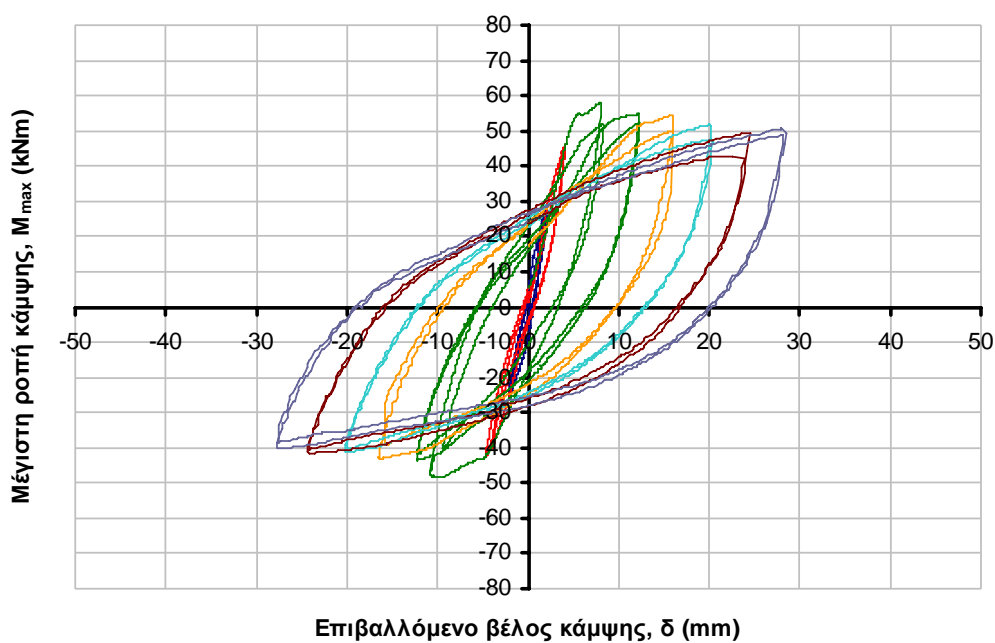
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




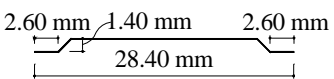
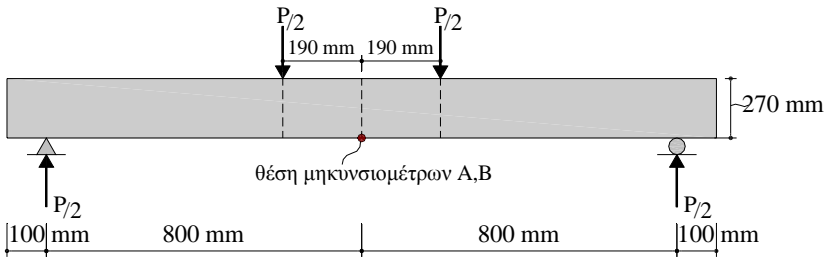
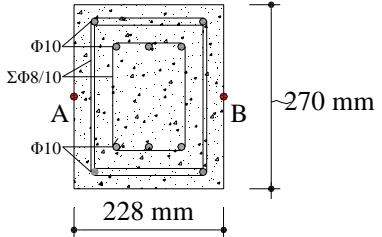
Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

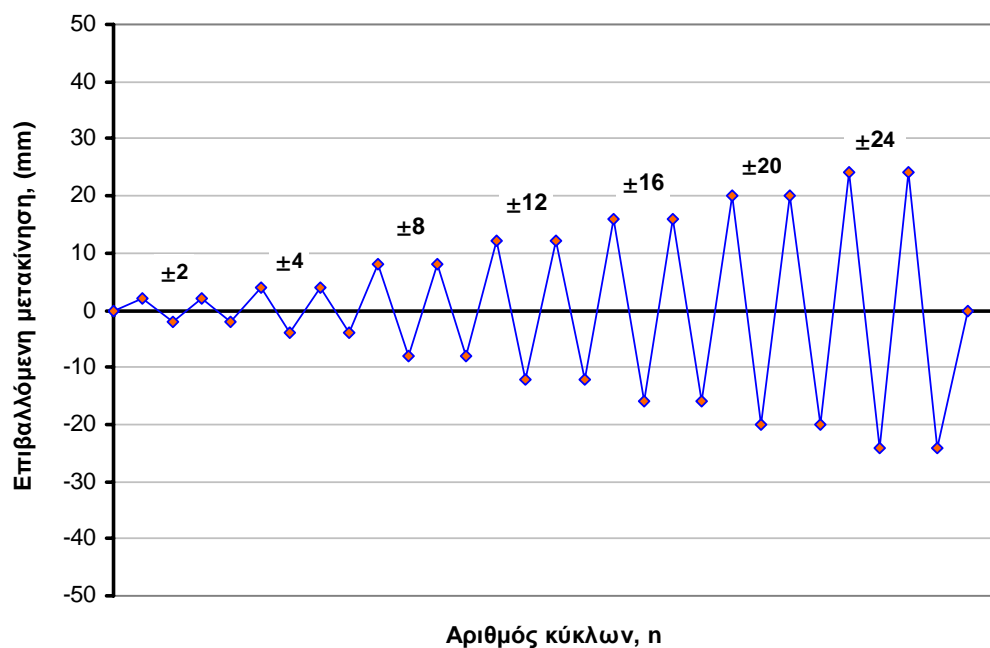
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-7C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	226	270
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	1νες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	20-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	83,20
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	27-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



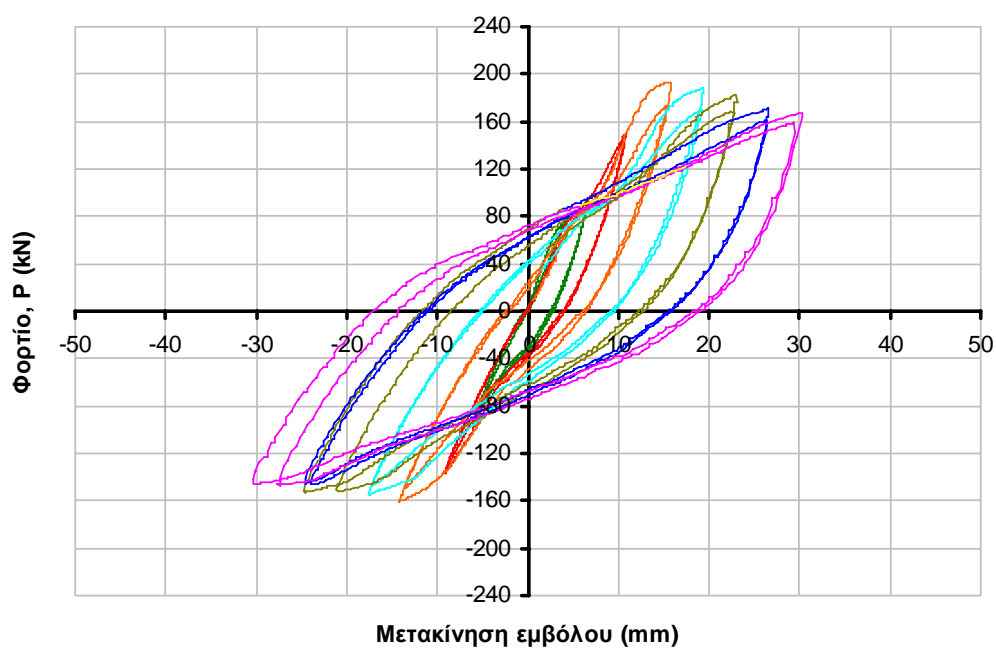
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-7C-4B.



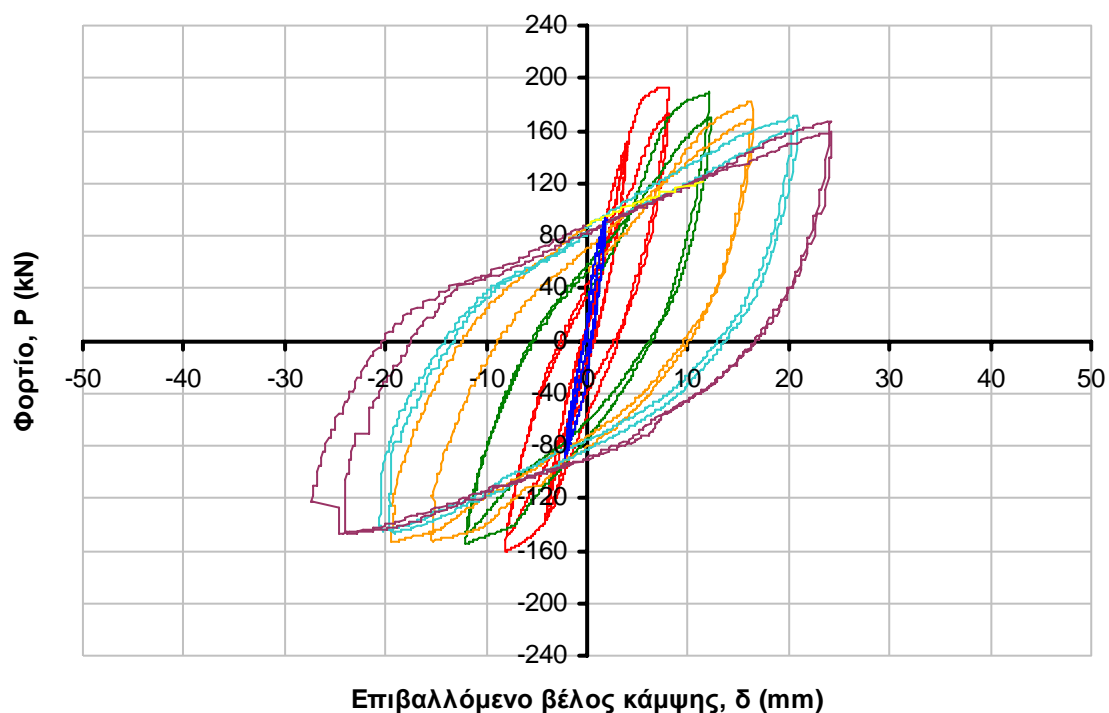
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



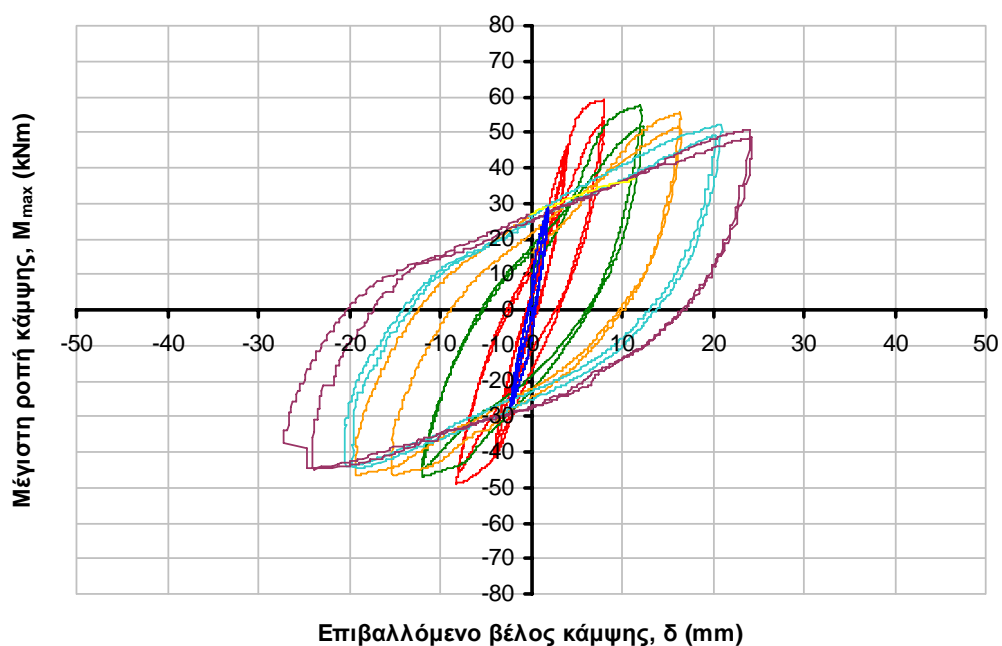
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




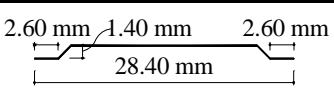
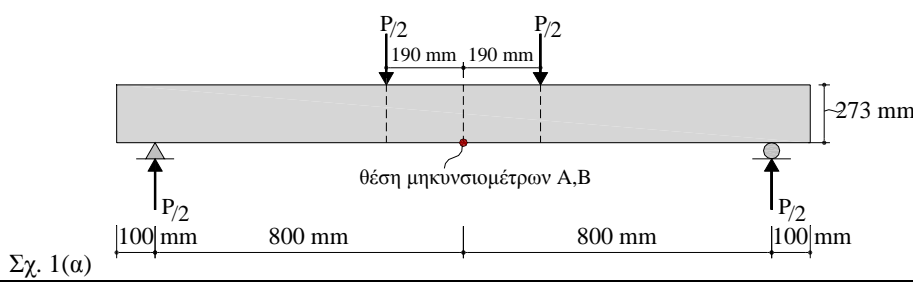
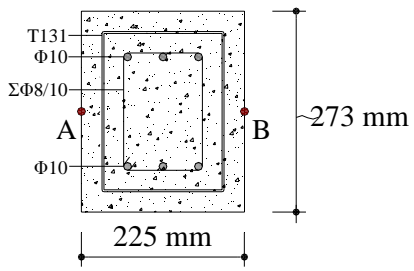
Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.

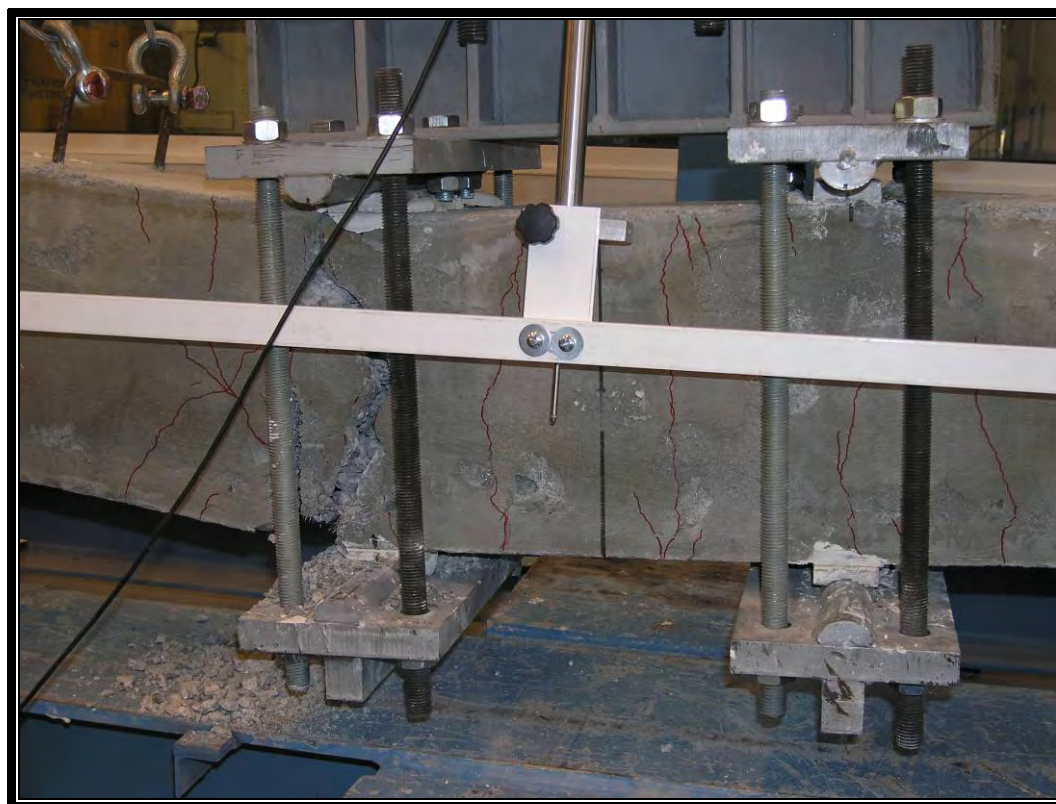


Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

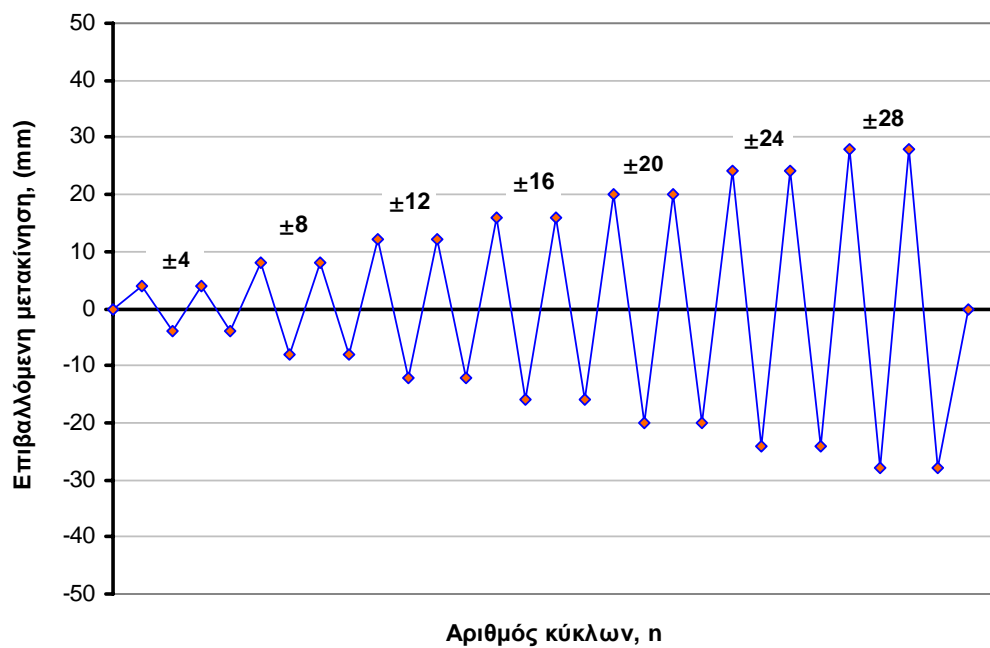
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-8C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και πλέγμα T131		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	225	273
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	Ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	30-Απρ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	- 04-Ιουλ-07
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	- 84,42
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	18-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



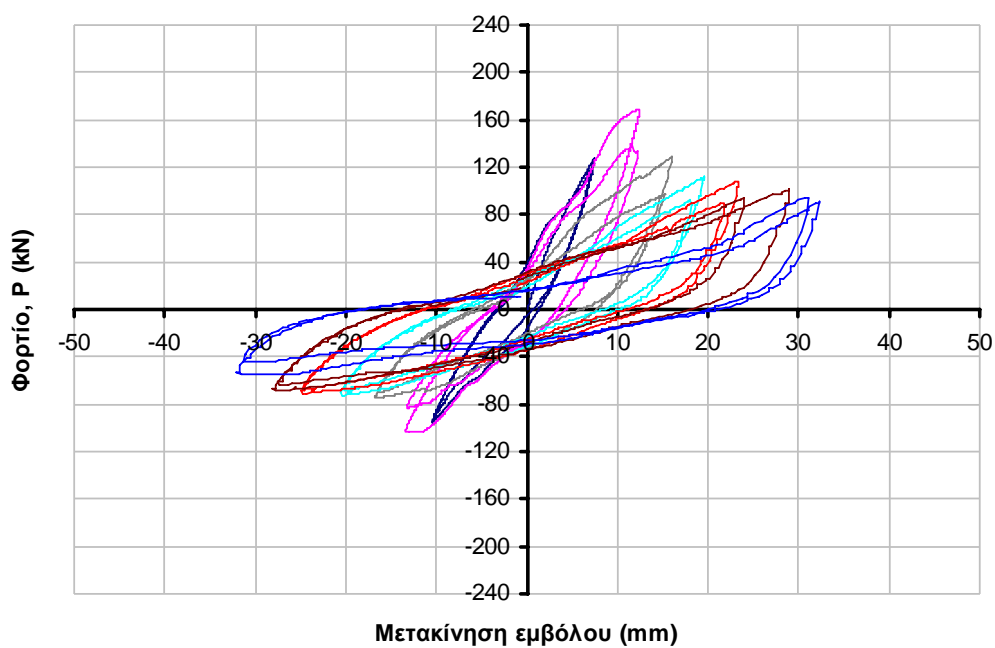
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-8C-4B.



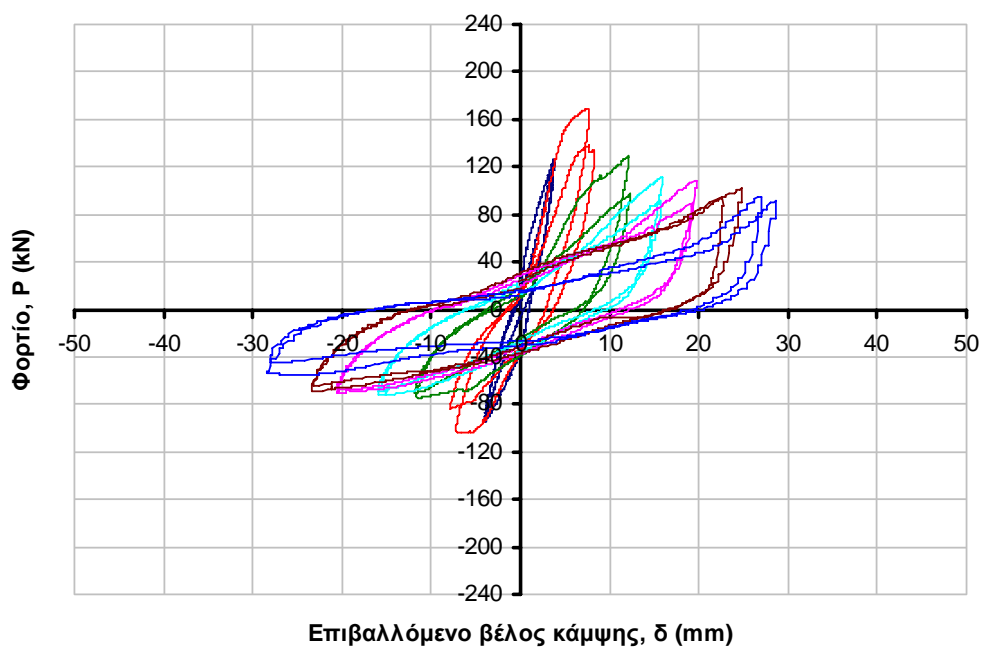
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



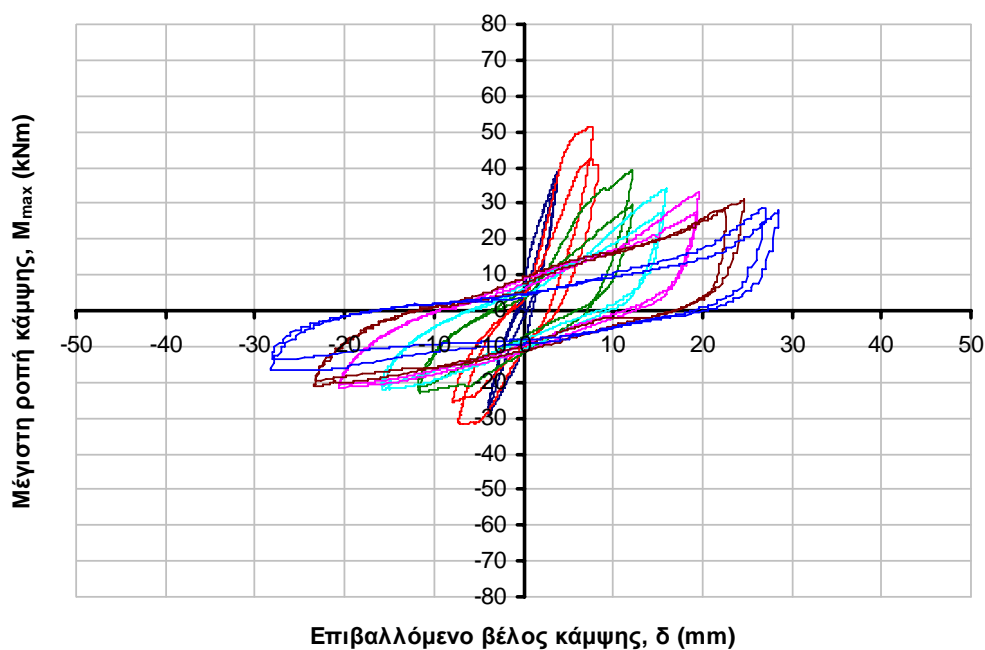
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




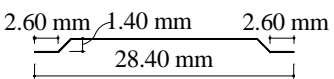
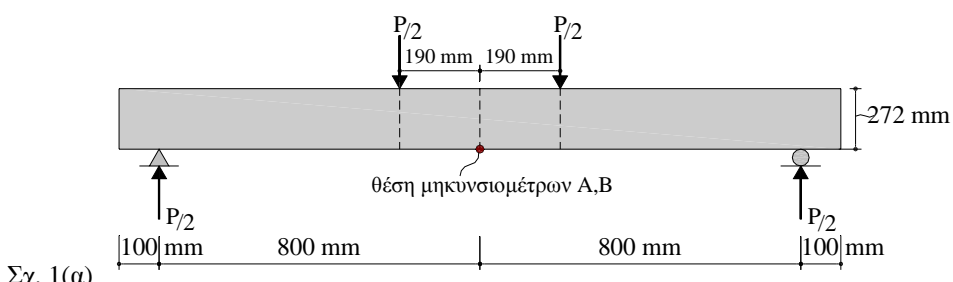
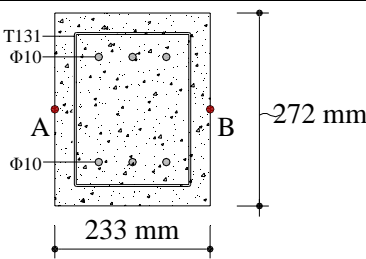
Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

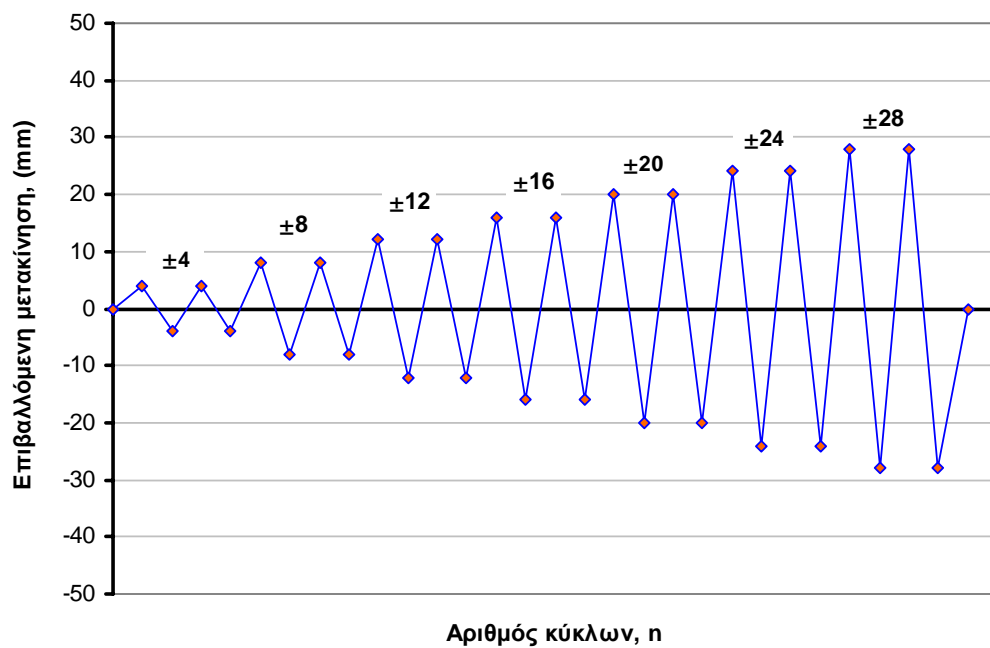
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-9C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και πλέγμα T131		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφιέριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	233	272
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	1νες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	24-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	20-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



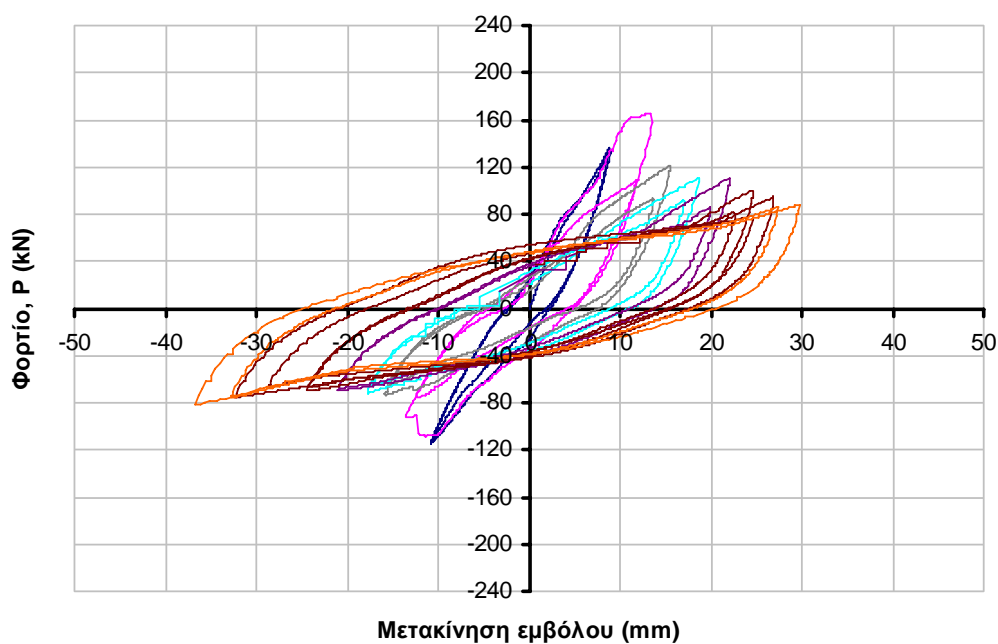
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-9C-4B.



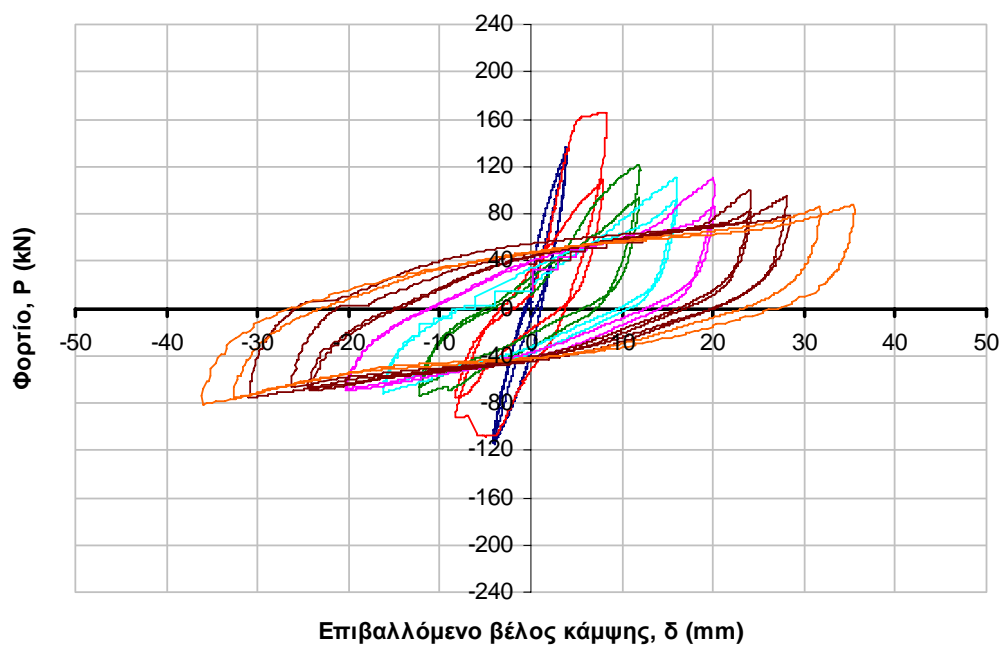
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



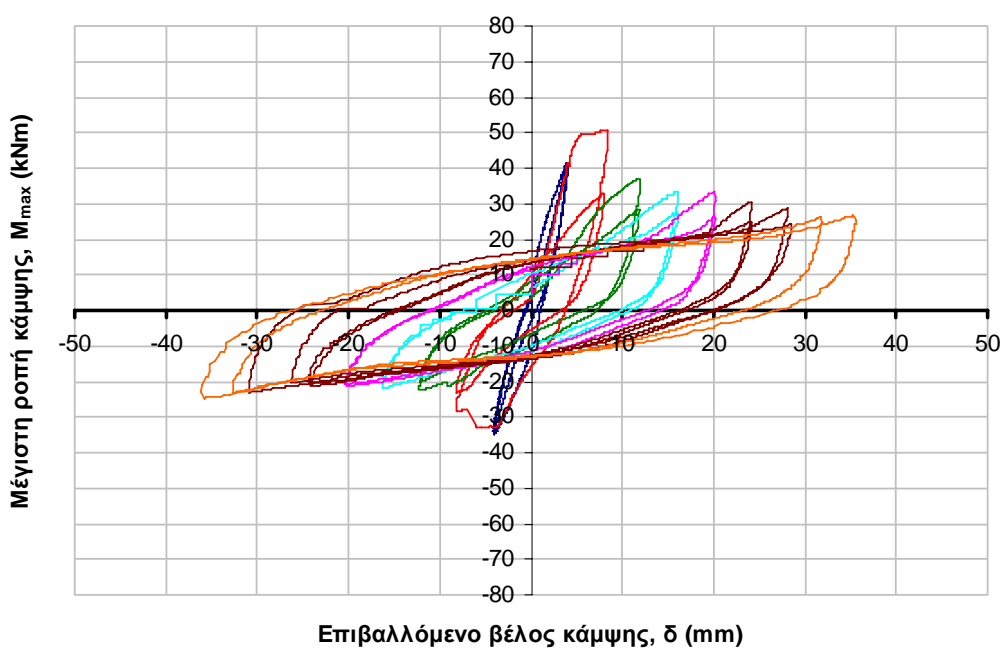
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.




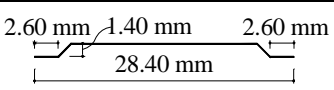
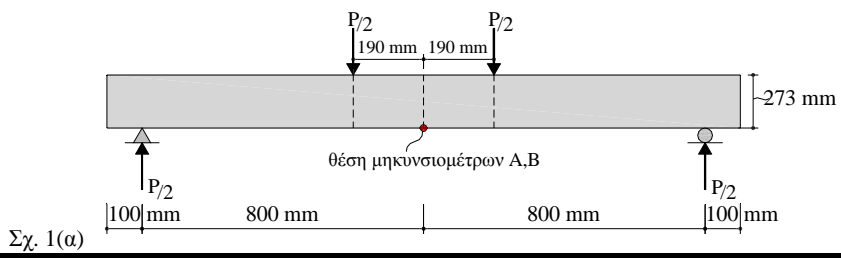
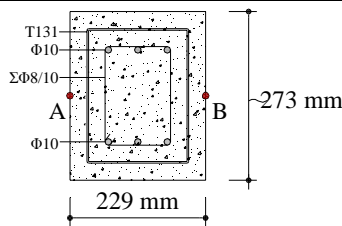
Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

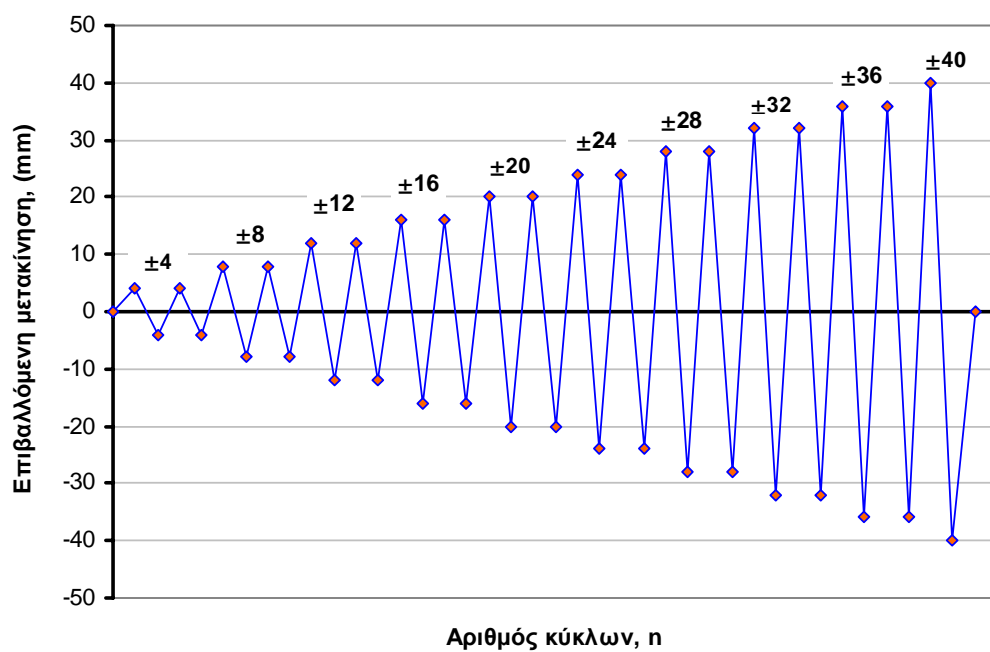
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος			
Κωδικός δοκού	CFRT-10C-4B		
Οπλισμός δοκού	Ενίσχυση συμβατικά οπλισμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και πλέγμα T131		
Δοκιμή – Φόρτιση	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε κάμψη 4 σημείων αμφίεριστης δοκού		
Διαστάσεις δοκού στο μέσο του ανοίγματος (mm)	άνοιγμα	πλάτος	ύψος
	1600	229	273
Τύπος χάλυβα οπλισμού	S500		
Τύπος ινών	Ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής		
Διαστάσεις ινών (mm)	διάμετρος	μήκος	
	0,40	28,40	
Μέση εφελκυστική αντοχή ινών (MPa)	>1400		
Ημερομηνία σκυροδέτησης	02-Μαΐ-07		
Ημερομηνία δοκιμής θλίψης σκυροδέματος	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	-
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	κύλινδροι (305x152 mm)	κύβοι (150x150x150 mm)	
	-	-	83,77
Ημερομηνία δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σκυροδέματος	-		
Μέση εφελκυστική (έμμεση) αντοχή σκυροδέματος (MPa)	-		
Ημερομηνία δοκιμής δοκού	21-Μαρ-08		
 <p>Σχ. 1(α)</p>			
 <p>Σχ. 1(β)</p>			



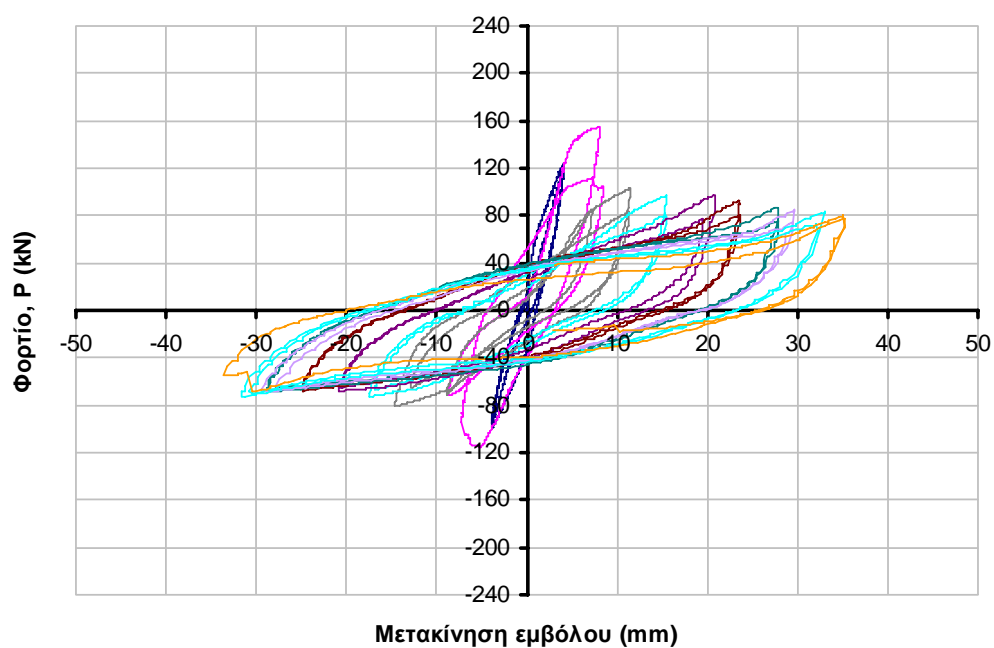
Σχ. 2 - Δοκός CFRT-10C-4B.



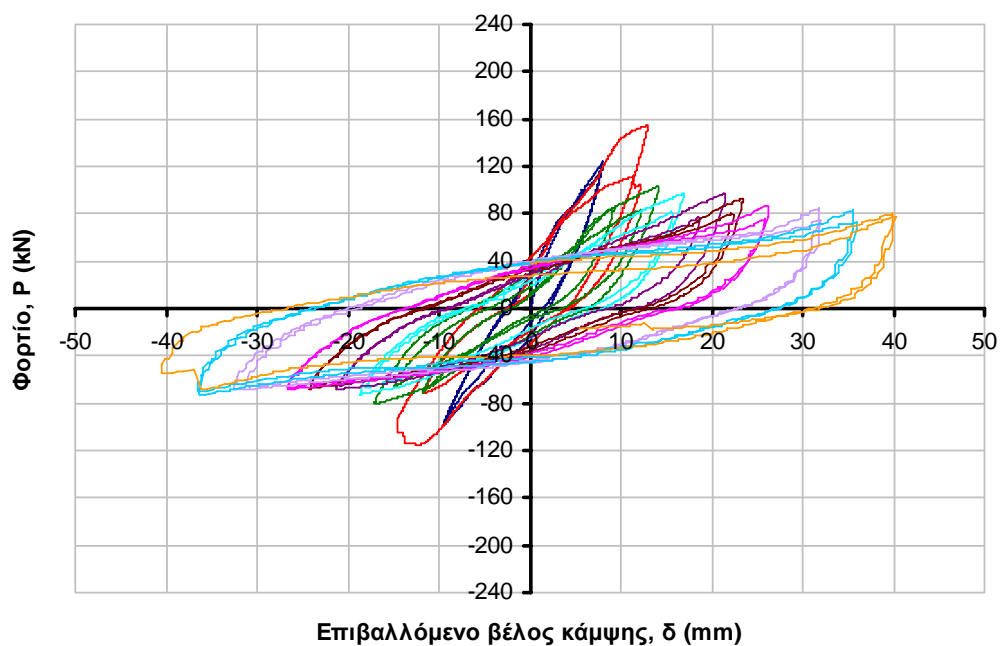
Σχ. 3 - Λεπτομέρεια της περιοχής αστοχίας.



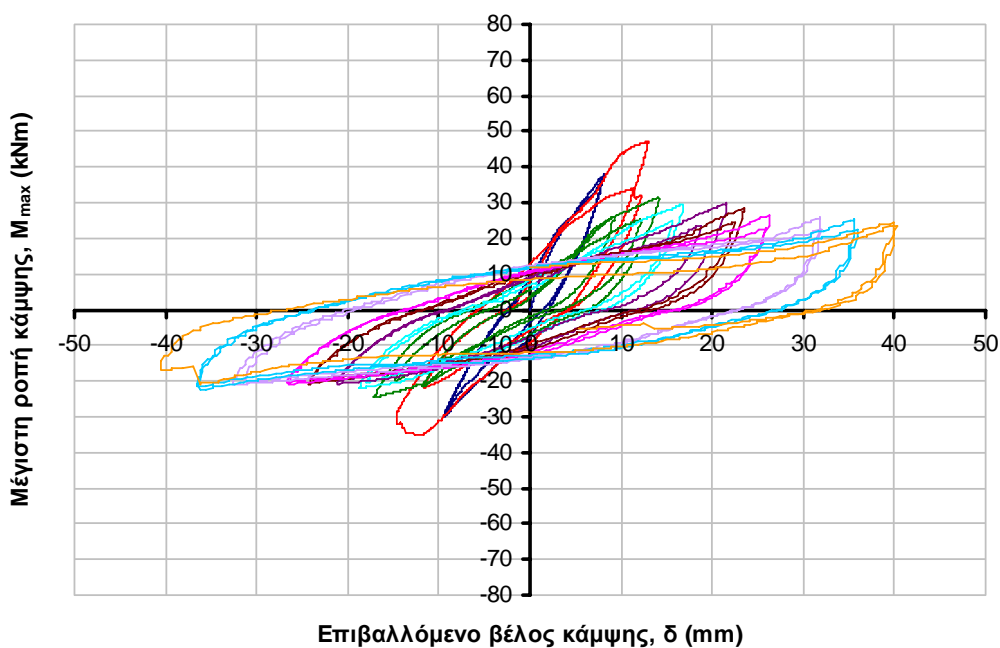
Σχ. 4 - Διάγραμμα ιστορικού φόρτισης.



Σχ. 5 - Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης εμβόλου.



Σχ. 6 - Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης.



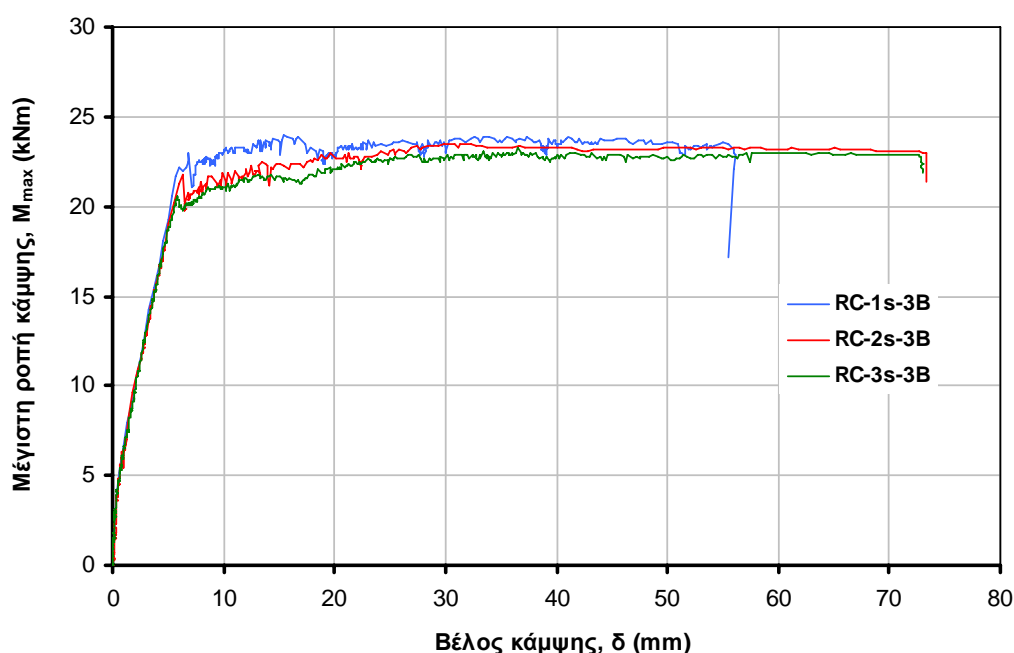
Σχ. 7 - Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής-βέλους κάμψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

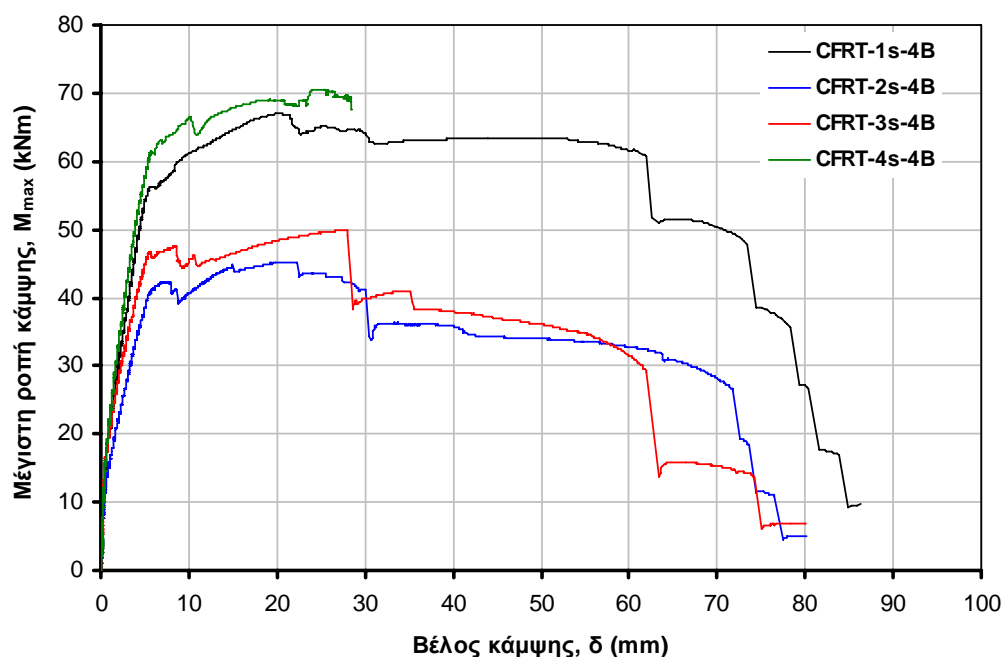
6.1 - Στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης

Οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί RC-1S-3B, RC-2S-3B και RC-3S-3B (RC) και οι ενισχυμένες με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος CFRT-1S-4B, CFRT-2S-4B, CFRT-3S-4B και CFRT-4S-4B (CFRT) υπεβλήθησαν σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων. Από τις ενισχυμένες δοκούς, οι CFRT-1S-4B και CFRT-4S-4B ενισχύθηκαν με διαμήκη $4\varnothing 10$ και εγκάρσιο $\Sigma\varnothing 8/10$ οπλισμό (**CFRT_{4\varnothing 10}**) και οι CFRT-2S-4B και CFRT-3S-4B με μεταλλικό πλέγμα T131 (**CFRT_{T131}**).

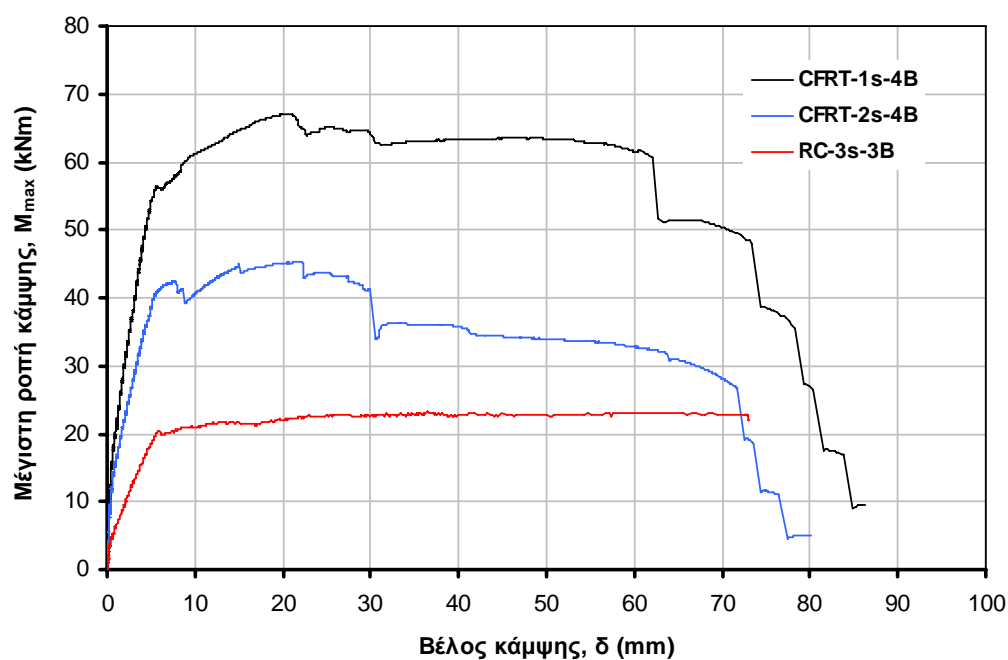
Τα διαγράμματα ροπής κάμψης – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος για την κάθε ομάδα δοκών παρουσιάζονται στα Σχ. 6.1 και 6.2, αντίστοιχα. Στο Σχ. 6.3 παρουσιάζεται σύγκριση χαρακτηριστικών διαγραμμάτων ροπών - βελών κάμψης. Οι αντοχές των δοκών σε ρηγμάτωση, αρχική διαρροή και μέγιστη ροπή κάμψης και τα αντίστοιχα βέλη κάμψης παρουσιάζονται στον Πίν. 6.1.



Σχήμα 6.1 – Διαγράμματα ροπής κάμψης - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών RC σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.



Σχήμα 6.2 – Διαγράμματα ροπής κάμψης - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών CFRT σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



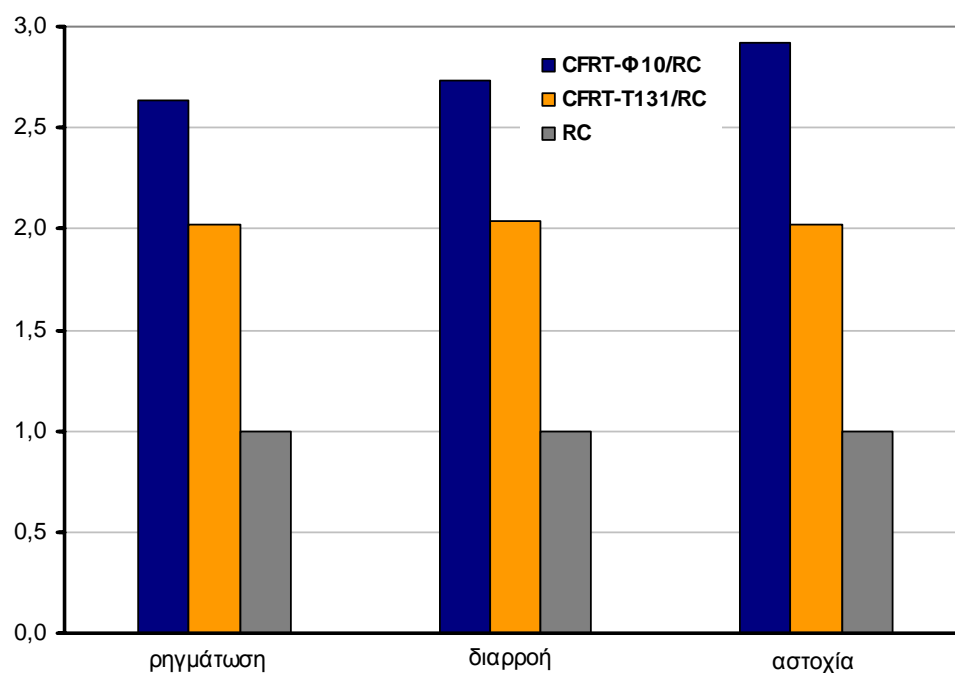
Σχήμα 6.3 – Διαγράμματα ροπής κάμψης - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών RC και CFRT σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης.

Πίνακας 6.1 – Πειραματικά αποτελέσματα των δοκών RC και CFRT σε μονοτονική δοκιμή κάμψης 3 και 4 σημείων.

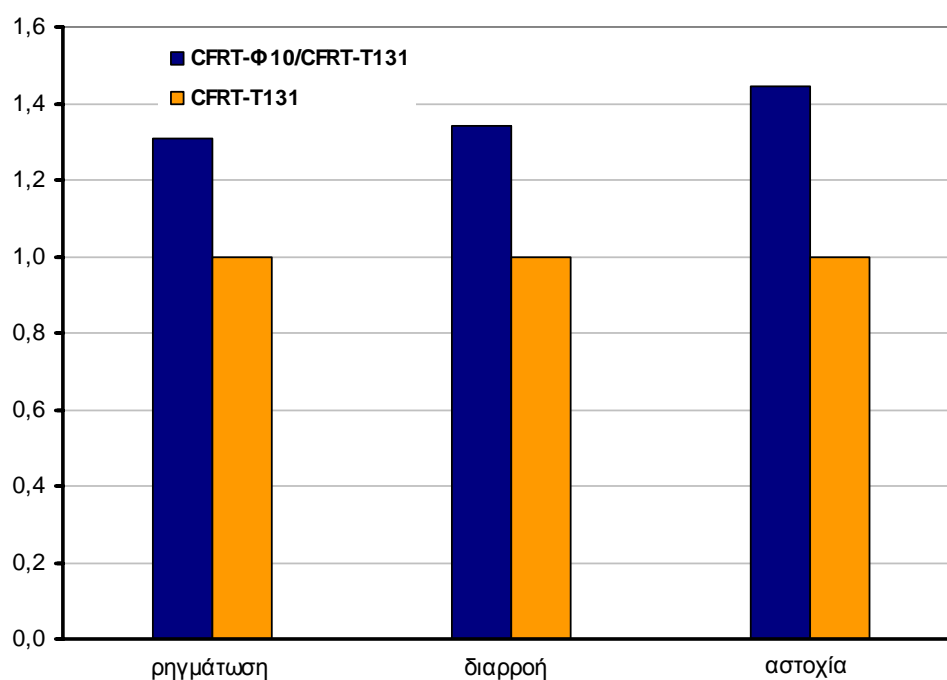
Κωδικός δοκιμίου	M_{cr} (kNm)	δ_{cr} (mm)	M_y (kNm)	δ_y (mm)	M_u (kNm)	δ_u (mm)
RC-1S-3B	3,8	0,3	22,2	6,1	23,9	37,4
RC-2S-3B	3,9	0,4	21,8	6,4	23,5	31,8
RC-3S-3B	3,9	0,4	20,5	5,9	23,2	36,5
CFRT-1S-4B	10,4	0,3	56,3	5,5	67,1	20,4
CFRT-2S-4B	7,4	0,2	40,9	5,4	45,2	21,6
CFRT-3S-4B	8,2	0,2	46,8	5,6	49,9	27,4
CFRT-4S-4B	10,0	0,3	61,4	5,7	70,5	24,6

Οι δοκοί που ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα (CFRT) παρουσίασαν αντοχή σε κάμψη μεγαλύτερη κατά 2÷3 φορές σε σχέση με τις αρχικές δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος (RC). Ειδικότερα, οι ενισχυμένες δοκοί CFRT_{4Ø10} παρουσίασαν κατά μέσο όρο σε σύγκριση με τις αρχικές δοκούς RC μεγαλύτερη αντοχή κατά 2,6 φορές σε ρηγμάτωση, 2,7 φορές σε διαρροή και 2,9 φορές στη μέγιστη ροπή σε κάμψη (Σχ. 6.4). Οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν κατά μέσο όρο σε σύγκριση με τις αρχικές δοκούς RC μεγαλύτερη αντοχή κατά 2 φορές τόσο στη ρηγμάτωση, όσο και στη διαρροή και στη μέγιστη ροπή σε κάμψη (Σχ. 6.4).

Η μέση τιμή της αντοχής των ενισχυμένων δοκών με διαμήκεις ράβδους σε σύγκριση με εκείνη των ενισχυμένων δοκών με πλέγμα T131 ήταν αυξημένη κατά 31% στη ρηγμάτωση, 34% στη διαρροή και 45% στη μέγιστη τιμή της σε κάμψη (Σχ. 6.5).



Σχήμα 6.4 – Λόγος ροπής κάμψης M_{CFRT}/M_{RC} των δοκών CFRT προς την αντίστοιχη των RC.

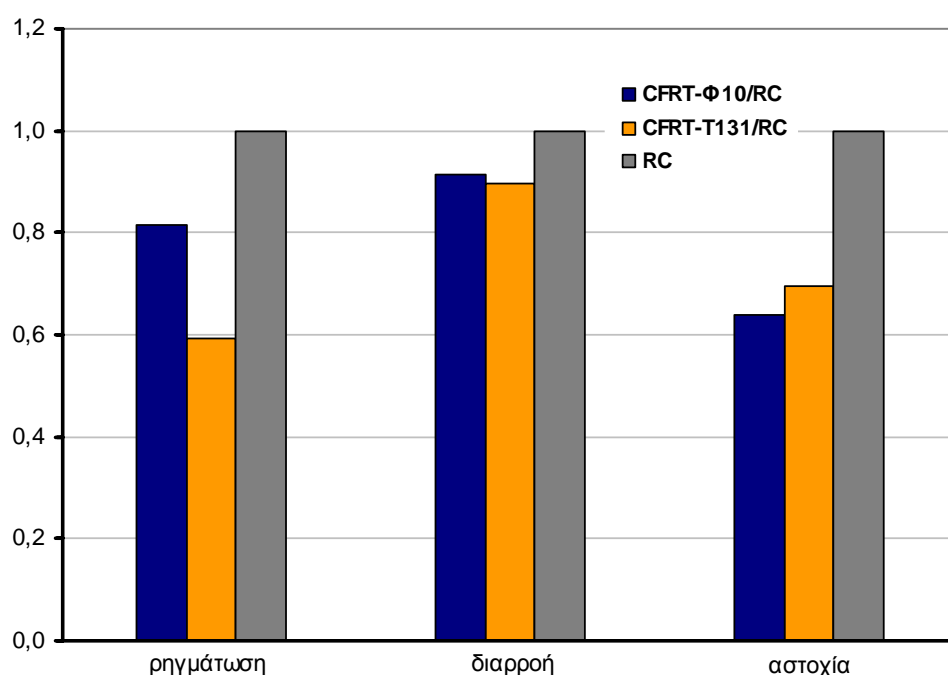


Σχήμα 6.5 – Λόγος ροπής κάμψης $M_{CFRT-Φ10}/M_{CFRT-T131}$ των δοκών $CFRT_{Φ10}$ προς την αντίστοιχη των $CFRT_{T131}$.

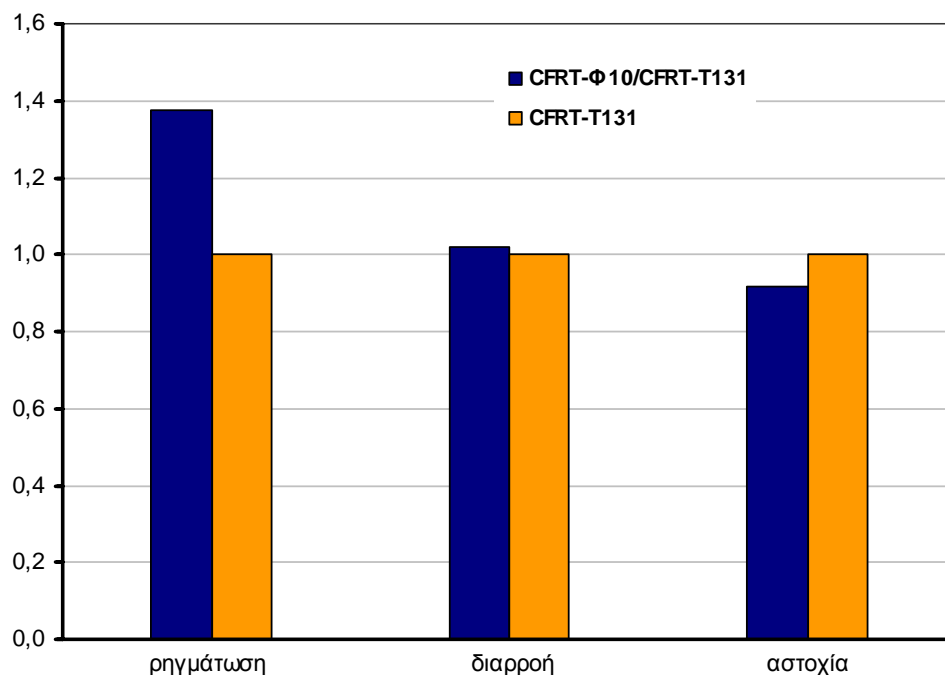
Η μέγιστη τιμή της αντοχής σε κάμψη των ενισχυμένων δοκών CFRT₄₀₁₀ και CFRT_{T131} επιτεύχθηκε για βέλη κάμψης αντίστοιχα 4 και 4,5 φορές περισσότερο κατά μέσο όρο σε σχέση με εκείνα της αρχικής διαρροής. Ο αντίστοιχος λόγος για τις συμβατικές δοκούς ήταν 5,7 φορές. Η μέση τιμή του βέλους κάμψης των ενισχυμένων δοκών με διαμήκεις ράβδους έναντι των αρχικών ήταν μικρότερη κατά 18% στη ρηγμάτωση, 9% στη διαρροή και κατά 36% στη μέγιστη αντοχή (Σχ. 6.6). Αντίστοιχα, η μέση τιμή της παραμόρφωσης των ενισχυμένων δοκών με πλέγμα έναντι των αρχικών δοκών ήταν μικρότερη κατά 41% στη ρηγμάτωση, 10% στη διαρροή και κατά 32% στη μέγιστη αντοχή (Σχ. 6.7).

Στις ενισχυμένες δοκούς CFRT₄₀₁₀ τα βέλη κάμψης ήταν κατά μέσο όρο σε σχέση με τα αντίστοιχα των ενισχυμένων δοκών CFRT_{T131} κατά 38% μεγαλύτερα στη ρηγμάτωση, κατά 2% μεγαλύτερα στην αρχική διαρροή και κατά 6% μικρότερα στη μέγιστη αντοχή (Σχ. 6.7).

Για παραμορφώσεις της τάξεως του $\delta=30\div 40\text{mm}$ όπου οι συμβατικές δοκοί φτάνουν τη μέγιστη καμπτική αντοχή τους, οι αντίστοιχες αντοχές των ενισχυμένων δοκών είναι μεγαλύτερες κατά 2,7 φορές όταν πρόκειται για τις δοκούς CFRT₄₀₁₀ και κατά 1,6 φορές αν πρόκειται για τις CFRT_{T131}.



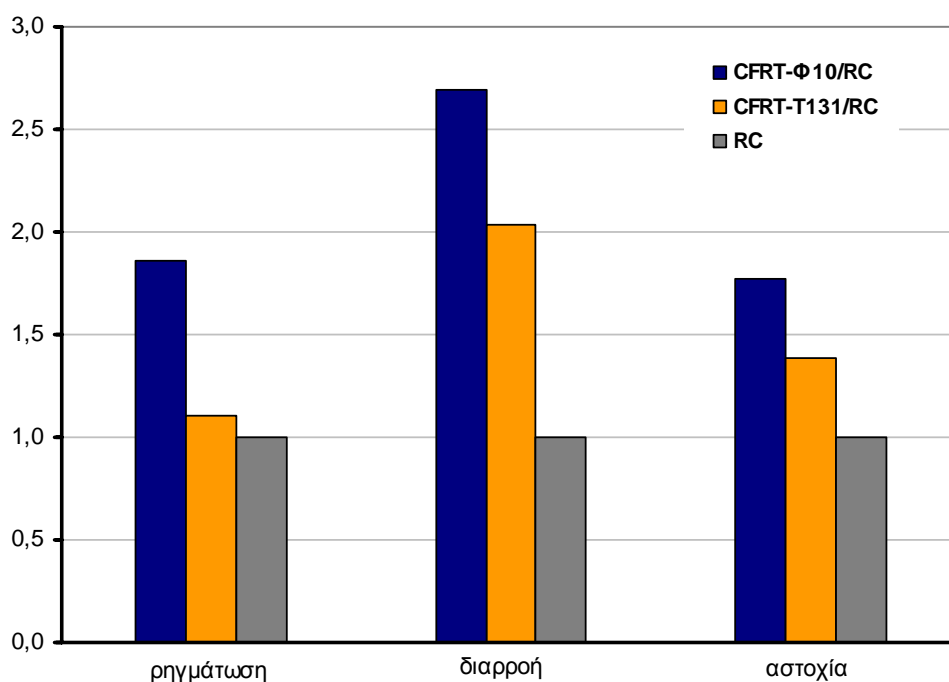
Σχήμα 6.6 – Λόγος βελών κάμψης των δοκών CFRT προς τα αντίστοιχα των RC.



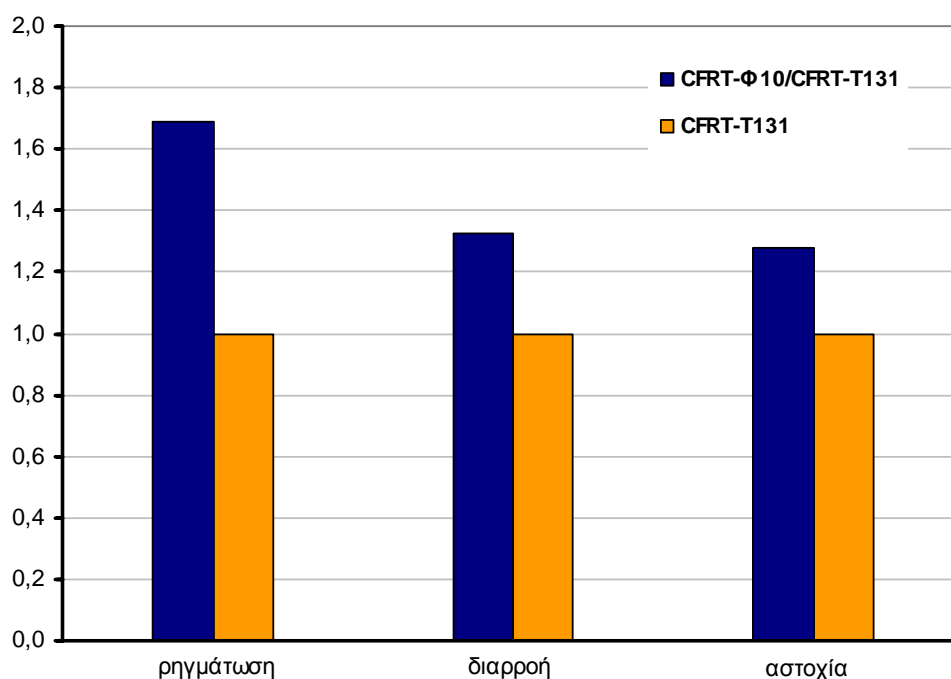
Σχήμα 6.7 – Λόγος βελών κάμψης των δοκών CFRT_{Φ10} προς τα αντίστοιχα των CFRT_{T131}.

Η συνολική ενέργεια απόσβεσης των ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα ήταν ως τη διαρροή κατά 2 έως 2,5 φορές περισσότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη των συμβατικών δοκών και κατά 1,4 έως 1,8 φορές περισσότερη ως την αστοχία. Ειδικότερα, η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών με διαμήκεις ράβδους σε σχέση με εκείνη των αρχικών δοκών ήταν μεγαλύτερη κατά 1,9 φορές ως τη ρηγμάτωση, 2,7 φορές ως τη διαρροή και κατά 1,8 φορές ως τη μέγιστη ροπή κάμψης (Σχ. 6.8). Αντίστοιχα, η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών με πλέγμα σε σχέση με εκείνη των αρχικών δοκών ήταν μεγαλύτερη κατά 1,1 φορές ως τη ρηγμάτωση, 2 φορές ως τη διαρροή και 1,4 ως τη μέγιστη ροπή κάμψης (Σχ. 6.8).

Η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών CFRT₄₀₁₀ σε σύγκριση με εκείνη των ενισχυμένων CFRT_{T131} ήταν περισσότερη κατά 69% ως τη ρηγμάτωση, κατά 32% ως τη διαρροή και κατά 28% ως τη μέγιστη αντοχή σε κάμψη (Σχ. 6.9).



Σχήμα 6.8 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας E_{CFRT}/E_{RC} των δοκών CFRT προς την αντίστοιχη των RC.



Σχήμα 6.9 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας $E_{CFRT-Φ10}/E_{CFRT-T131}$ των δοκών $CFRT_{4010}$ προς την αντίστοιχη των $CFRT_{T131}$.

Στις ενισχυμένες δοκούς CFRT μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής παρατηρείται μείωση της φέρουσας ικανότητας τους λόγω της απώλειας της συνεισφοράς των ινών στην εφελκυστική περιοχή των δοκών. Στις δοκούς CFRT_{4Ø10} η πτώση αυτή είναι σχετικά ομαλή, της τάξεως του 7% περίπου και συμβαίνει για παραμορφώσεις 1,5 φορά μεγαλύτερες σε σχέση με της μέγιστης αντοχής (Σχ. 6.2). Η αντίστοιχη πτώση στις δοκούς CFRT_{T131} είναι μεγαλύτερη, της τάξεως του 23% περίπου, πιο απότομη και συμβαίνει για παραμορφώσεις 1,2 φορές μεγαλύτερες εκείνων της μέγιστης αντοχής.

Η δυσκαμψία μετά τη ρηγμάτωση των ενισχυμένων δοκών σε σύγκριση με των αρχικών δοκών RC αυξήθηκε κατά 15% στις δοκούς με τις διαμήκεις ράβδους και κατά 11% στις δοκούς με το πλέγμα. Η δυσκαμψία των δοκών με μανδύα και οπλισμό 4Ø10 ήταν κατά 4% μεγαλύτερη εκείνων με μανδύα και πλέγμα. Η αρχική δυσκαμψία των ενισχυμένων δοκών είναι ίδια, όπως ήταν και αναμενόμενο.

Ο αριθμός των τριχοειδών ρωγμών ήταν αρκετά μεγαλύτερος στις ενισχυμένες δοκούς (Σχ. 6.10) σε σχέση με τις συμβατικά οπλισμένες δοκούς (Σχ. 6.11), ενώ με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της καταπόνησης των δοκών με μανδύα υπήρξε συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε μια περιοχή, με έντονη αύξηση του ανοίγματος ουσιαστικά μίας ή δύο ρωγμών (Σχ. 6.12, 6.13, 6.14) και ταυτόχρονη απομείωση της αντοχής τους.

Η αντοχή που προσέδωσε ο ινοπλισμένος μανδύας στις αρχικές δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη κατά 20% από την αντοχή που θα μπορούσε να επιτευχθεί βάσει θεωρητικών αναλύσεων με συμβατικό σκυροδέμα αντοχής 90 MPa (C90/105), αλλά και με μικρότερη ικανότητα παραμόρφωσης λόγω της απουσίας των μεταλλικών ινών. Η αντοχή του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 73 MPa και οι δυνατότητες παραμόρφωσης των δοκών εφάμιλλες των συμβατικών. Επιπλέον, αν οι συμβατικές δοκοί είχαν ενισχυθεί με σκυροδέμα ίδιας ποιότητας με εκείνο από το οποίο αρχικά κατασκευάστηκαν, αντοχής περίπου 28 MPa, θα είχαν μια αύξηση της μέγιστης αντοχής τους κατά 1,4 φορά αν είχαν ενισχυθεί και με το πλέγμα και 2 φορές αν είχαν ενισχυθεί και με τις διαμήκεις ράβδους, έναντι 2 και 3 φορές που παρατηρήθηκε αντίστοιχα στις δοκούς με το συγκεκριμένο ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα.



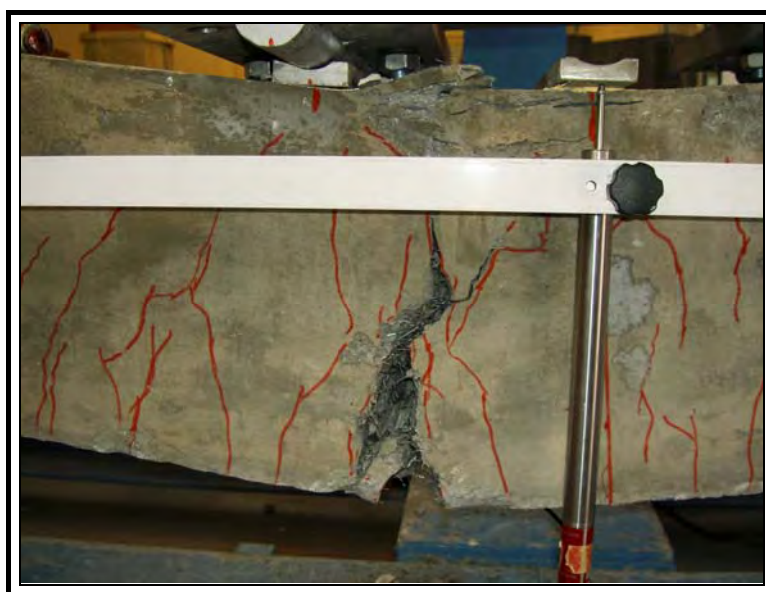
Σχήμα 6.10 – Ρηγμάτωση ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



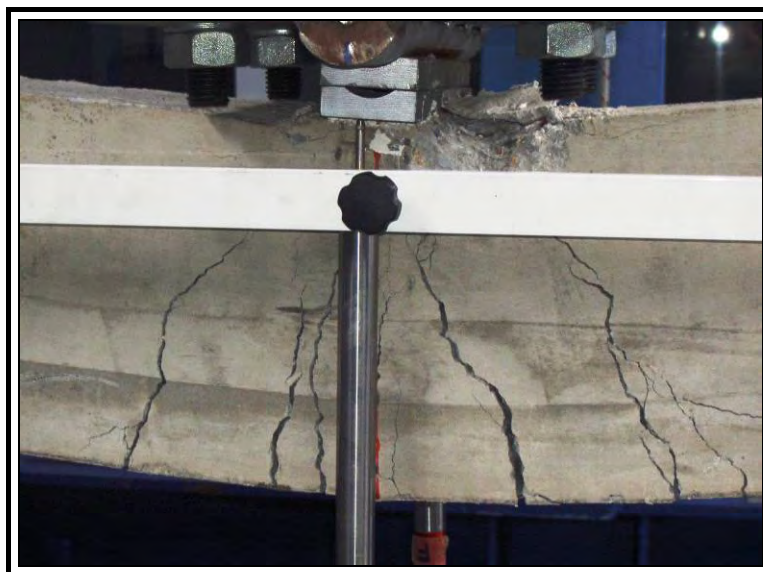
Σχήμα 6.11 – Ρηγμάτωση συμβατικά οπλισμένης δοκού σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.



Σχήμα 6.12 – Αστοχία ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 6.13 – Η περιοχή αστοχίας ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 6.14 – Η περιοχή αστοχίας συμβατικά οπλισμένης δοκού σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 3-σημείων.

6.2 - Συμπεράσματα

Συνολικά εξετάστηκαν επτά (7) συμβατικά οπλισμένες (RC) και ενισχυμένες με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (CFRT) δοκοί σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης 3- και 4-σημείων.

Από τις παραπάνω πειραματικές δοκιμές προέκυψαν:

1. Οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν αντοχή σε ρηγματώση, διαρροή και μέγιστη ροπή κάμψης 2,6 έως 2,9 φορές αυτής των συμβατικών δοκών στην περίπτωση που ήταν οπλισμένες με διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό και 2 φορές αυτής των συμβατικών δοκών στην περίπτωση που ήταν οπλισμένες με μεταλλικό πλέγμα.
2. Οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας περίπου 1,5 έως και 2 φορές αυτής των συμβατικών δοκών Ο/Σ στην περίπτωση που ήταν οπλισμένες με μεταλλικό πλέγμα ή διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό, αντίστοιχα. Μεγαλύτερη διαφορά παρατηρήθηκε στη διαρροή, όπου η ενέργεια που απορροφήθηκε από τις ενισχυμένες δοκούς με διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό ή μεταλλικό πλέγμα ήταν 2,7 και 2 φορές αυτής των συμβατικών δοκών, αντίστοιχα.
3. Οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν δυσκαμψία μετά τη ρηγματώση αυξημένη περίπου κατά 10% έως 15% έναντι των συμβατικών δοκών Ο/Σ, στην περίπτωση που οι ενισχυμένες δοκοί ήταν οπλισμένες αντίστοιχα με μεταλλικό πλέγμα ή διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό. Οι ενισχυμένες δοκοί με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος παρουσίασαν περισσότερες ρωγμές μικρότερου ανοίγματος σε σχέση με τις συμβατικά οπλισμένες (RC).

4. Οι ενισχυμένες δοκοί με διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό παρουσίασαν αντοχή σε ρηγμάτωση, διαρροή και μέγιστη καμπτική αντοχή περίπου 1,3 έως 1,5 φορές αυτής των ενισχυμένων δοκών με μεταλλικό πλέγμα και για παρόμοιες τιμές των αντίστοιχων βελών κάμψης.
5. Οι ενισχυμένες δοκοί με διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό παρουσίασαν ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυξημένη περίπου κατά 43% αυτής των ενισχυμένων δοκών με μεταλλικό πλέγμα.
6. Οι δοκοί με διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό παρουσίασαν μικρότερη και ομαλότερη πτώση της αντοχής λόγω απώλειας ινών σε σχέση με τις δοκούς με μεταλλικό πλέγμα.

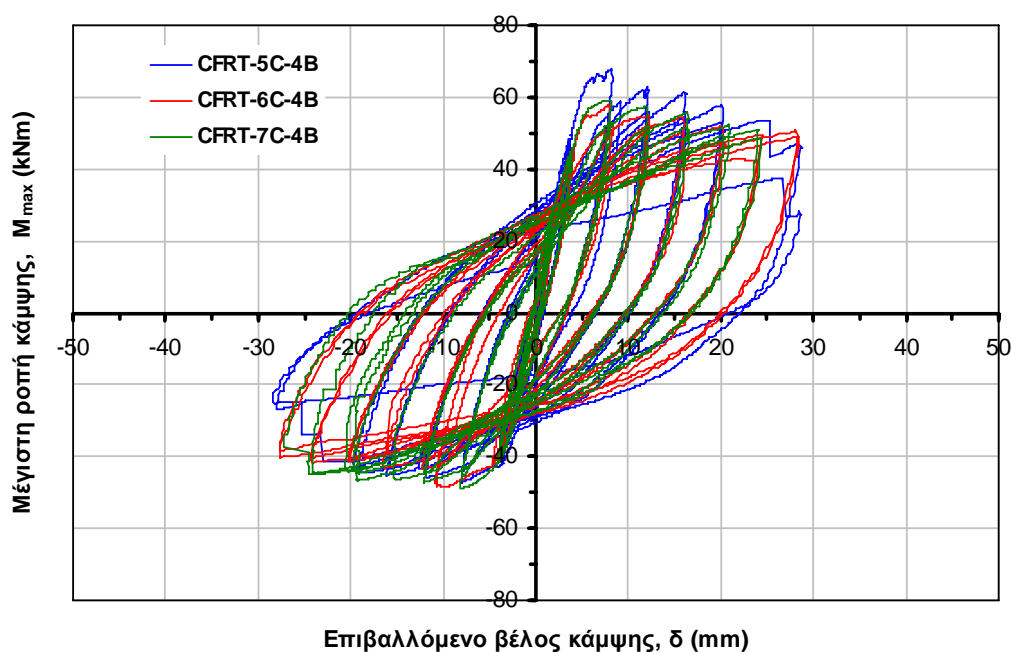
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 - Στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης

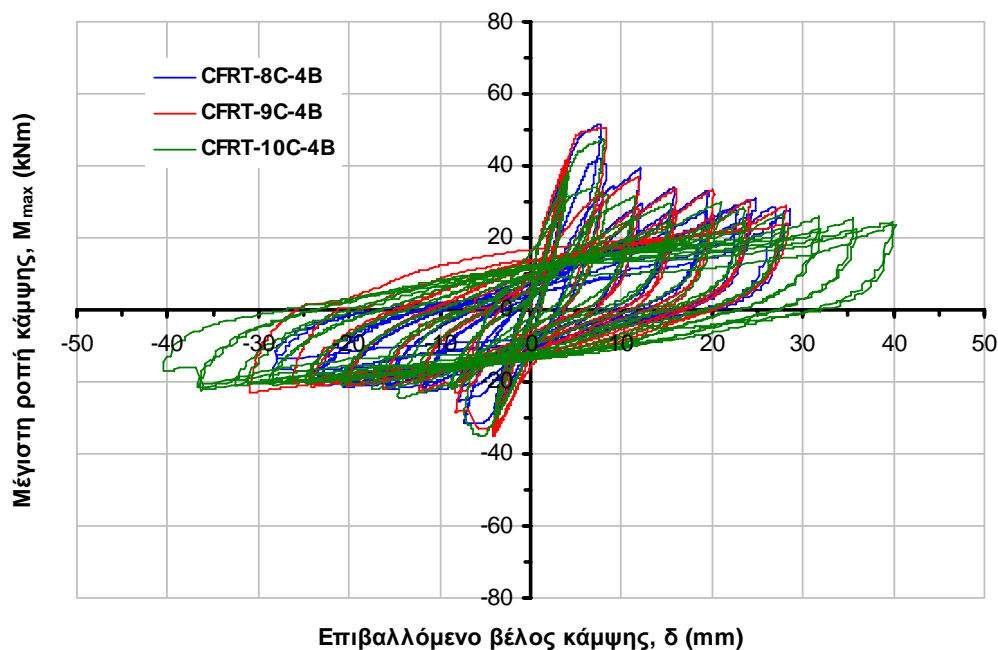
Οι συμβατικά οπλισμένες δοκοί RC-4C-3B, RC-5C-4B, RC-6C-4B και οι ενισχυμένες με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος CFRT-5S-4B, CFRT-6S-4B, CFRT-7S-4B, CFRT-8S-4B, CFRT-9S-4B και CFRT-10S-4B υπεβλήθησαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων. Από τις ενισχυμένες δοκούς, οι CFRT-5S-4B, CFRT-6S-4B και CFRT-7S-4B ενισχύθηκαν με διαμήκη 4Ø10 και εγκάρσιο ΣΦ8/10 οπλισμό (CFRT_{4Ø10}) και οι CFRT-8S-4B, CFRT-9S-4B και CFRT-10S-4B με μεταλλικό πλέγμα T131 (CFRT_{T131}). Η δοκός RC-4C-3B εξετάστηκε σε δοκιμή κάμψης 3-σημείων. Η πειραματική διάταξη δεν επέτρεψε την τοποθέτηση μηκυσιομέτρων στο μέσον του ανοίγματος, άρα η μόνη μέτρηση παραμόρφωσης της δοκού ήταν αυτή της μετακίνησης του υδραυλικού εμβόλου.

Τα διαγράμματα μέγιστης ροπής κάμψης – βέλους κάμψης για την κάθε ομάδα δοκών παρουσιάζονται στα Σχ. 7.1, 7.2 και 7.3, αντίστοιχα. Στα Σχ. 7.4, 7.5 και 7.6 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης ροπής κάμψης – βέλους κάμψης ανάμεσα στα CFRT_{4Ø10} και RC, στα CFRT_{T131} και RC και στα CFRT_{4Ø10} και CFRT_{T131} δοκίμια, αντίστοιχα και στο Σχ. 7.7 οι περιβάλλουσες ροπής κάμψης – βέλους κάμψης των 1^{ωv} κύκλων αυτών. Οι αντοχές των δοκών σε ρηγμάτωση, πρώτη διαρροή και μέγιστη ροπή κάμψης μαζί με τα αντίστοιχα βέλη τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

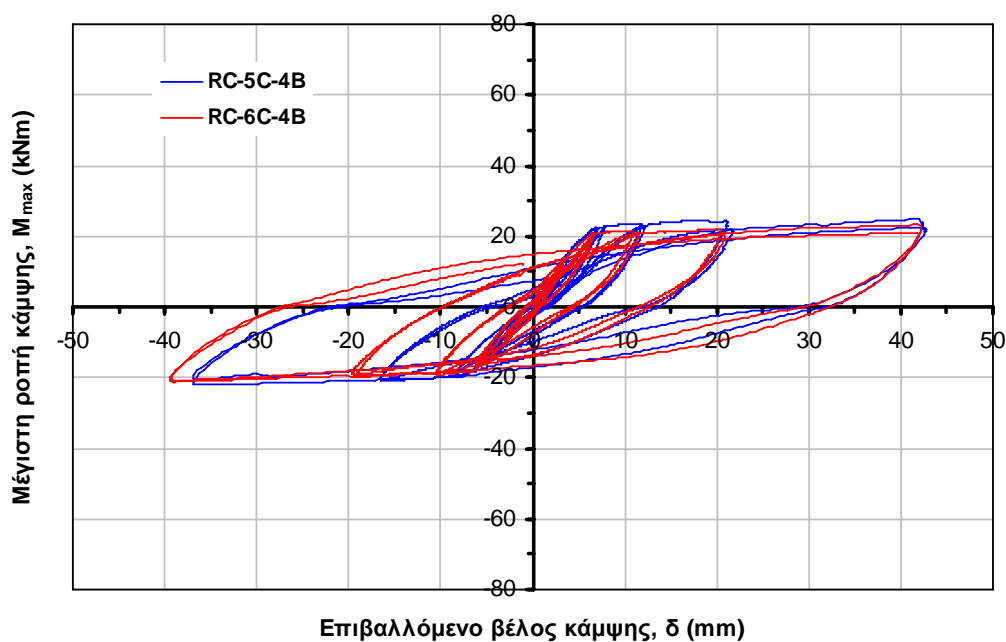
Οι συγκρίσεις των διαφόρων τιμών που ακολουθούν παρακάτω και αφορούν τα πειραματικά αποτελέσματα αναφέρονται σε μέσους όρους αυτών.



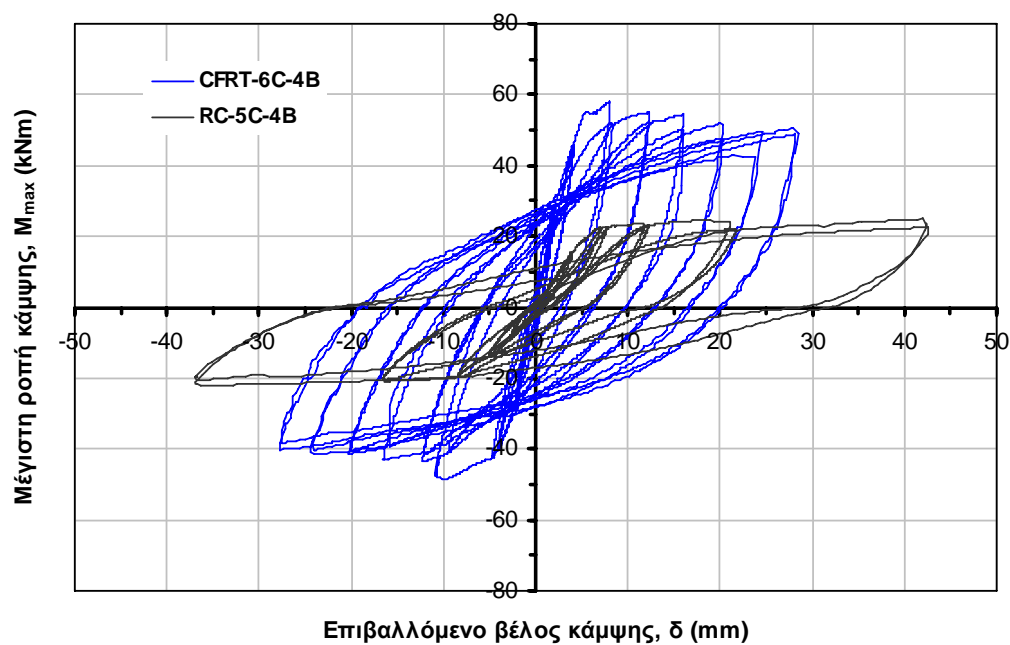
Σχήμα 7.1 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - βέλους κάμψης των δοκών CFRT με διαμήκη οπλισμό 4Ø10.



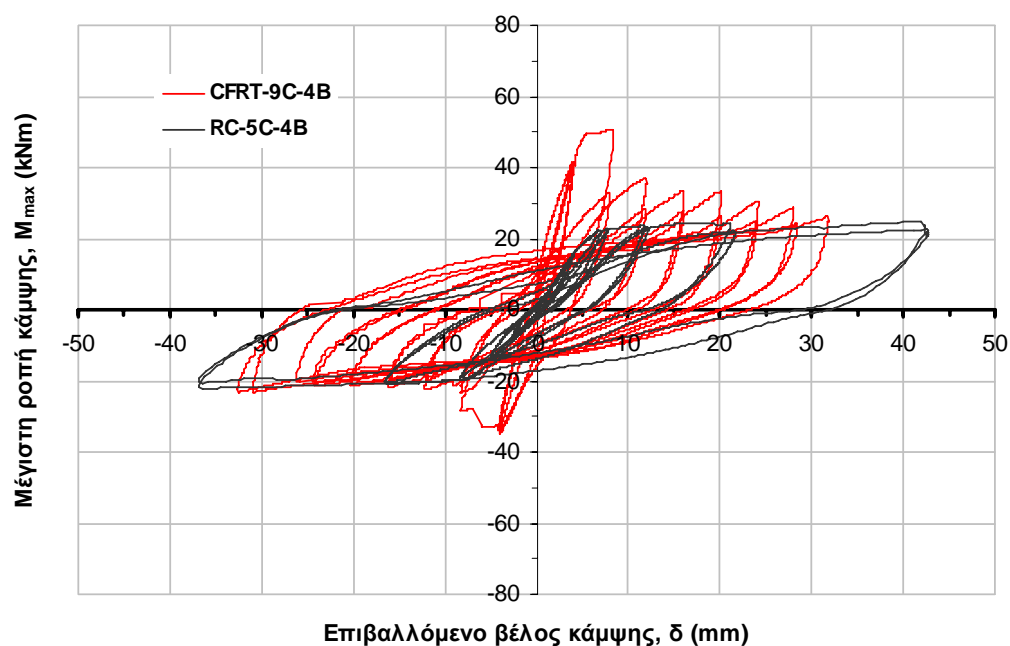
Σχήμα 7.2 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - βέλους κάμψης των δοκών CFRT με μεταλλικό πλέγμα T131.



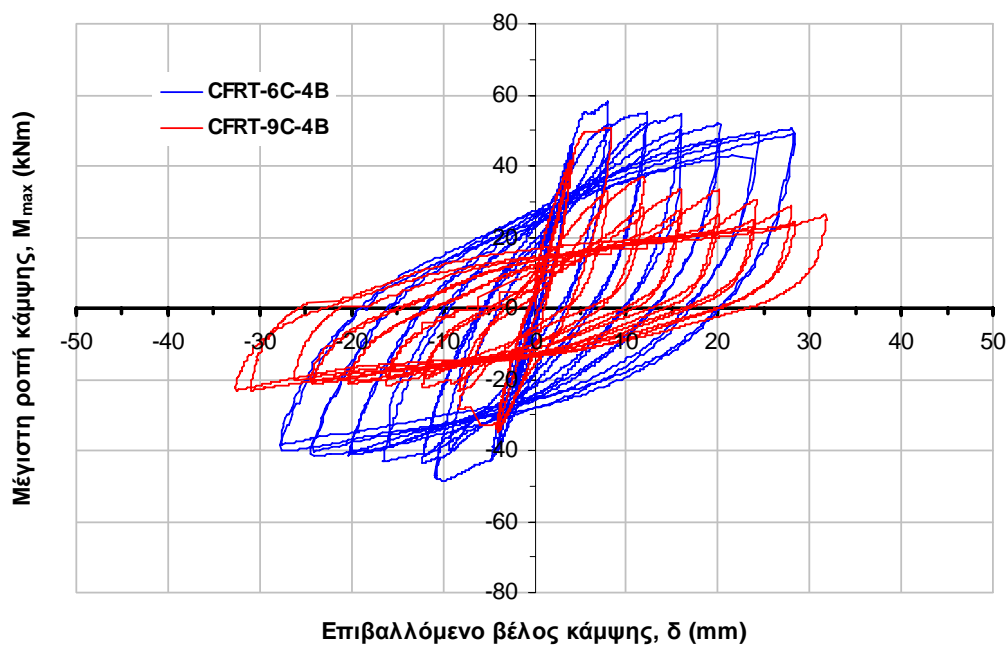
Σχήμα 7.3 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - βέλους κάμψης των συμβατικών δοκών RC.



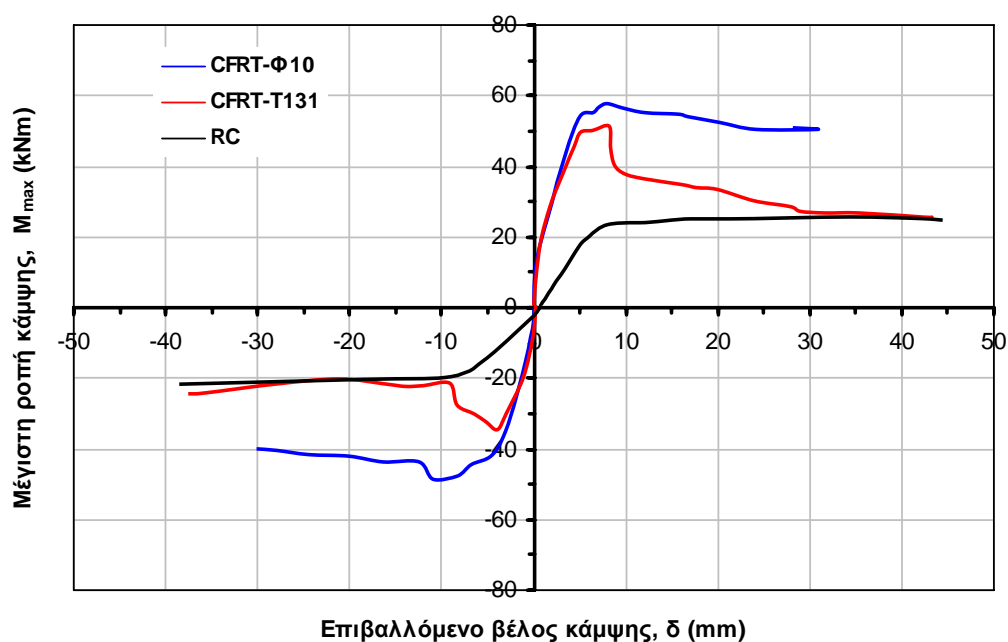
Σχήμα 7.4 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - βέλους κάμψης της δοκού CFRT₄₀₁₀ και RC.



Σχήμα 7.5 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - βέλους κάμψης της δοκού CFRT_{T131} και RC.



Σχήμα 7.6 – Διάγραμμα μέγιστης ροπής κάμψης - μέγιστου βέλους κάμψης της δοκού CFRT_{4Ø10} και CFRT_{T131}.



Σχήμα 7.7 – Περιβάλλουσα ροπής κάμψης - βέλους κάμψης 1^{ου} κύκλου φόρτισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών CFRT_{4Ø10}, CFRT_{T131} και RC.

Πίνακας 7.1 – Πειραματικά αποτελέσματα των δοκών RC και CFRT σε στατική ανακυκλιζόμενη δοκιμή κάμψης 4-σημείων.

κωδικός δοκιμίου	M_{cr} (kNm)	δ_{cr} (mm)	M_y (kNm)	δ_y (mm)	M_u (kNm)	δ_u (mm)
RC-4C-3B	3,7	-	25,6	-	26,5	-
RC-5C-4B	2,5	0,5	22,5	6,9	24,9	42,0
RC-6C-4B	3,1	0,4	20,8	6,8	23,2	41,7
CFRT-5C-4B	10,8	0,3	61,2	5,0	67,6	8,2
CFRT-6C-4B	10,9	0,4	55,0	5,5	58,0	8,0
CFRT-7C-4B	10,7	0,3	54,8	5,2	59,0	8,1
CFRT-8C-4B	7,8	0,2	41,5	4,3	51,5	7,8
CFRT-9C-4B	8,2	0,2	46,0	4,5	50,7	8,3
CFRT-10C-4B	8,0	0,2	42,0	4,9	47,3	8,0

Οι ενισχυμένες δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν αντοχή σε ρηγμάτωση, σε διαρροή και φέρουσα ικανότητα 3,5, 2,5 και 2,5 φορές αντίστοιχα αυτής των αρχικών συμβατικών δοκών RC (Σχ. 7.8), ενώ οι ενισχυμένες δοκοί με πλέγμα CFRT_{T131} σε σύγκριση με τις δοκούς RC είχαν μεγαλύτερες αντοχές κατά 2,6 φορές σε ρηγμάτωση, 1,9 φορές σε διαρροή και 2 φορές στη μέγιστη καμπτική αντοχή (Σχ. 7.8). Οι αντίστοιχες τιμές των CFRT₄₀₁₀ σε ρηγμάτωση, διαρροή και μέγιστη καμπτική αντοχή σε σύγκριση με τις CFRT_{T131} ήταν μεγαλύτερες κατά 1,35, 1,3 και 1,2 φορές (Σχ. 7.9). Για σχετικά υψηλές τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης ($\delta = \pm 20$ mm) οι ενισχυμένες δοκοί CFRT₄₀₁₀ και CFRT_{T131} παρουσίασαν έναντι των δοκών RC μεγαλύτερη αντοχή κατά 2,3 και 1,2 φορές, αντίστοιχα, ενώ οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ κατά 2 φορές σε σχέση με τις CFRT_{T131}.

Για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις μεγαλύτερες από $\delta = \pm 8$ mm, όπου γίνεται η πρώτη διαρροή των δοκιμίων, οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή μέσης καμπτικής αντοχής σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών δοκών RC κατά 2,5 φορές (Σχ. 7.10), είτε επρόκειτο για θετικές ροπές είτε για αρνητικές ροπές, ενώ σε σχέση με τις CFRT_{T131} μεγαλύτερη κατά 1,7 φορές για θετικές ροπές και 2 φορές για αρνητικές ροπές (Σχ. 7.12). Αντίστοιχα, οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή μέσης καμπτικής αντοχής σε σχέση με τις συμβατικές δοκούς RC κατά 1,45 φορές για θετικές ροπές και 1,3 φορές για αρνητικές ροπές (Σχ. 7.11).

Για σχετικά υψηλές τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης ($\delta = \pm 24$ mm), που αντιστοιχεί περίπου στο τριπλάσιο της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης της αρχικής διαρροής των δοκών ($\delta = \pm 8$ mm), οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών 1^{ου} κύκλου των παραπάνω παραμορφώσεων (δ_{24}/δ_8) κατά 17% και κατά

10% (δ_{24}/δ_8) μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} κύκλου. Οι αντίστοιχες τιμές για τις δοκούς CFRT_{T131} είναι 41% και 40% (δ_{24}/δ_8).

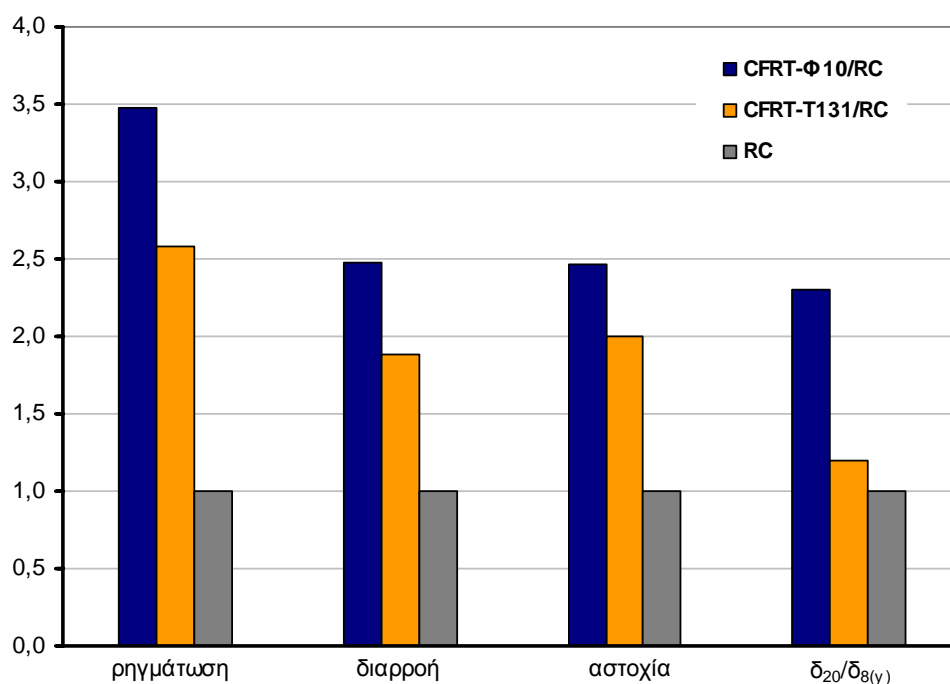
Για επιβαλλόμενο βέλος $\delta=\pm 8$ mm, η πτώση απόκρισης των δοκών CFRT_{4Ø10} μεταξύ των θετικών ροπών του 1^{ου} και του 2^{ου} κύκλου της συγκεκριμένης παραμόρφωσης είναι 12% και 11% μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για τις δοκούς CFRT_{T131} είναι 27% και 33%. Για επιβαλλόμενο βέλος $\delta=\pm 24$ mm, οι παραπάνω τιμές για τις CFRT_{4Ø10} είναι 4% και 2% και για τις CFRT_{T131} 8% και 5%, αντίστοιχα.

Γενικότερα, οι δοκοί CFRT_{4Ø10} παρουσίασαν πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών των 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 12% (Σχ. 7.13), πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 10% (Σχ. 7.14), πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 8% (Σχ. 7.15) και πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 7% (Σχ. 7.16).

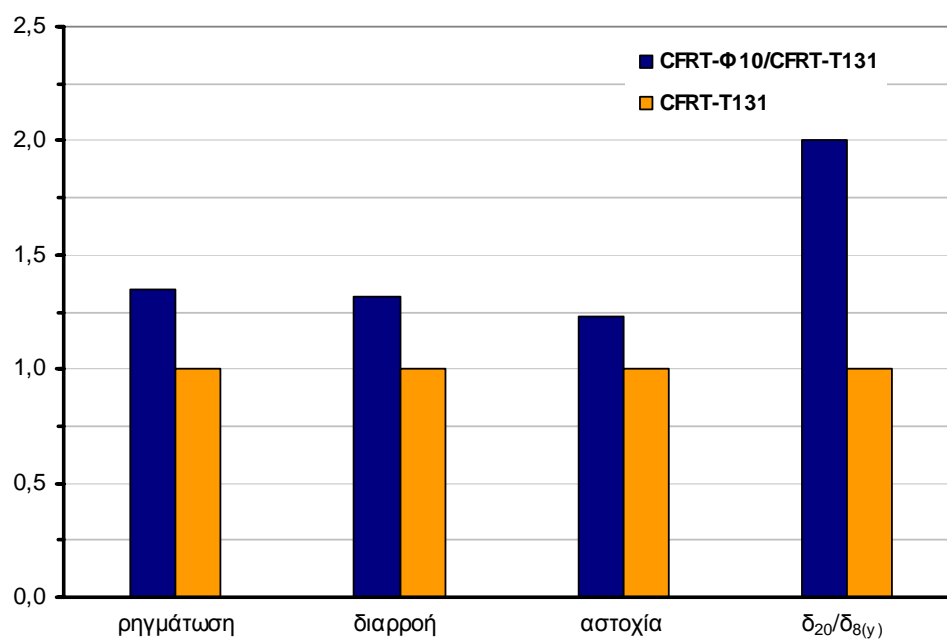
Κατά αντιστοιχία, οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν πτώση απόκρισης μεταξύ του 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 39% (Σχ. 7.13, 7.14), είτε πρόκειται για θετικές ροπές είτε για αρνητικές, πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 16% (Σχ. 7.15) και πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 12% (Σχ. 7.16).

Οι αντίστοιχες τιμές πτώσης της καμπτικής απόκρισης για τις συμβατικά οπλισμένες δοκούς μεταξύ των θετικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης είναι 5% (Σχ. 7.15) και μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 7% (Σχ. 7.16).

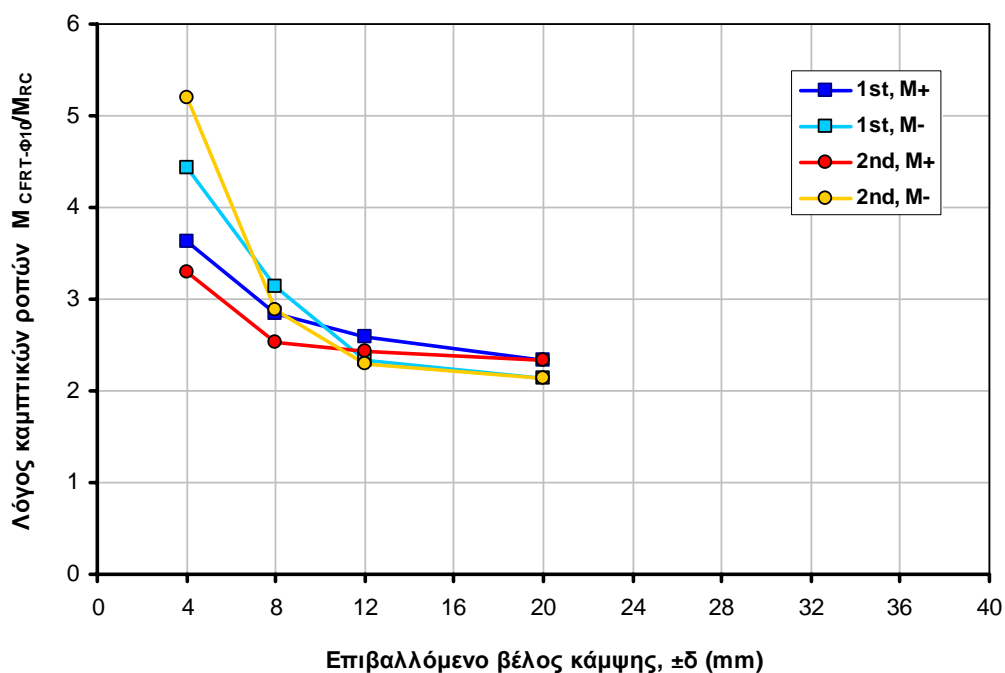
Μετά τη διαρροή ($\delta=\pm 8$ mm) και για επιβαλλόμενη παραμόρφωση $\delta=\pm 12$ mm, η πτώση της καμπτικής απόκρισης στις δοκούς CFRT_{T131} είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη των δοκών CFRT_{Φ10}, της τάξεως του 28% έναντι 5% των CFRT_{Φ10}. Η πτώση αυτή είναι συνεχώς μεγαλύτερη έναντι εκείνης των CFRT_{Φ10}, φτάνοντας τελικά στα επίπεδα των συμβατικών δοκών για επίπεδα παραμορφώσεων $\delta=\pm 30$ mm και άνω.



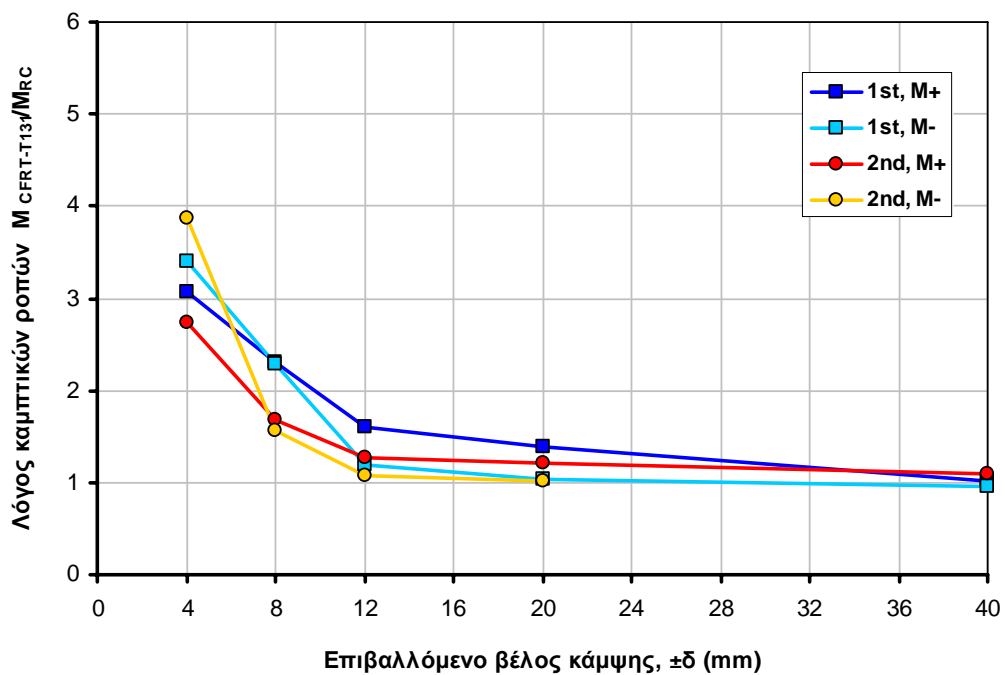
Σχήμα 7.8 – Λόγος ροπής κάμψης M_{CFRT}/M_{RC} των δοκών CFRT προς την αντίστοιχη των RC.



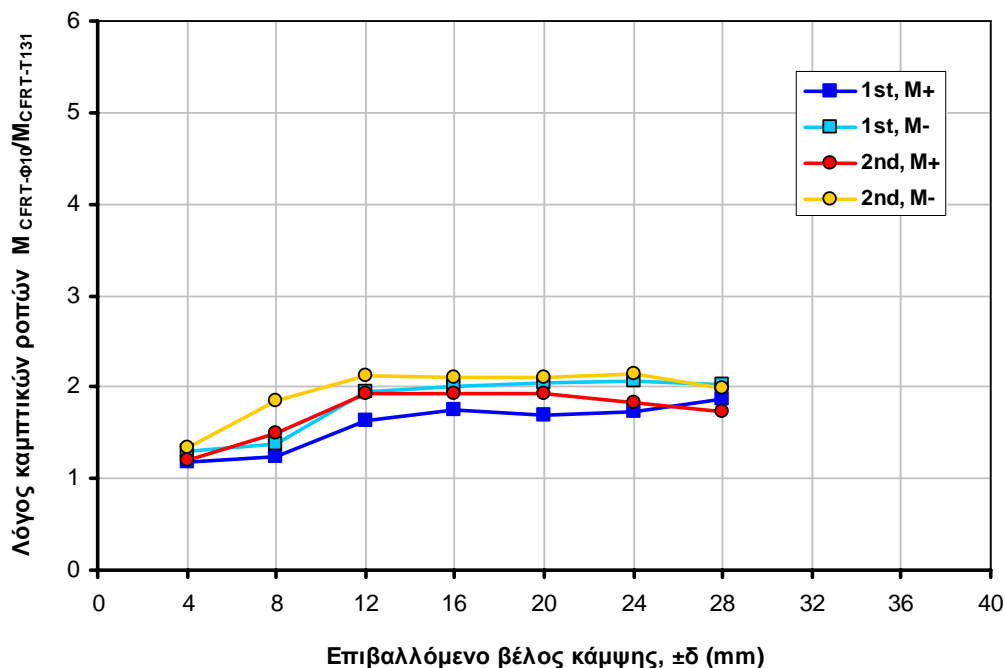
Σχήμα 7.9 – Λόγος ροπής κάμψης $M_{CFRT-Φ10}/M_{CFRT-T131}$ των δοκών $CFRT_{Φ10}$ προς την αντίστοιχη των $CFRT_{T131}$.



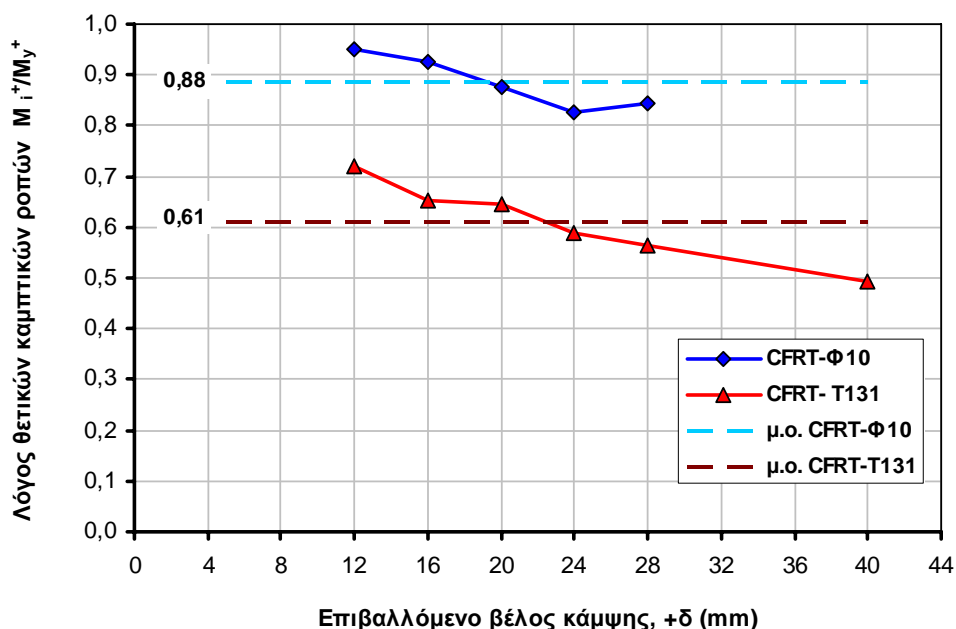
Σχήμα 7.10 – Λόγος ροπών κάμψης-βέλους κάμψης των δοκών $CFRT_{\phi 10}$ προς την αντίστοιχη των RC.



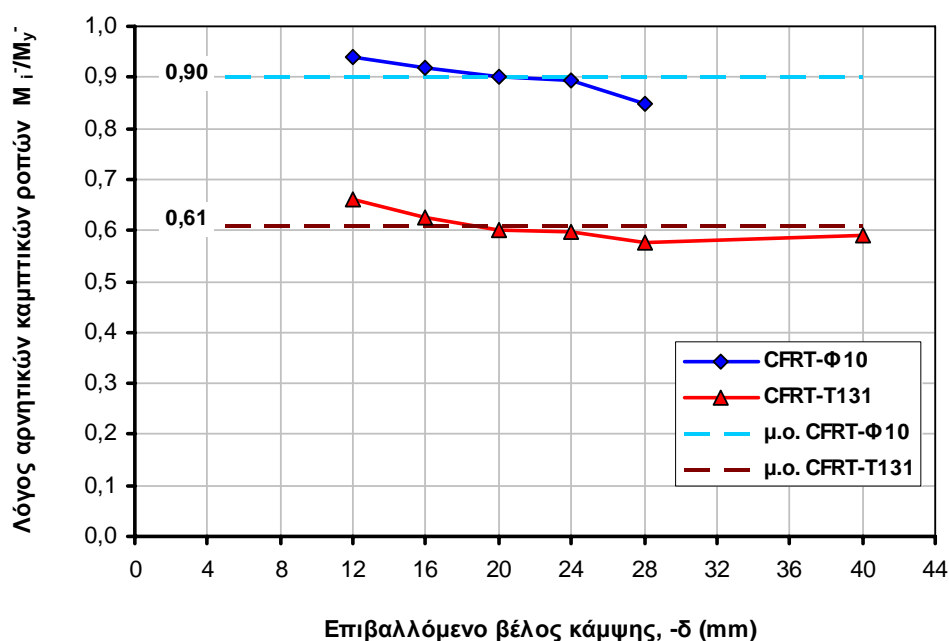
Σχήμα 7.11 – Λόγος ροπών κάμψης-βέλους κάμψης των δοκών $CFRT_{T131}$ προς την αντίστοιχη των RC.



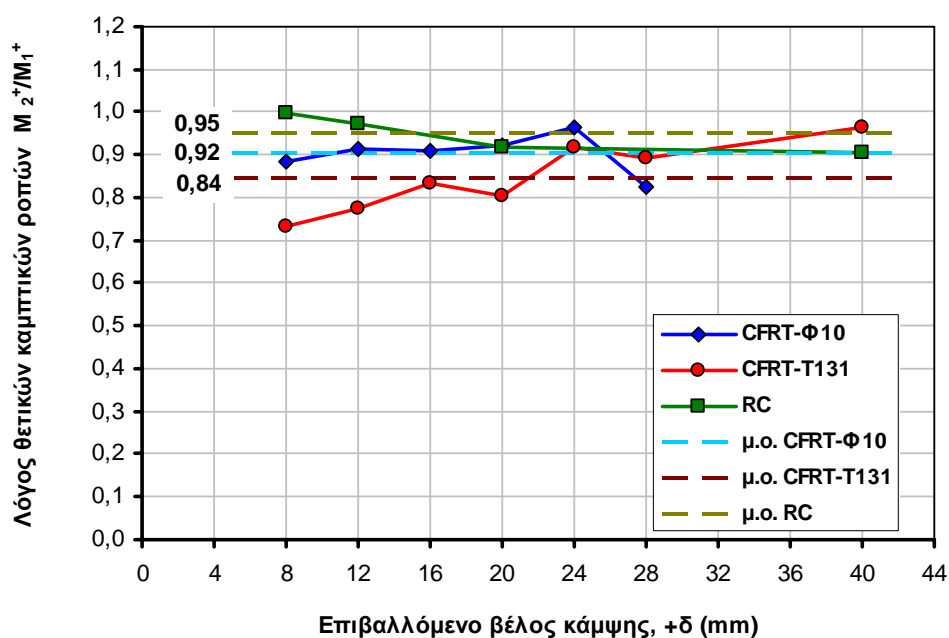
Σχήμα 7.12 – Λόγος ροπών κάμψης-βέλους κάμψης των δοκών $CFRT_{\Phi 10}$ προς την αντίστοιχη των $CFRT_{T131}$.



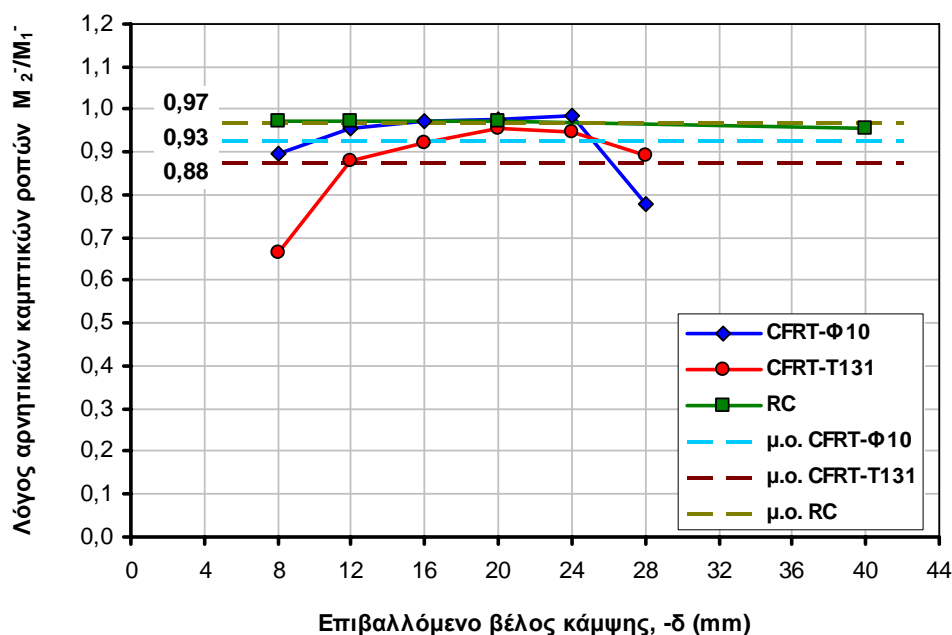
Σχήμα 7.13 – Λόγος θετικών ροπών κάμψης $1^{ου}$ κύκλου προς την αντίστοιχη της αρχικής διαρροής ($\delta=+8$ mm) των δοκών $CFRT$.



Σχήμα 7.14 – Λόγος αρνητικών ροπών κάμψης 1^{ου} κύκλου προς την αντίστοιχη της αρχικής διαρροής (δ=-8 mm) των δοκών CFRT.



Σχήμα 7.15 – Λόγος θετικών ροπών κάμψης του 2^{ου} κύκλου προς τον αντίστοιχο 1^ο για κάθε επιβαλλόμενη παραμόρφωση των δοκών CFRT και RC.



Σχήμα 7.16 – Λόγος αρνητικών ροπών κάμψης του 2^{ου} κύκλου προς τον αντίστοιχο 1^ο για κάθε επιβαλλόμενη παραμόρφωση των δοκών CFRT και RC.

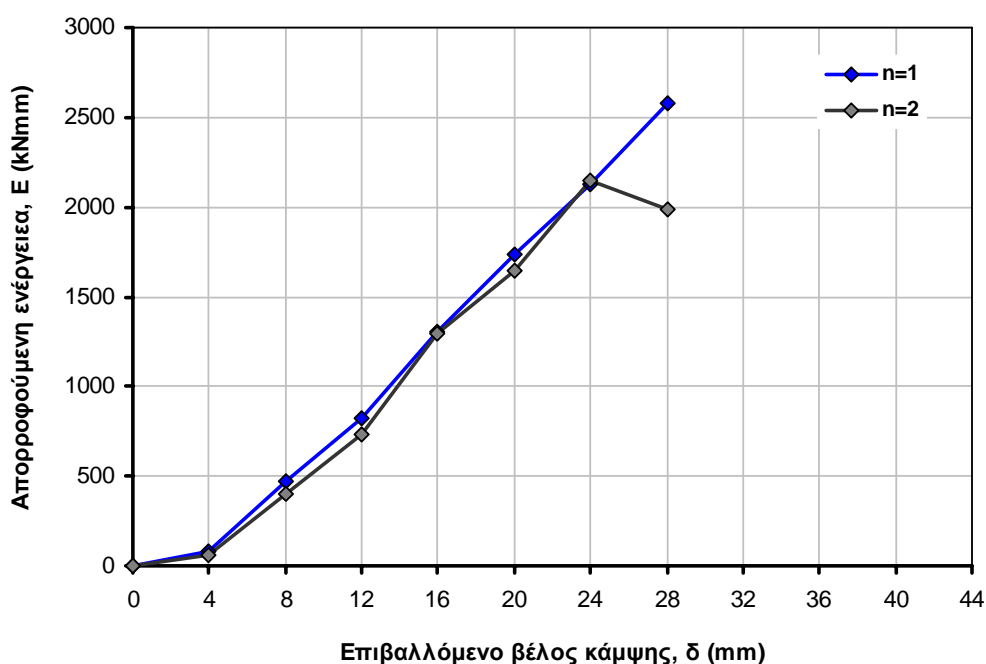
Τα διαγράμματα απορρόφησης ενέργειας-βέλους κάμψης και για τους δύο κύκλους φόρτισης ($n=1,2$) της κάθε ομάδας δοκών παρουσιάζονται στα Σχ. 7.17, 7.18 και 7.19, αντίστοιχα. Η απορρόφηση ενέργειας στις ενισχυμένες δοκούς CFRT₄₀₁₀ σε σύγκριση με τις αρχικές δοκούς RC ήταν κατά μέσο όρο 3,5 φορές περισσότερη (Σχ. 7.21). Ειδικότερα, η απόσβεση ενέργειας για τις CFRT₄₀₁₀ ήταν μεγαλύτερη κατά 3,6 φορές για τον 1^ο κύκλο και 3,5 φορές για τον 2^ο κύκλο της κάθε επιβαλλόμενης μετατόπισης (Σχ. 7.21). Αντίστοιχα, οι ενισχυμένες δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν σε σύγκριση με τις αρχικές δοκούς RC κατά μέσο όρο 2,3 φορές περισσότερη απορρόφηση ενέργειας για τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης ως και $\delta=\pm 12$ mm και 1,1 φορές για τιμές του $\delta>\pm 12$ mm (Σχ. 7.22). Στις CFRT_{T131} δοκούς, για παραμορφώσεις $\delta>\pm 12$ mm η διαφορά στην ικανότητα απόσβεσης ενέργειας σε σχέση με τις RC δοκούς μειώνεται σημαντικά φτάνοντας τελικά σε παρόμοια επίπεδα για παραμορφώσεις $\delta>\pm 30$ mm. Οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ σε σύγκριση με τις CFRT_{T131} επέδειξαν ικανότητα απορρόφησης ενέργειας 2 φορές περισσότερη κατά μέσο όρο (Σχ. 7.23). Ειδικότερα, για τις CFRT₄₀₁₀ η απορρόφηση ήταν 1,9 φορές μεγαλύτερη για τον 1^ο κύκλο και 2,1 φορές για τον 2^ο κύκλο της κάθε επιβαλλόμενης μετατόπισης (Σχ. 7.23).

Για σχετικά υψηλές τιμές $\delta=\pm 24$ mm του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης, που αντιστοιχεί στο τριπλάσιο της παραμόρφωσης που συμβαίνει η αρχική διαρροή των δοκών ($\delta=\pm 8$ mm), οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν αύξηση της απόκρισης της απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με την αντίστοιχη για $\delta=\pm 8$ mm (E_{24}/E_8) μεταξύ των θετικών ροπών των 1^{ου} κύκλων

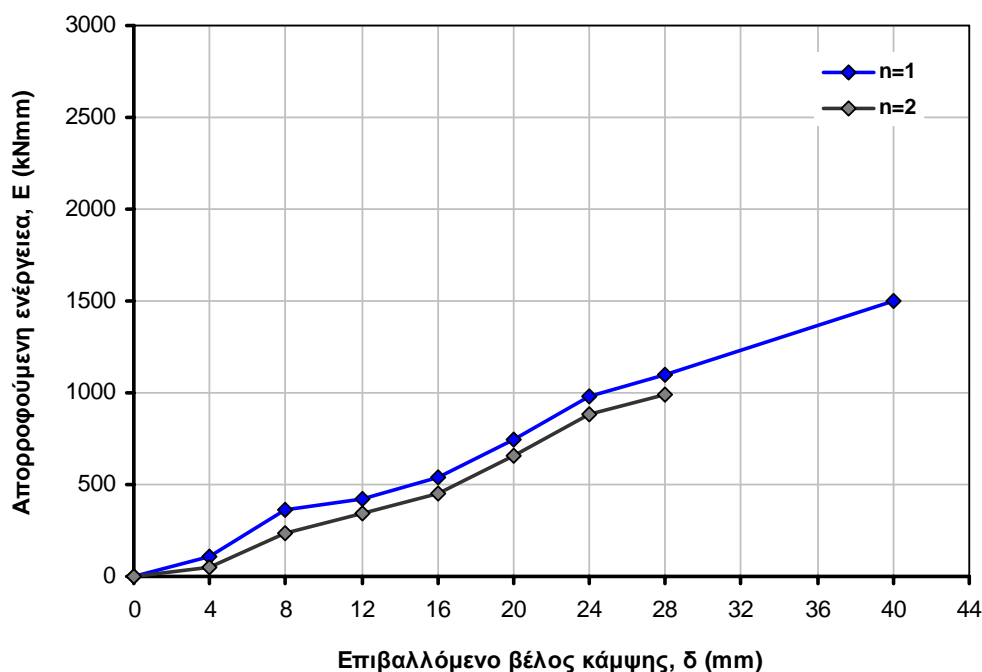
κατά 4,3 φορές και αύξηση της απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών των 1^{ωv} κύκλων κατά 3,7. Οι αντίστοιχες τιμές για τις δοκούς CFRT_{T131} είναι 2,7 και 2,5.

Γενικότερα, οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας μεταξύ των 1^{ωv} κύκλων της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αμέσως προηγούμενης κατά 1,4 φορές κατά μέσο όρο (Σχ. 7.24, 7.25), είτε πρόκειται για θετικές είτε για αρνητικές ροπές. Η πτώση στην απορρόφηση ενέργειας μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ήταν 15% κατά μέσο όρο (Σχ. 7.26 και 7.27).

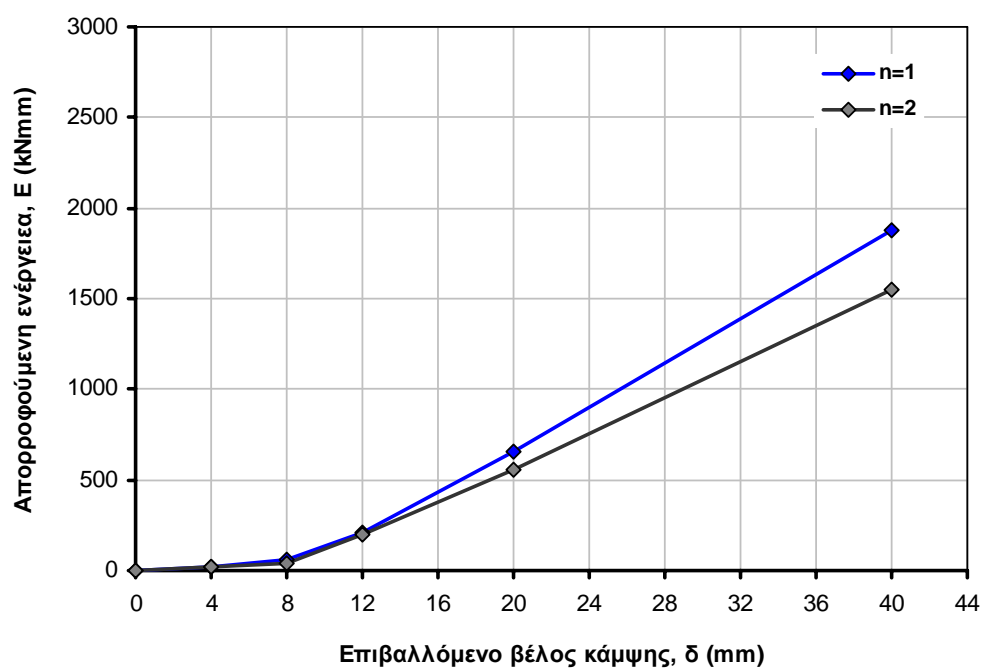
Οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας μεταξύ των 1^{ωv} κύκλων της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αμέσως προηγούμενης κατά 1,3 φορές κατά μέσο όρο (Σχ. 7.24, 7.25), είτε πρόκειται για θετικές είτε για αρνητικές ροπές. Η πτώση απόκρισης μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ήταν 21% κατά μέσο όρο (Σχ. 7.26 και 7.27).



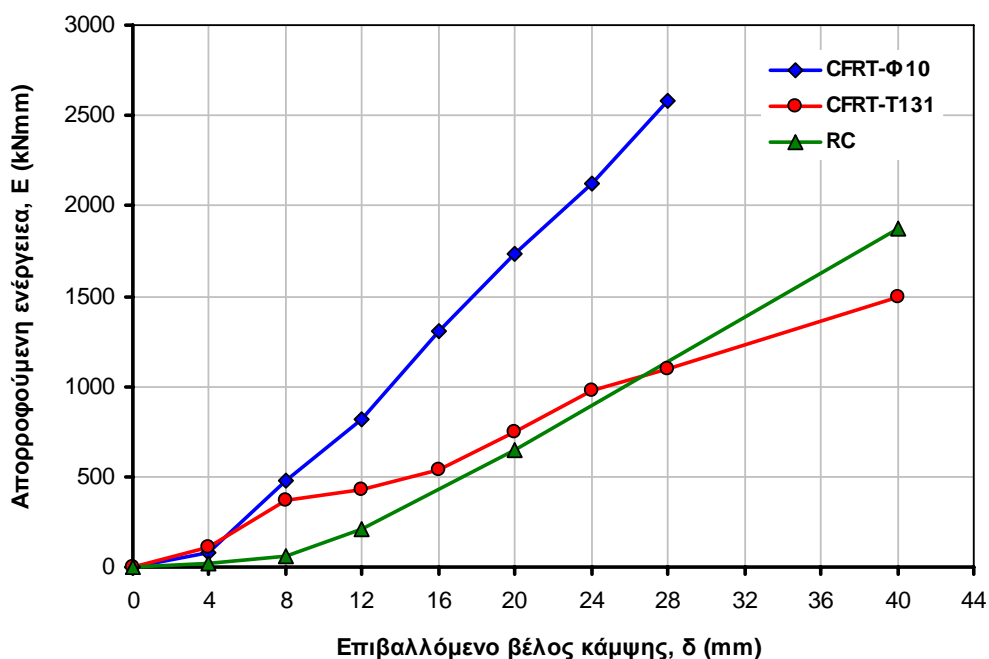
Σχήμα 7.17 – Απορρόφηση ενέργειας συναρτήσει του βέλους κάμψης των δοκιμών CFRT_{φ10}.



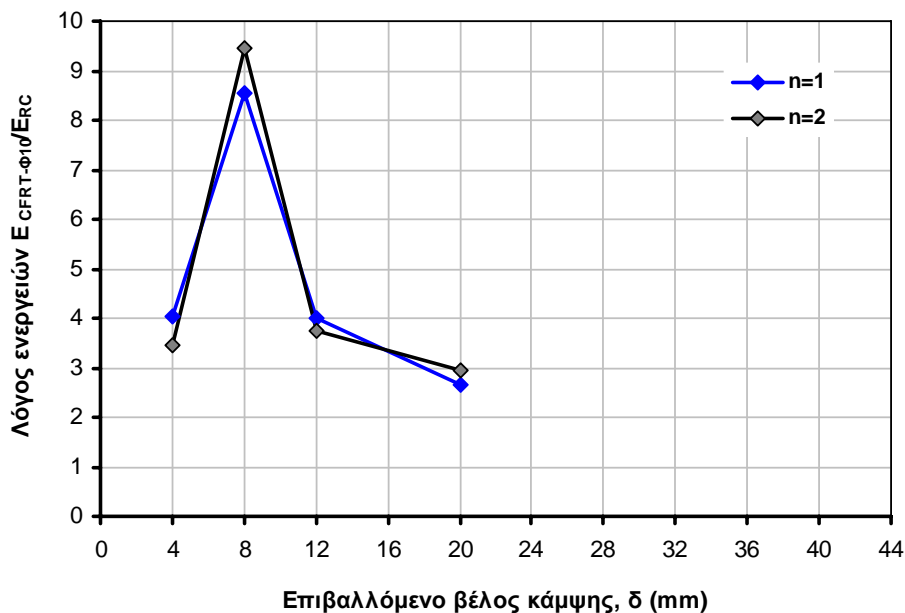
Σχήμα 7.18 – Απορρόφηση ενέργειας συναρτήσει του βέλους κάμψης των δοκιμών CFRT_{T131}.



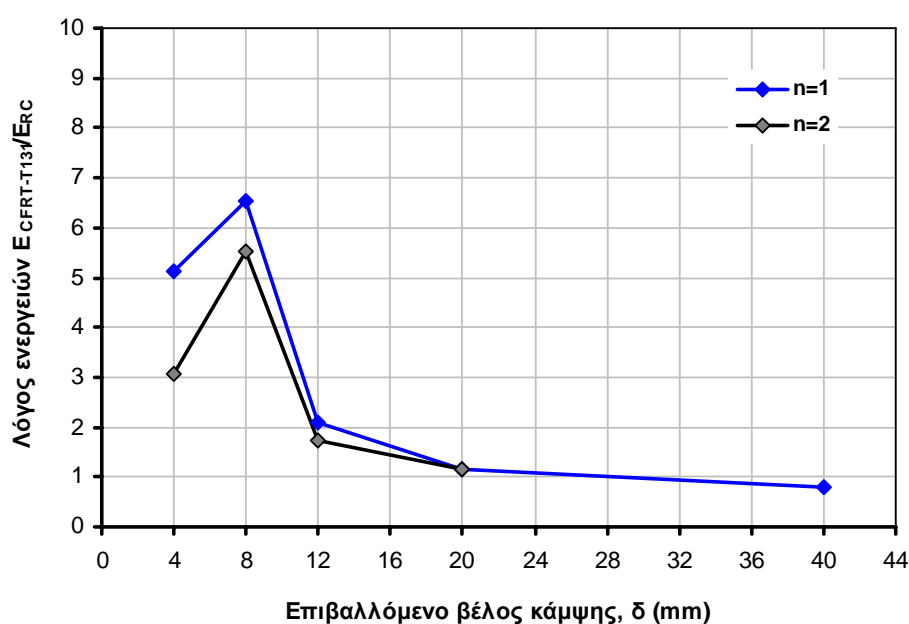
Σχήμα 7.19 – Απορρόφηση ενέργειας συναρτήσει του βέλους κάμψης των δοκιμών RC.



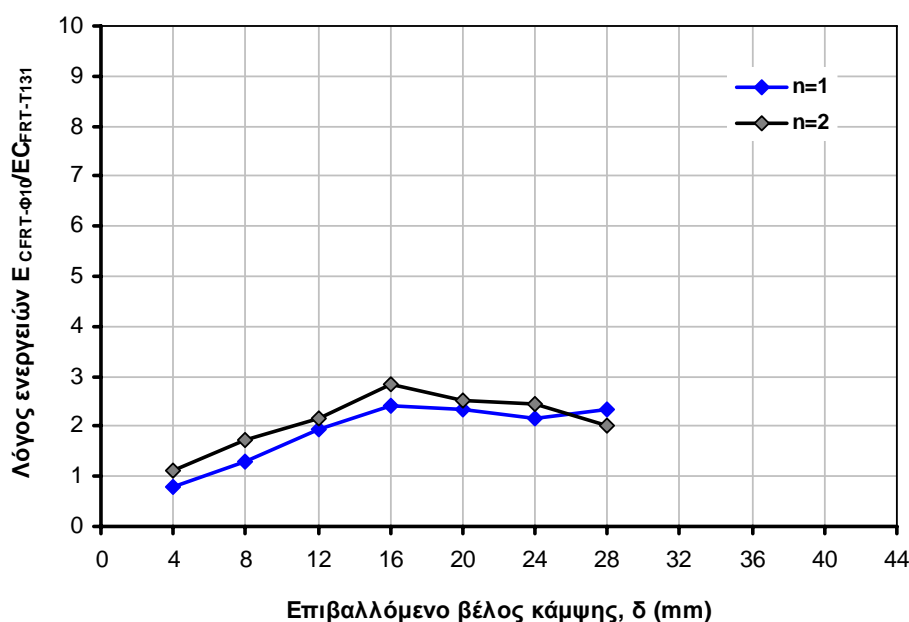
Σχήμα 7.20 – Απορρόφηση ενέργειας 1^{ου} κύκλου συναρτήσει του βέλους κάμψης των δοκιμών CFRT _{Φ 10}, CFRT_{T131} και RC.



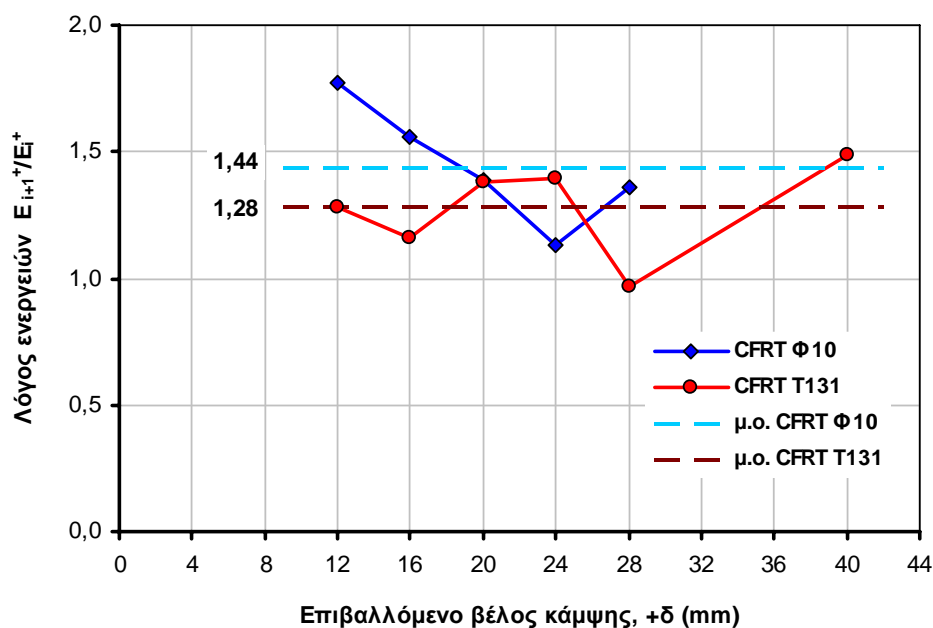
Σχήμα 7.21 – Λόγος απορροφούμενης ενέργειας-βέλους κάμψης των δοκιμών CFRT _{Φ 10} προς την αντίστοιχη των RC.



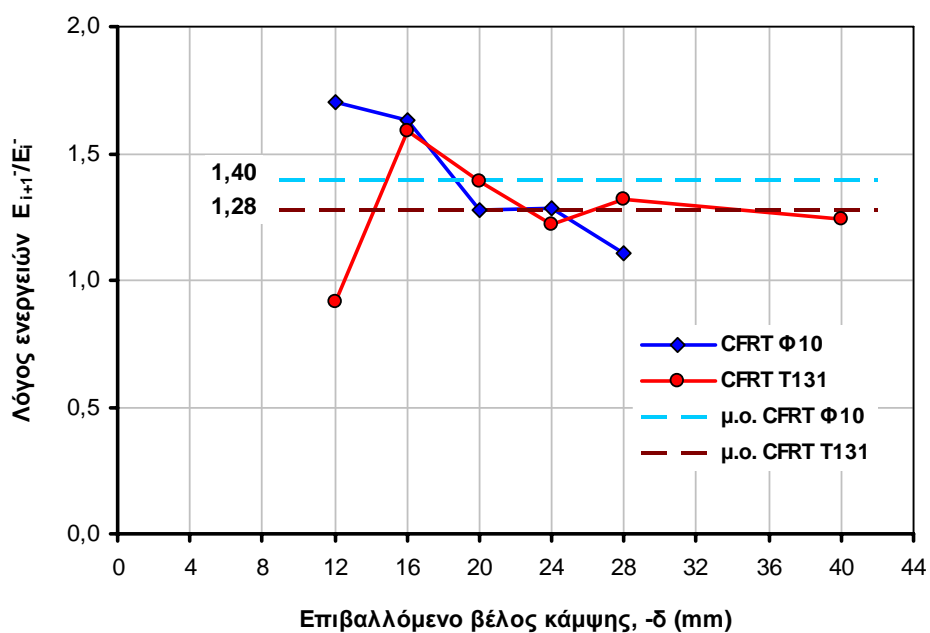
Σχήμα 7.22 – Λόγος απορροφούμενης ενέργειας-βέλους κάμψης των δοκιμών $CFRT_{T131}$ προς την αντίστοιχη των RC.



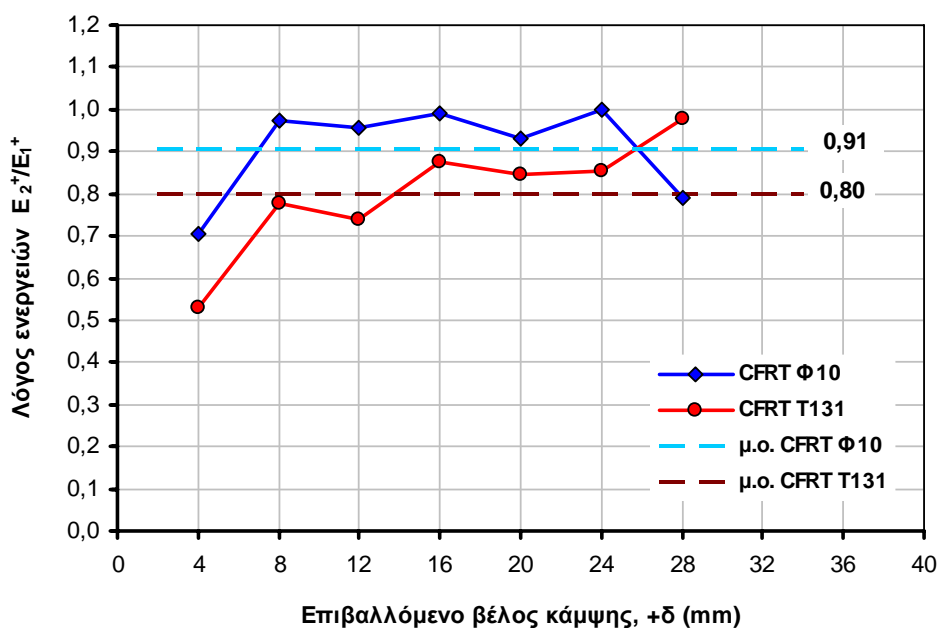
Σχήμα 7.23 – Λόγος απορροφούμενης ενέργειας-βέλους κάμψης των δοκιμών $CFRT_{\phi10}$ προς την αντίστοιχη των $CFRT_{T131}$.



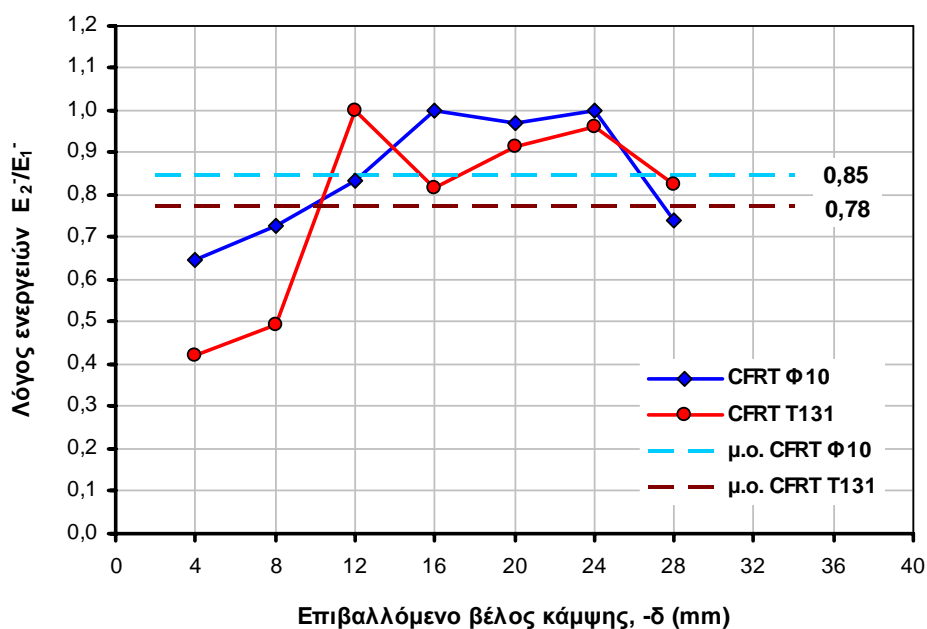
Σχήμα 7.24 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας θετικών ροπών 1^{ou} κύκλου κάθε παραμόρφωσης προς την αντίστοιχη της αμέσως προηγούμενης παραμόρφωσης των δοκιμίων CFRT.



Σχήμα 7.25 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας αρνητικών ροπών 1^{ou} κύκλου κάθε παραμόρφωσης προς την αντίστοιχη της αμέσως προηγούμενης παραμόρφωσης των δοκιμίων CFRT.



Σχήμα 7.26 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας θετικών ροπών του 2^{ου} κύκλου προς την αντίστοιχη του 1^{ου} σε κάθε παραμόρφωση των δοκιμίων CFRT.



Σχήμα 7.27 – Λόγος απορρόφησης ενέργειας αρνητικών ροπών του 2^{ου} κύκλου προς την αντίστοιχη του 1^{ου} σε κάθε παραμόρφωση των δοκιμίων CFRT.

Η πτώση της δυσκαμψίας των δοκών για σχετικά υψηλές τιμές $\delta=\pm 20$ mm του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης προς το αντίστοιχο της διαρροής $\delta=\pm 8$ mm (EI_{20}/EI_8), ήταν της τάξεως του 49% στις ενισχυμένες δοκούς με διαμήκειες ράβδους CFRT₄₀₁₀, του 66% στις ενισχυμένες δοκούς με το πλέγμα CFRT_{T131} και του 31% στις συμβατικές δοκούς RC.

Η εικόνα της ρηγμάτωσης των δοκών στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση ήταν παρόμοια με εκείνη της μονοτονικής φόρτισης, με τη διαφορά της εμφάνισης ρωγμών και στην άνω ίνα των δοκιμίων λόγω της ανακύκλισης. Στις ενισχυμένες δοκούς ο αριθμός των τριχοειδών ρωγμών ήταν αρκετά μεγαλύτερος (Σχ. 7.28) συγκριτικά με τις συμβατικά οπλισμένες δοκούς (Σχ. 7.29), ενώ με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου και την αύξηση της καταπόνησης των δοκών με μανδύα υπήρξε συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε μια περιοχή, με έντονη αύξηση του ανοίγματος ουσιαστικά μίας ή δύο ρωγμών (Σχ. 7.30, 7.31, 7.32) και ταυτόχρονη απομείωση της αντοχής τους.



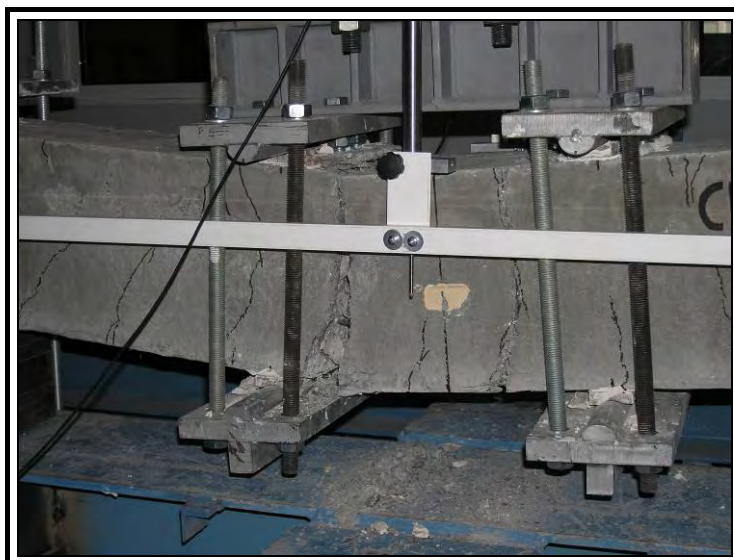
Σχήμα 7.28 - Ρηγμάτωση ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



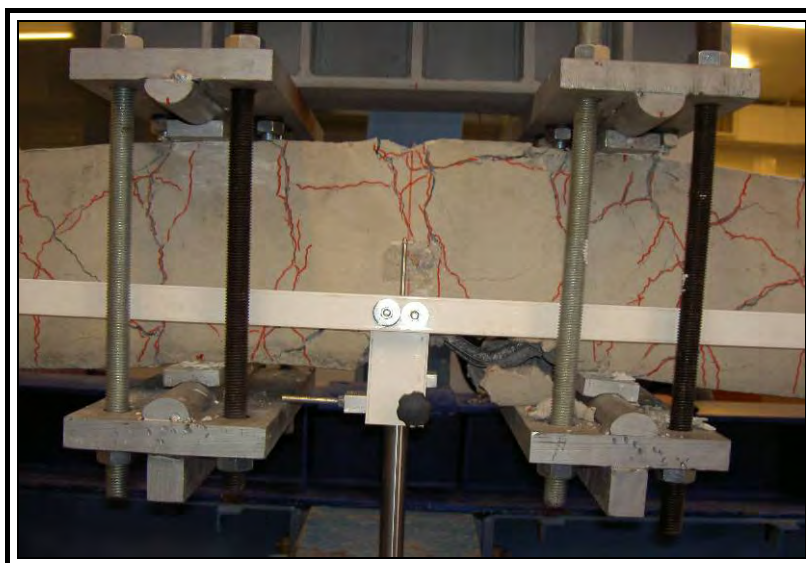
Σχήμα 7.29 - Ρηγμάτωση συμβατικά οπλισμένης δοκού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 7.30 - Αστοχία ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 7.31 - Η περιοχή αστοχίας ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.



Σχήμα 7.32 - Περιοχή αστοχίας συμβατικά οπλισμένης δοκού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης 4-σημείων.

7.2 - Συμπεράσματα

Συνολικά εξετάστηκαν εννέα (9) συμβατικά οπλισμένες (RC) και ενισχυμένες με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (CFRT) δοκοί σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων.

Από τις παραπάνω πειραματικές δοκιμές προέκυψαν:

1. Οι CFRT_{4Ø10} δοκοί ($\delta \geq \pm 8\text{mm}$) παρουσίασαν μέση καμπτική αντοχή μεγαλύτερη κατά 2,5 φορές έναντι αυτής των συμβατικών δοκών και οι CFRT_{T131} δοκοί κατά 1,4 φορές αντίστοιχα. Ειδικότερα, η αντοχή σε ρηγμάτωση, διαρροή και μέγιστη καμπτική αντοχή των ενισχυμένων δοκών ήταν μεγαλύτερη από 2,2 έως και 2,8 φορές περίπου κατά μέσο όρο έναντι αυτής των συμβατικών δοκών στην περίπτωση που οι ενισχυμένες δοκοί ήταν οπλισμένες αντίστοιχα με μεταλλικό πλέγμα ή διαμήκη/εγκάρσιο οπλισμό.
2. Οι CFRT_{4Ø10} δοκοί ($\delta \geq \pm 8\text{mm}$) παρουσίασαν μέση καμπτική αντοχή μεγαλύτερη κατά 1,8 φορές περίπου έναντι αυτής των CFRT_{T131} και ειδικότερα σε ρηγμάτωση, διαρροή και μέγιστη καμπτική αντοχή μεγαλύτερη από 1,2 έως 1,3 φορές περίπου έναντι αυτής των ενισχυμένων δοκών με μεταλλικό πλέγμα.
3. Η πτώση της καμπτικής απόκρισης μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου (και για θετικές και για αρνητικές ροπές) ήταν σχεδόν διπλάσια για τις CFRT_{T131} σε σχέση με των CFRT_{4Ø10} δοκών. Η πτώση της καμπτικής απόκρισης μεταξύ του 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (και για θετικές και για αρνητικές ροπές) και της αρχικής διαρροής ήταν 3 έως 4 φορές μεγαλύτερη στις CFRT_{T131} σε σχέση με των CFRT_{4Ø10} δοκών.
4. Οι CFRT_{4Ø10} δοκοί (για $\delta \geq \pm 8\text{mm}$) παρουσίασαν ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μεγαλύτερη κατά 3,6 φορές περίπου κατά μέσο όρο έναντι αυτής των συμβατικών δοκών RC και οι δοκοί CFRT_{T131} μεγαλύτερη κατά 2,3 φορές περίπου κατά μέσο όρο για $\delta \leq \pm 12\text{mm}$ και 1,1 φορές περίπου για $\delta > \pm 12\text{mm}$.
5. Οι CFRT_{4Ø10} δοκοί (για $\delta \geq \pm 8\text{mm}$) παρουσίασαν ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μεγαλύτερη κατά 2 φορές περίπου κατά μέσο όρο έναντι αυτής των δοκών CFRT_{T131}.
6. Η αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας μεταξύ του 1^{ου} κύκλου (και για θετικές και για αρνητικές ροπές) κάθε παραμόρφωσης και της αμέσως προηγούμενης παραμόρφωσης ήταν παρόμοια για τις CFRT_{T131} και CFRT_{4Ø10} δοκούς, της τάξεως του 30 έως 40% περίπου. Η πτώση της απορροφούμενης ενέργειας μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου (και για θετικές και για αρνητικές ροπές) ήταν μικρότερη στις CFRT_{4Ø10} δοκούς κατά 40% περίπου έναντι των CFRT_{T131}.

7. Για παραμορφώσεις $\delta=\pm 20\text{mm}$ η πτώση της δυσκαμψίας των $\text{CFRT}_{4\emptyset 10}$ σε σχέση με την αντίστοιχη για $\delta=\pm 8\text{mm}$ είναι κατά 18% περίπου μεγαλύτερη έναντι των συμβατικά οπλισμένων και κατά 18% περίπου μικρότερη έναντι των $\text{CFRT}_{\text{T}131}$. Αντίστοιχα η πτώση των $\text{CFRT}_{\text{T}131}$ είναι περίπου κατά 36% αυξημένη έναντι των συμβατικά οπλισμένων. Γενικά, η εικόνα της ρηγμάτωσης μέχρι και την αστοχία ήταν παρόμοια με εκείνη της μονοτονικής φόρτισης.

Βιβλιογραφία

1. Τριανταφύλλου Χ. Αθ. (2005), *Δομικά Υλικά*, Βιβλιοπ. Παπασωτηρίου
2. Casanova P., Rossi P., Schaller I., Can Steel Fibers Replace Transverse Reinforcement in Reinforced Concrete Beams?, *ACI Materials Journal*, September-October, 1997, p.p. 341-354
3. J.J. Beaudoin, CBD-223. Fibre-Reinforced Concrete, πηγή Διαδίκτυο1982
4. Τριανταφύλλου Χ. Αθ. (2003), *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά*, Βιβλιοπ. Παπασωτηρίου
5. Ashour A. Samir, Wafa F. Faisal, Flexural Behavior of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, May-June, 1993, p.p. 279-287
6. Balaguru P., Narahari R., Mahedra P., Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, November-December, 1992, p.p. 541-546
7. SP-81, Fiber Reinforced Concrete, ACI 1984
8. Jindal L. R., Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, SP-81-1, ACI 1984
9. Τάσιος Π. Θ., Μαθήματα ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΜΠ, 1979
10. Πενέλης Γ., Στυλιανίδης Κ., Κάππος Α., Ιγνατάκης Χ., Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, ΑΠΘ, 1995
11. Padmarajaiah K. S., Ramaswamy A., Comparative Study on Flexural Response of Full and Partial Depth Fiber Reinforced High Strength Concrete, *Journals of Materials in Civil Engineering*, March-April, 2002, p.p.130-136
12. ΕΚΩΣ 2000
13. Leung K. Y. C., Design Criteria for Pseudoductile Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, January, 1996, p.p.10-18
14. Taerwe L., Van Gysel A., Influence of Steel Fibers on Design Stress- Strain Curve for High Strength Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, August, 1996, p.p.695-704
15. Banthia N., Trottier J. F., Concrete Reinforced with deformed Steel Fibers. Part II: Toughness Characterization, *ACI Materials Journal*, March-April, 1995, p.p. 146-154
16. Στυλιανίδης Κ., Παπανικολάου Β. Κ., Σαλονικιός Θ., Αξιολόγηση Δεικτών Μηχανικών Χαρακτηριστικών Δοκιμών Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, *Τεχν. Χρο. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ*, I, τευχ. 2, 1998
17. Maalej M., Li C. V., Hashida T., Effect of Fiber Rupture on Tensile Properties of Short Fiber Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, August, 1995, p.p.903-912
18. Abdel-Azim M. S., Durability of Palm-tree-Frond Fiber Reinforcement, *Concrete International*, June, 1995, p.p. 27-31

19. Xi Y., Representative Volumes of Composite Materials, Journal of Engineering Mechanics, December, 1996, p.p.1159-1167
20. SP-155, Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI, 1995
21. Πενέλης Γ. Γ., Κάππος Ι. Α., Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα, Ζήτη, 1999
22. Μωρέττη Μ. Λ., Ειδικά Κεφάλαια Οπλισμένου Σκυροδέματος, Σημειώσεις για το Μάθημα
23. Visalvanich K., Naaman E. A., Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete, ACI Journal, March-April, 1983, p.p. 128-138
24. Trottier J. F., Mahoney M., Innovative Synthetic Fibers, Concrete International, June, 2001, p.p. 23-27
25. Alaaee F. J., Karihaloo B. L., Fracture Model for Flexural Failure of Beams Retrofitted with CARDIFRC, Journal of Engineering Mechanics, September 2003, p.p.1028-1038