



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΛΑΒΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ»**

ΜΠΟΥΡΤΟΥΒΑΛΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΕΡΔΙΚΑΡΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12544/1
Ημερ. Εισ.: 07-05-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ- ΠΜ
2014
ΜΠΟ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 : Ινοπλισμένο σκυρόδεμα	3
2.1. Ιστορική εξέλιξη της χρήσης ινών ως ενίσχυση	3
2.2. Ορισμός - Σύνθεση	4
2.3. Μηχανική συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος	5
2.4. Ιδιότητες ινών	10
2.4.1. Ίνες χάλυβα	11
2.4.2. Στρεβλωμένες ίνες χάλυβα	12
Κεφάλαιο 3 : Επισκευές – Ενισχύσεις	19
3.1. Γενικά	19
3.1.1. Διαδικασία ανασχεδιασμού	19
3.1.2. Σημασία των επεμβάσεων σε δοκούς	20
3.2. Τεχνικές επισκευής δοκών	20
3.2.1. Επισκευή δοκών με χαμηλό βαθμό βλάβης	21
3.2.2. Επισκευή δοκών με υψηλό βαθμό βλάβης	21
3.3. Μέθοδοι καμπτικής ενίσχυσης δοκών	22
3.3.1. Ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers – FRP)	22
3.3.1.1. Περιγραφή της μεθόδου	22
3.3.1.2. Ενίσχυση με επικόλληση φύλλων από ίνες άνθρακα CFRP (O. Benjeddou, 2005)	24
3.3.2. Επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων στο σκυρόδεμα	33
3.3.3. Κατασκευή μανδύα	33
3.3.3.1. Περιγραφή της μεθόδου	33
3.3.3.2. Ενίσχυση με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος (F. Altun, 2004)	35
3.3.3.3. Ενίσχυση με μανδύα ινοπλισμένου κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής (G. Martinola et al., 2010)	40

3.3.3.4. Ενίσχυση με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)	50
Κεφάλαιο 4 : Λεπτομέρειες δοκιμών και πειραματική διάταξη	70
4.1. Κατασκευή δοκιμών	70
4.1.1. Δοκίμια σκυροδέματος αρχικών δοκών	71
4.1.2. Δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μανδυνών.....	73
4.1.3. Δοκίμια σκυροδέματος μανδυνών κανονικής και υψηλής αντοχής	80
4.2. Πειραματική διάταξη.....	85
Κεφάλαιο 5 : Θεωρητική ανάλυση δοκών	91
5.1. Ανάλυση αρχικών δοκών Ο/Σ (RC).....	91
5.1.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού	92
5.1.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος.....	94
5.1.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα	95
5.1.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας	96
5.2. Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος κανονικής αντοχής (CRLT).....	98
5.2.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού	98
5.2.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος.....	100
5.2.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα	101
5.2.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας	103
5.3. Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (CRHT)	104
5.3.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού	104
5.3.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος.....	106
5.3.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα	107
5.3.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας	108
5.4. Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής (CFRT).....	110
5.4.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού	110

5.4.2.	Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος.....	112
5.4.3.	Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα.....	113
5.4.4.	Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσα.....	115
Κεφάλαιο 6 : Αποτελέσματα πειραμάτων		115
6.1.	Αρχικές δοκοί Ο/Σ συμβατικά οπλισμένες	115
6.1.1.	Δοκός RC-7C.....	115
6.1.2.	Δοκός RC-8C.....	119
6.2.	Δοκοί Ο/Σ με βλάβη ενισχυμένες με μανδύα από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής	124
6.2.1.	Δοκός CFRT-11C (Ενίσχυση της RC-8C).....	124
6.2.2.	Δοκός CFRT-12C (Ενίσχυση της RC-7C).....	130
6.3.	Δοκοί Ο/Σ ενισχυμένες με μανδύα από συμβατικό σκυρόδεμα.....	135
6.3.1.	Δοκός CRLT-13C (Μανδύας κανονικής θλιπτικής αντοχής).....	135
6.3.2.	Δοκός CRHT-14C (Μανδύας υψηλής θλιπτικής αντοχής).....	140
Κεφάλαιο 7 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων.....		145
7.1.	Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με τις δοκούς Ο/Σ	145
7.1.1.	Δοκός CFRT-11C	145
7.1.2.	Δοκός CFRT-12C	148
7.1.3.	Σύγκριση CRLT-13C με RC-8C.....	151
7.1.4.	Σύγκριση CRHT-14C με RC-8C.....	154
7.2.	Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με αρχική βλάβη και χωρίς	157
7.3.	Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς αρχική βλάβη με τις ενισχυμένες δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος	161
7.4.	Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με αρχική βλάβη με τις ενισχυμένες δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος	165
7.5.	Συμπεράσματα	173
Βιβλιογραφία.....		175
Παράρτημα: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....		177

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

Η αντισεισμική θωράκιση των κτιρίων αποτελεί επιτακτική ανάγκη ειδικά σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, η οποία κατέχει την πρώτη θέση στην Ευρώπη από άποψη σεισμικότητας και την έκτη παγκοσμίως. Επομένως, αποκτά μεγάλη σημασία η προσπάθεια για μείωση των συνεπειών των σεισμών πρωτίστως σε επίπεδο ανθρώπινων θυμάτων αλλά και σε οικονομικό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων κατασκευών αλλά και των επεμβάσεων σε υφιστάμενες, στα οποία επιδιώκεται βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς έναντι μελλοντικών σεισμών, είτε έχουν υποστεί βλάβες είτε όχι. Προς την κατεύθυνση αυτή, στις αρχές του 2012 τέθηκε σε ισχύ ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), ο οποίος έχει εναρμονιστεί στα πλαίσια των Ευρωκωδίκων και η εφαρμογή του είναι πλέον υποχρεωτική.

Τα τελευταία χρόνια, αναζητούνται νέες μέθοδοι ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών που έχουν ως σκοπό, όχι μόνο την καλύτερη απόδοση και την ευκολότερη εφαρμογή, αλλά και τη μείωση του κόστους των επεμβάσεων. Μία νέα υποσχόμενη μέθοδος ενίσχυσης αφορά στην κατασκευή μανδύα μικρού πάχους από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς συμβατικά οπλισμένων δοκών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, οι οποίες υπέστησαν βλάβη υπό καμπτική καταπόνηση και στη συνέχεια ενισχύθηκαν με μανδύα πάχους 3,5cm από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής.

Εξετάστηκαν συνολικά 6 δοκοί: 2 δοκοί Οπλισμένου Σκυροδέματος συμβατικά οπλισμένες, οι οποίες υποβλήθηκαν σε φόρτιση βλάβης (**RC-7C, RC-8C**), ενώ στη συνέχεια ενισχύθηκαν με μανδύα από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής (**CFRT-12C, CFRT-11C αντίστοιχα**). Άλλες 2 δοκοί Οπλισμένου Σκυροδέματος ίδιες με τις προηγούμενες ενισχύθηκαν απευθείας (χωρίς δημιουργία βλάβης) με μανδύα από συμβατικό σκυρόδεμα, κανονικής (**CRLT-13C**) και υψηλής αντοχής (**CRHT-14C**). Επίσης, εξετάστηκαν και 2 δοκίμια που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των σκυροδετήσεων. Πιο συγκεκριμένα, σε φόρτιση μονο-αξονικής θλίψης εξετάστηκαν: 2 κυβικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος των αρχικών δοκών (RC), 2 κυβικά δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (CFRT), 5 κυβικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος κανονικής αντοχής (CRLT) και 5 κυβικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (CRHT). Σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (splitting test) εξετάστηκαν 2 κυλινδρικά δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (CFRT), 3 κυλινδρικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος κανονικής αντοχής (CRLT) και 3 κυλινδρικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (CRHT). Όλες οι σκυροδετήσεις και οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 1 είναι εισαγωγικό, ενώ στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις ίνες χάλυβα. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης δοκών και τα σχετικά πειραματικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά η κατασκευή των δοκιμών, τα αποτελέσματα των δοκιμών τους αλλά και η πειραματική διάταξη των δοκών, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση των δοκών. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, ενώ στο Κεφάλαιο 7 γίνεται η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Φίλιππο Περδικάρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω αυτή την εργασία και την καθοδήγηση του από την αρχή έως την ολοκλήρωση της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Θεοχάρη Παπαθεοχάρη για τον πολύτιμο χρόνο του και την αμέριστη συμβολή του τόσο στη διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και στην περάτωση της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Αλέκο Κουτσελίνη για τη βοήθεια του στις σκυροδετήσεις και το στήσιμο της πειραματικής διάταξης.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να σπουδάσω και τη στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια.

Κεφάλαιο 2 : Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

2.1. Ιστορική εξέλιξη της χρήσης ινών ως ενίσχυση

Η έννοια της όπλισης υλικών με ίνες ξεκινά πριν από περίπου 3500 χρόνια στην αρχαία Αίγυπτο, όπου τρίχες αλόγου, άχυρο και άλλες ίνες φυτών χρησιμοποιούνταν ως ενίσχυση σε υλικά με ψαθυρή συμπεριφορά όπως τα τούβλα. Σύμφωνα όμως με ιστορικά στοιχεία, ίνες αμιάντου χρησιμοποιήθηκαν ως οπλισμός δοχείων πηλού περίπου 5000 χρόνια πριν. Επίσης, τα πουλιά *Hornegors* στις νότιες αμερικανικές χώρες έχτιζαν τις φωλιές τους ενισχυμένες με άχυρο στις κορυφές των δέντρων πριν καν την εμφάνιση των ανθρώπων.

Στη σύγχρονη εποχή, στις αρχές του 1900 διαδόθηκε η χρήση ινών αμιάντου κυρίως στην κατασκευή πλακών οροφής και σωλήνων (τεχνολογία Hatschek). Η συνειδητοποίηση της επικινδυνότητας της χρήσης αμιάντου ως προς την υγεία, οδήγησε στη χρήση ινών από διαφορετικά υλικά. Η χρήση ινών γυαλιού ξεκίνησε από τους Σοβιετικούς τη δεκαετία του 1950, προτάθηκαν και αργότερα από τον Biryukovichs (Glass-fibre-reinforced Cement, 1964), όμως οι συνηθισμένες ίνες γυαλιού τύπου E δεν ήταν ανθεκτικές σε υψηλά αλκαλικό περιβάλλον όπως το τσιμέντο Portland. Για το λόγο αυτό, εφευρέθηκαν ίνες γυαλιού ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον (AR – Alkaline Resistant) από τους Majumdar και Ryder (Glass fibre reinforcement of cement products, 1968). Τη δεκαετία του 1960 διαδόθηκε και η χρήση ινών χάλυβα, άνθρακα και συνθετικών ινών.

Όσον αφορά τη διαδικασία εφεύρεσης του σύγχρονου ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος, αυτή ξεκίνησε το 1874, όταν ο A. Bernard στην Καλιφόρνια χρησιμοποίησε ακίδες από χάλυβα ως ενίσχυση του σκυροδέματος. Το 1910 ο Porter ανέφερε την πιθανότητα εφαρμογής χοντρού σύρματος στο σκυρόδεμα, με την υπόθεση ότι θα οδηγούσε σε βελτίωση της ομοιογένειας του σκυροδέματος. Στη Γαλλία το 1918, ο Maidl επιχείρησε την τροποποίηση του σκυροδέματος με την προσθήκη ινών μεγάλου μήκους, για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Την ίδια περίοδο, ο Alfsen αναφέρθηκε για πρώτη φορά στην επιρροή της τραχύτητας της επιφάνειας των ινών στη συνάφεια τους με το κονίαμα, και ήταν ο ίδιος που έδωσε ιδιαίτερη προσοχή στο πρόβλημα της αγκύρωσης των ινών. Μετά από αυτές τις πρώτες δοκιμές ακολούθησαν και άλλες πολλές, αλλά γενικά αφορούσαν διαφορετικά σχήματα ινών και πιθανές εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Σημαντική επιρροή στην ανάπτυξη των ινοπλισμένων κονιαμάτων με ίνες χάλυβα (SFRC – Steel Fiber Reinforced Cements) άσκησαν οι μελέτες του James Romualdi και των συνεργατών του που δημοσιεύθηκαν το 1963 (Mechanics of crack arrest in concrete).

Η πρώτη δομική χρήση ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος ήταν στον αερολιμένα Heathrow του Λονδίνου το 1971, όπου σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα διαμέτρου 0,25 mm και μήκους 25 mm σε περιεκτικότητα 3% χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή αποσυνδέσιμων πάνελ εμβαδού 3250 mm² και πάχους 65 mm, για ένα γκαράζ χώρου στάθμευσης. Μετά από

5 χρόνια χρήσης, οι πλάκες δεν είχαν παρουσιάσει καμία ένδειξη ρηγμάτωσης. Την ίδια περίοδο, ο αμερικανικός στρατός πραγματοποίησε πειράματα κόπωσης σε πλάκες διαδρόμων αεροσκαφών από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα, ενώ ακολούθησαν και άλλες εφαρμογές όπως η επίστρωση ασφαλτοστρωμένης περιοχής με ινοπλισμένο σκυρόδεμα στο χώρο στάθμευσης του αερολιμένα McCarran στη Νεβάδα (1976), η κατασκευή νέου αεροδιαδρόμου στον αερολιμένα Cannon στη Νεβάδα (1980), η σταθεροποίηση βράχων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με ίνες χάλυβα στη Σουηδία και στην Ουάσιγκτον, καθώς και διάφορες επενδύσεις σηράγγων στην Ιαπωνία και στις Ηνωμένες Πολιτείες (P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, Σκυρόδεμα - Μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά).

Από τότε μέχρι σήμερα, η αντίληψη της χρήσης ινών σε διάφορα κονιάματα έχει αναπτυχθεί σημαντικά, καθώς η γνώση γύρω από το αντικείμενο έχει εμπλουτιστεί με πάρα πολλές θεωρητικές διερευνήσεις και πειραματικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, η πρακτική εφαρμογή τους δεν έχει διαδοθεί αρκετά όπως αναμενόταν αρχικά. Τα τελευταία χρόνια, η προσθήκη ινών χάλυβα ως ενίσχυση εφαρμόζεται κυρίως στην κατασκευή δαπέδων, πολυώροφων κτιρίων και στην κατασκευή προεντεταμένων δοκών γεφυρών όπου αντικαθιστούν τον οπλισμό διάτμησης, δηλαδή σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις και όχι τόσο σε συνηθισμένες κατασκευές. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αναπτύσσεται σε ένα υλικό υψηλής τεχνολογίας, το οποίο μπορεί να παρέχει εξαιρετική απόδοση, όμως απαιτεί επαρκείς γνώσεις για το σχεδιασμό και την εφαρμογή του.

2.2. Ορισμός - Σύνοψη

Το σκυρόδεμα είναι με διαφορά το πιο σημαντικό δομικό υλικό παγκοσμίως. Παρόλο που η χρήση του παρέχει πολλά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή θλιπτική αντοχή και η δυσκαμψία, παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα, την ψαθυρότητα και τη χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση ινών. Η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα οδηγεί σε περιορισμό της ρηγμάτωσης και σε αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας του υλικού που σχετίζεται με εφελκυστικές τάσεις. Η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.3.

Ινοπλισμένο ονομάζεται το κονίαμα που περιέχει τσιμέντο, νερό, αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες, ενώ μπορεί να περιέχει και άλλα πρόσμικτα όπως ποζολάνες, πυριτική παιπάλη κ.ά. Ο ίνες έχουν μήκος μερικών εκατοστών και διάμετρο συνήθως κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του σε ποσοστό της τάξης του $1 \div 3\%$ κ.ό. Χαμηλά ποσοστά ινών ($< 1\%$ κ.ό.) χρησιμοποιούνται μόνο για τη μείωση της ρηγμάτωσης συστολής, κυρίως σε πλάκες και δάπεδα όπου η εκτεθειμένη επιφάνεια είναι μεγάλη. Μέτρια ποσοστά ($1 \div 2\%$ κ.ό.) είναι τα πιο συνηθισμένα,

καθώς αποφέρουν αύξηση καμπτικής αντοχής, αντοχής σε κρούση, πλαστιμότητας και χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με απαιτήσεις αυξημένης ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Υψηλά ποσοστά ($> 3\%$ κ.ό.) οδηγούν σε πιο δύσκαμπτα μίγματα, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως ινοπλισμένα μίγματα υψηλής επιτελεστικότητας (High Performance Fiber Reinforced Concrete – HPFRC) και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε ειδικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου μίγματος είναι το σκυρόδεμα ινοπλισμένου τσιμεντοπολτού SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete), ένα μίγμα υψηλής αντοχής, το οποίο περιέχει πολύ υψηλό ποσοστό ινών χάλυβα που μπορεί να φτάσει έως $8 \div 12\%$ κ.ό., μερικές φορές και περισσότερο. Οι ίνες έχουν μήκος που κυμαίνεται από $100 \div 200$ mm και τοποθετούνται εκ των προτέρων στους ξυλότυπους, ενώ στη συνέχεια τοποθετείται ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος περιέχει λεπτόκοκκα αδρανή και ειδικά πρόσμικτα όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παπάλη. Για την επαρκή διείσδυση του τσιμεντοπολτού στους ξυλότυπους, απαιτείται η υψηλή εργασιμότητά του. Τα δομικά στοιχεία που κατασκευάζονται από SIFCON χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κρούση και διείσδυση βλημάτων. Η εφαρμογή του περιορίζεται σε πεζοδρόμια με υψηλή κίνηση, σε θησαυροφυλάκια τραπεζών κ.ά., δηλαδή σε εφαρμογές όπου το κόστος των υλικών και η εξειδικευμένη τεχνογνωσία είναι δικαιολογημένα.

Όσον αφορά τη σύνθεση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει μείωση της εργασιμότητας ανάλογη με το ποσοστό των ινών. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα είναι η αύξηση του μέγιστου κόκκου των αδρανών. Σύμφωνα με τον οδηγό ACI (American Concrete Institute) για τον καθορισμό, την ανάμιξη και την τοποθέτηση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση αδρανών μεγαλύτερα από 19mm για την παραγωγή σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν επαρκώς με τη χρήση πρόσμικτων όπως οι ρευστοποιητές, με τη χρήση ινών κολλημένες μεταξύ τους ανά ομάδες ή με την αύξηση του τσιμεντοπολτού.

2.3. Μηχανική συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος

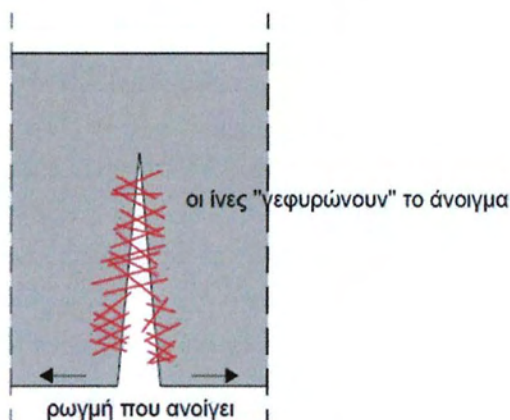
Ένα από τα μειονεκτήματα του σκυροδέματος είναι η παρουσία μικρορωγμών στο υλικό αλλά και στις διεπιφάνειες, ακόμα και πριν την επιβολή εξωτερικού φορτίου. Το μειονέκτημα αυτό προέρχεται λόγω των εντάσεων που αναπτύσσονται λόγω θερμοκρασίας, συστολής, εξωτερικών παρεμποδίσεων ή από την υπερβολική αναλογία νερού. Με την επιβολή του εξωτερικού φορτίου, οι κατανεμημένες μικρορωγμές διαδίδονται, ενώνονται, ευθυγραμμίζονται και δημιουργούνται οι μακρορωγμές. Η γρήγορη διάδοση των μικρορωγμών είναι υπεύθυνη για τη χαμηλή εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Οι διαδικασίες αυτές των μικρορωγμών και μακρορωγμών, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την πρόσθεση κοντών, τυχαία κατανεμημένων διακριτών ινών από διάφορα κατάλληλα

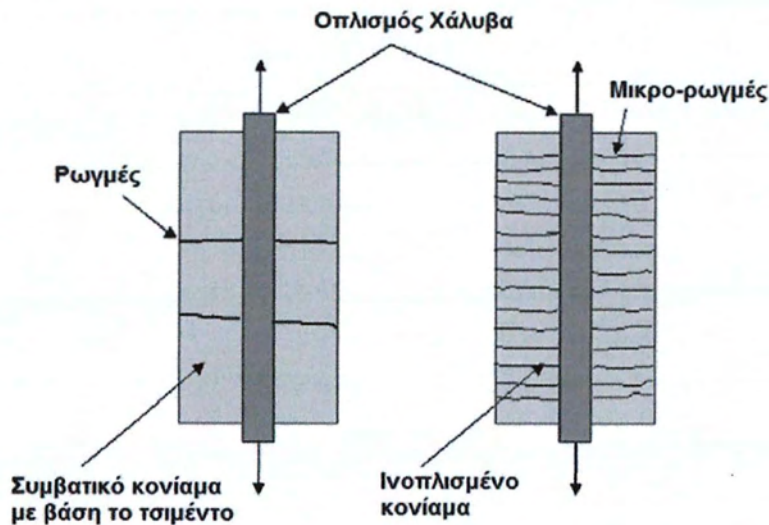
υλικά. Οι ίνες όχι μόνο εμποδίζουν τη δημιουργία των ρωγμών αλλά και μειώνουν την αύξηση και τη διάδοση τους.

Όταν οι ίνες αναπτύξουν την κατάλληλη συνάφεια στη σκληρυμένη κατάσταση, αλληλεπιδρούν με το σκυρόδεμα στο επίπεδο των μικρορωγμών και γεφυρώνουν αποτελεσματικά αυτές τις ρωγμές, παρέχοντας έτσι ένα μηχανισμό μεταφοράς δυνάμεων που καθυστερεί την ένωση τους και την ασταθή ανάπτυξή τους. Τη στιγμή που επιτευχθεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και οι μικρορωγμές ενωθούν και μετατραπούν σε μακρορωγμές, οι ίνες ανάλογα με το μήκος τους και τα χαρακτηριστικά της συνάφειας τους συνεχίζουν να περιορίζουν το άνοιγμα των ρωγμών και την ανάπτυξή τους με την αποτελεσματική γεφύρωση των μακρορωγμών (Σχήμα 2.1). Αυτό προϋποθέτει ότι οι εφελκυστικές τάσεις στις ίνες είναι μικρότερες από την εφελκυστική αντοχή τους και από την τάση εξόλκευσής τους. Εάν αυτές οι τάσεις δεν ξεπεραστούν, το σκυρόδεμα ρηγματώνεται και πάλι. Πρόκειται για ένα μηχανισμό πολλαπλής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος (Σχήμα 2.2), μέχρι να αστοχήσουν οι ίνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντοχή πρώτης ρηγμάτωσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του σκυροδέματος (διαβάθμιση αδρανών, περιεκτικότητα σε τσιμέντο, λόγος Ν/Τ κ.λπ.) και δευτερευόντως από την ποσότητα των ινών. Εάν το ογκομετρικό ποσοστό των ινών είναι αρκετά μεγάλο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (Σχήμα 2.6) μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Το γεφύρωμα που ενεργοποιείται μετά την επίτευξη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι ο κύριος μηχανισμός ενίσχυσης στην πλειονότητα των ινοπλισμένων κονιαμάτων του εμπορίου.

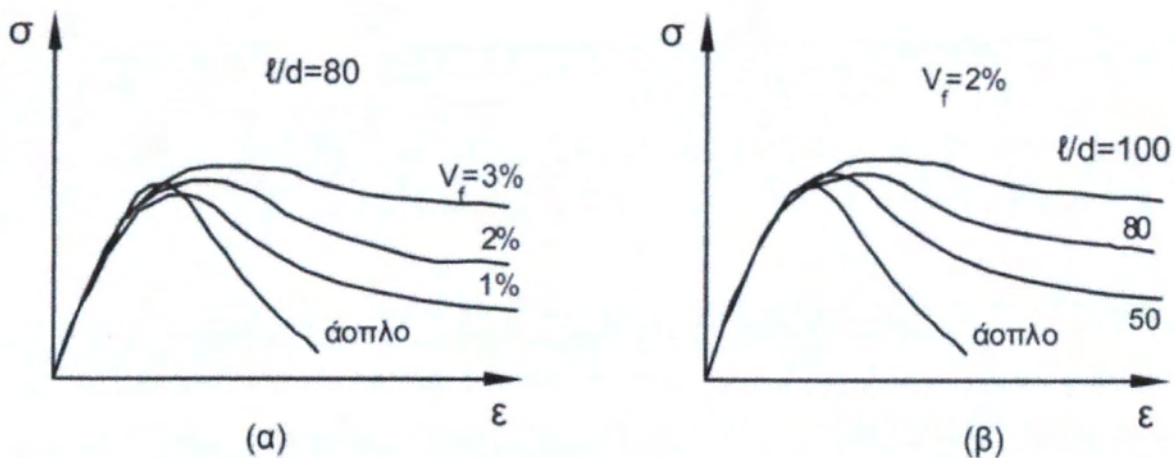
Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υλικού λόγω της προσθήκης ινών είναι πολύ μικρή (Σχήμα 2.3). Συγκριτικά με το άοπλο σκυρόδεμα, το ινοπλισμένο παρουσιάζει μέχρι και τέσσερις φορές μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, ανάλογα πάντα με το ποσοστό και τις ιδιότητες των ινών. Η αντοχή σε κόπωση παρουσιάζεται και αυτή αυξημένη 30 + 90% σε σχέση με το άοπλο και παράλληλα μειωμένο πλάτος ρωγμών λόγω κόπωσης.



Σχήμα 2.1. Περιορισμός ανοίγματος ρωγμής λόγω των ινών (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 2.2. Σχηματισμός ρωγμών σε συμβατικό και σε ινοπλισμένο κονίαμα (A. M. Brandt, 2008)

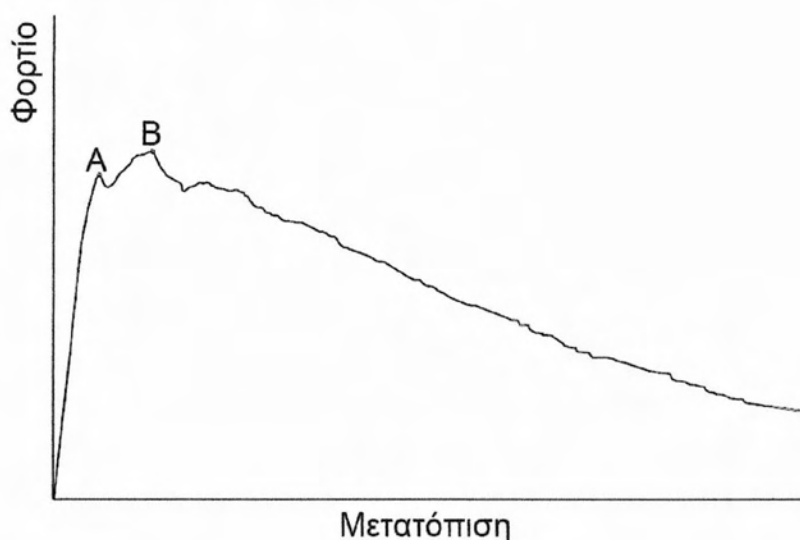


Σχήμα 2.3. Επίδραση (α) ποσοστού ινών χάλυβα και (β) λόγου διαστάσεων ινών l/d στη θλιπτική αντοχή ινοπλισμένου σκυροδέματος (Δομικά Υλικά, Αθ. Τριανταφύλλου)

Εξαιτίας της σύνθεσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, παρατηρείται καλύτερη ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Επίσης, επειδή η διάμετρος των ινών είναι σχετικά πολύ μικρή, μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος διάβρωσης των ινών και κατ' επέκταση οι τάσεις διόγκωσης που προκαλούν τα οξειδία του σιδήρου. Οι ίνες γυαλιού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κονιάματα Portland λόγω της χημικής προσβολής από την αλκαλικότητα της τσιμεντόπαστας. Ακόμη και οι ίνες γυαλιού που είναι ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον (Alkaline Resistant), παρουσιάζουν βαθμιαία επιδείνωση με το χρόνο. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στις φυτικές ίνες αλλά και σε πολλά συνθετικά πολυμερή.

Η επίδραση των ινών στο μέτρο ελαστικότητας είναι αμελητέα. Όσον αφορά τη συστολή ξήρανσης και τον ερπυσμό του σκυροδέματος, έχει αποδειχθεί ότι, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, οι ίνες (χάλυβα κυρίως) οδηγούν σε μείωση των παραμορφώσεων. Η προσθήκη ινών αυξάνει τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, ανάλογα με το ογκομετρικό ποσοστό των ινών και το λόγο των διαστάσεων των ινών l/d (μήκος προς διάμετρο). Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της επίδρασης λείων ινών χάλυβα στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 για διάφορους λόγους διαστάσεων και ογκομετρικά ποσοστά ινών.

Η τυπική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Χαρακτηρίζεται από έναν ελαστικό κλάδο μέχρι το σημείο εμφάνισης της πρώτης ρωγμής (σημείο Α). Οι ίνες αρχίζουν σταδιακά να αναλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις και όσο αυξάνεται το φορτίο τείνουν να εξολκευτούν, οδηγώντας σε μη γραμμική συμπεριφορά και σε μικρή άνοδο ως το σημείο μέγιστης αντοχής (σημείο Β). Η επιμήκυνση των ρωγμών προς τη θλιβόμενη ζώνη ενεργοποιεί και εξολκεύει ίνες συνεχώς οδηγώντας σε πτώση της αντοχής. Η απορρόφηση ενέργειας υπολογίζεται από το εμβαδό που περικλείεται από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης και είναι σαφώς αυξημένη στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012).

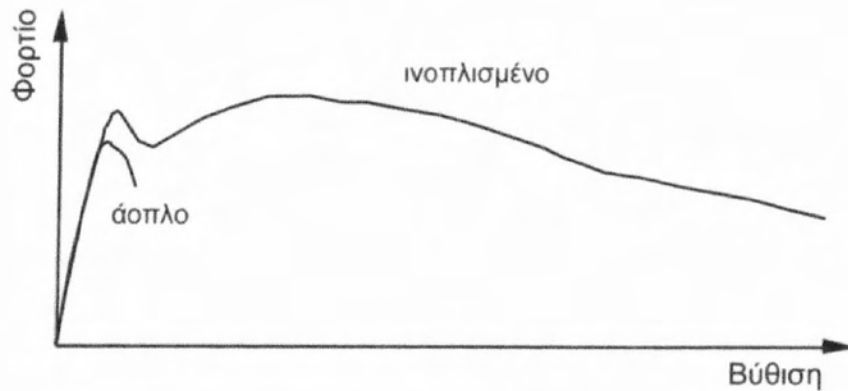


Σχήμα 2.4. Τυπικό διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα σε κάμψη (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

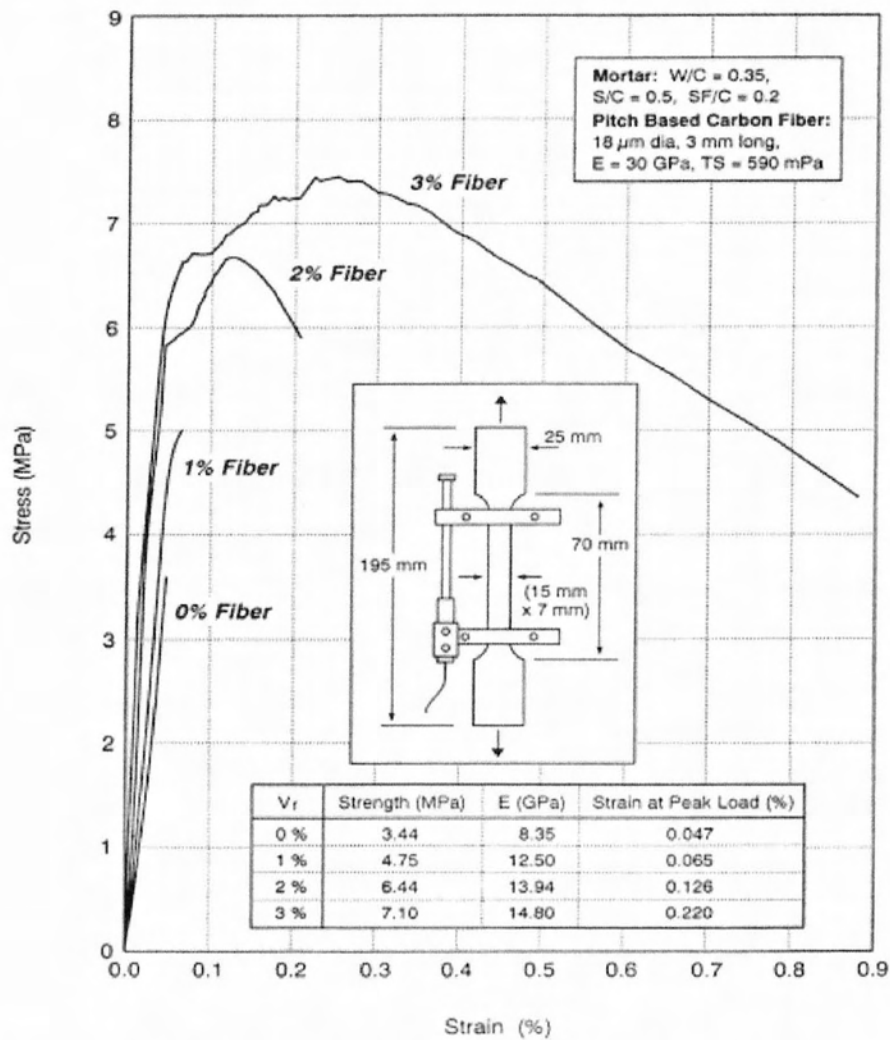
Σε περίπτωση χρήσης ινών χάλυβα, αραμιδίου ή άλλου τύπου ινών με υψηλή εφελκυστική αντοχή, ο συνηθέστερος τρόπος αστοχίας τους είναι η εξόλκευση και όχι η θραύση τους, όπως είναι λογικό.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη είναι ο τύπος των ινών, οι διαστάσεις και η μορφή τους, το ογκομετρικό ποσοστό, η

εφελκυστική αντοχή τους, η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση καθώς και η αλκαλική τους σταθερότητα.



Σχήμα 2.5. Συνεισφορά των ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη (Δομικά Υλικά, Αθ. Τριανταφύλλου)



Σχήμα 2.6. Επίδραση ογκομετρικού ποσοστού ινών στην εφελκυστική αντοχή κονιάματος ενισχυμένου με ίνες άνθρακα (N. Banthia, 2008)

2.4. Ιδιότητες ινών

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα μπορούν να χαρακτηριστούν με διάφορους τρόπους. Η ταξινόμηση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το υλικό των ινών, τις φυσικές - χημικές και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Εφόσον επιλεγθεί ο τύπος της ίνας, υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών που σχετίζονται με το σχήμα της διατομής, τη διάμετρο και την παραμόρφωση της επιφάνειας.

Η διατομή των ινών μπορεί να είναι κυκλική, ορθογωνική, σε σχήμα διαμαντιού, τετραγωνική, τριγωνική, επίπεδη, πολυγωνική κ.ά.. Για την επίτευξη καλύτερης συνάφειας μεταξύ των ινών και του κονιάματος, οι ίνες μπορούν να τροποποιηθούν κατά μήκος τους είτε εκτραχύνοντας την επιφάνεια τους είτε επιφέροντας μηχανικές παραμορφώσεις. Συνεπώς, οι ίνες μπορούν να είναι λείες, οδοντωτές, παραμορφωμένες, πτυχωμένες, στρεβλωμένες, με άγκιστρα στα άκρα τους, ή με άλλου είδους αγκύρωση.

Πίνακας 2.1. Ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα (N. Banthia, 2008)

Τύπος Ίνας	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Εφελκυστική Παραμόρφωση % (max - min)	Διάμετρος Ίνας (μm)	Αλκαλική Σταθερότητα
Αμίαντος (Asbestos)	600 - 3600	69 - 150	0,3 - 0,1	0,02 - 30	Άριστη
Άνθρακας	590 - 4800	28 - 520	2 - 1	7 - 18	Άριστη
Αραμίδιο	2700	62 - 130	4 - 3	11 - 12	Καλή
Πολυπροπυλένιο	200 - 700	0,5 - 9,8	15 - 10	10 - 150	Άριστη
Πολυαμίδιο	700 - 1000	3,9 - 6	15 - 10	10 - 50	-
Πολυεστέρας	800 - 1300	έως 15	20 - 8	10 - 50	-
Μετάξι (Rayon)	450 - 1100	έως 11	15 - 7	10 - 50	Μέτρια
Πολυβινυλική Αλκοόλη (PVA)	800 - 1500	29 - 40	10 - 6	14 - 600	Καλή
Polyacrylonitrile (PAN)	850 - 1000	17 - 18	9	19	Καλή
Πολυεθυλαίνιο	400	2 - 4	400 - 100	40	Άριστη
Πολυεθυλαίνιο Υψηλ.Πυκν.	2585	117	2.2	38	Άριστη
Χάλυβας Άνθρακα	3000	200	2 - 1	50 - 85	Άριστη
Ανοξείδωτος Χάλυβας	3000	200	2 - 1	50 - 85	Άριστη
Γυαλί AR (Alkaline-Resistant)	1700	72	2	12 - 20	Καλή

Το μήκος και η διάμετρος των συνθετικών ινών διαφέρουν πολύ. Οι ίνες μπορεί να είναι πολύ μικρές, διαμέτρου 10 μm όπως οι ίνες Kevlar ή άνθρακα, αλλά και πολύ μεγάλες, διαμέτρου 0,8 mm όπως μερικές ίνες πολυπροπυλενίου ή πολυβινυλικής αλκοόλης (Poly-Vinyl-Alcohol). Η χρήση ινών PVA είναι αρκετά διαδεδομένη, με μήκος που κυμαίνεται

από 10 έως 80 mm, διάμετρο $0,5 \div 1,5$ mm και ποσοστά κατ' όγκο $0,5 \div 2\%$. Η χρήση ινών PVA οδηγεί σε αύξηση της αντοχής, της δυσθραυστότητας και της συμπεριφοράς έναντι κρούσης και κόπωσης. Στις εφαρμογές σκυροδέματος, ο λόγος μήκους προς διάμετρο πολύ λεπτών ινών δεν πρέπει να ξεπερνά το 100. Οι περισσότερες συνθετικές ίνες (γυαλιού, άνθρακα, Kevlar) έχουν κυκλική διατομή. Οι επίπεδες συνθετικές ίνες, οι οποίες αποκόπτονται από πλαστικά φύλλα είναι κατάλληλες όταν χρησιμοποιείται σχετικά χαμηλό ογκομετρικό ποσοστό ινών όπως για τον έλεγχο των τριχοειδών ρωγμών λόγω πλαστικής συστολής στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Το περιεχόμενο των ινών σε κονιάματα με βάση το τσιμέντο καθορίζεται από το ποσοστό όγκου του τελικού μίγματος. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά των ινών έχουν διαφορετική πυκνότητα, οπότε το ίδιο ποσοστό όγκου ινών από διαφορετικά υλικά οδηγεί σε διαφορετικά βάρη των ινών. Οι ίνες μπορεί αγοράζονται με βάση το βάρος τους, όμως οι μηχανικές ιδιότητες των μιγμάτων βασίζονται στο ποσοστό όγκου των ινών. Χαρακτηριστικά, ογκομετρικό ποσοστό 1% ινών χάλυβα σε κανονικού βάρους σκυρόδεμα υπολογίζεται σε 80 kg/m^3 , ενώ 1% ινών πολυπροπυλενίου υπολογίζεται μόνο σε $9,2 \text{ kg/m}^3$.

Σύμφωνα με τον N. Banthia, επί του παρόντος χρησιμοποιούνται περίπου 300.000 τόνοι ινών ως υλικό ενίσχυσης του σκυροδέματος. Η χρήση ινών χάλυβα είναι η πιο διαδεδομένη (50%) και ακολουθούν οι ίνες πολυπροπυλενίου (20%), γυαλιού (5%) και άλλες ίνες (25%).

2.4.1. Ίνες χάλυβα

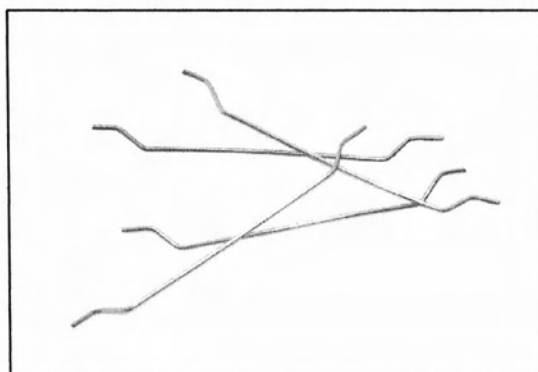
Ο πιο σημαντικός τύπος ινών και ο πιο διαδεδομένος είναι οι ίνες από χάλυβα. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται τα διάφορα σχήματα ινών από χάλυβα που υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο.

Οι πιο συνήθεις ίνες χάλυβα έχουν κυκλική διατομή με διάμετρο που κυμαίνεται από 0,4 έως 0,8 mm και μήκος από 25 έως 60 mm. Ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο είναι γενικά μικρότερος από 100 ώστε να μην προκαλούνται συσσωματώσεις, με συνηθισμένο εύρος 40 με 80. Το ποσοστό των ινών στον όγκο του σκυροδέματος δεν πρέπει να ξεπερνά το 2% για έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα και το 3% για εκτοξευόμενο, που χρησιμοποιείται κυρίως σε επενδύσεις σηράγγων. Το όριο διαρροής τους πρέπει να είναι τουλάχιστον 1034 MPa (ACI 440, 1996).

Σύμφωνα με τις μεγαλύτερες εταιρίες παραγωγής ινών χάλυβα, το 67% των ινών που πωλούνται στο εμπόριο είναι ίνες κυκλικής διατομής με κεκαμμένα άκρα (hooked end) (Σχήμα 2.8), ενώ ακολουθούν οι λείες ίνες οποιασδήποτε διατομής και ίνες με τραχιά επιφάνεια σε ποσοστά περίπου 9% και οι πτυχωμένες (crimped) σε ποσοστό 8%.



Σχήμα 2.7. Χαρακτηριστικά σχήματα ινών χάλυβα (A. Naaman, 2003)



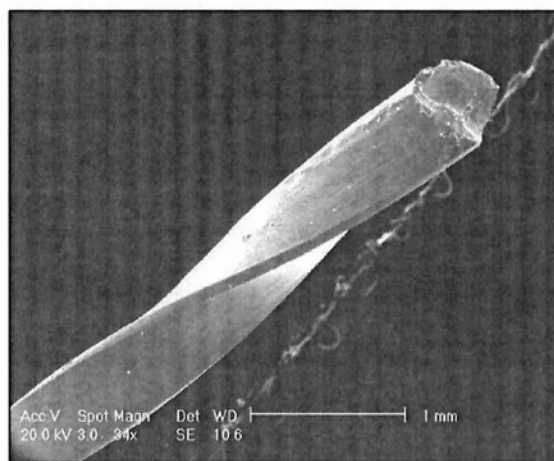
Σχήμα 2.8. Ίνες χάλυβα με κεκαμμένα άκρα (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

2.4.2. Στρεβλωμένες ίνες χάλυβα

Οι στρεβλωμένες ίνες έχουν εισαχθεί σχετικά πρόσφατα από τον Antoine E. Naaman (Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, 2003), ως μια προσπάθεια βελτίωσης των ιδιοτήτων των ινών χάλυβα όσον αφορά το σχήμα, το μέγεθος, τις μηχανικές τους ιδιότητες καθώς και τη συμβατότητα τους με το δεδομένο κονίαμα. Κατασκευάζονται από πολύ υψηλής αντοχής χάλυβα, με πολυγωνική διατομή (τριγωνική ή τετραγωνική), πιθανόν να έχουν οδοντωτές πλευρές και να είναι στρεβλωμένες κατά μήκος τους. Το κύριο χαρακτηριστικό των ινών αυτού του τύπου είναι ότι όταν εφελκούνται από ένα κονίαμα, η αντοχή τους αυξάνεται με την αύξηση της ολίσθησης.

Χαρακτηριστικές δοκιμές έχουν επιδείξει καλύτερη επίδοση (2 με 3 φορές) συγκριτικά με τις υπόλοιπες ίνες χάλυβα του εμπορίου.

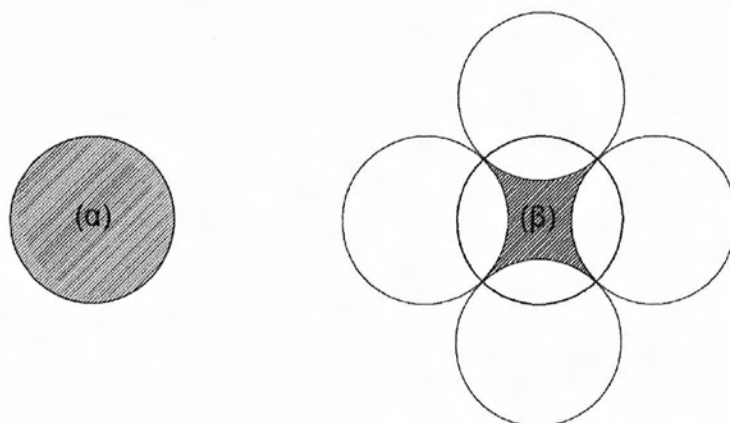
Η καλύτερη συμπεριφορά των στρεβλωμένων ινών έναντι των υπόλοιπων ινών χάλυβα οφείλεται στην καλύτερη συνάφεια με το κονίαμα. Οι τρεις παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια μεταξύ των ινών και του κονιάματος είναι η τριβή, η πρόσφυση, και η μηχανική τους συνάφεια. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, μέσω της διαμόρφωσης του σχήματος της διατομής των ινών και της γεωμετρίας τους.



Σχήμα 2.9. Στρεβλωμένη ίνα τριγωνικής διατομής σε μεγέθυνση (A. Naaman, 2003)

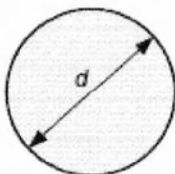
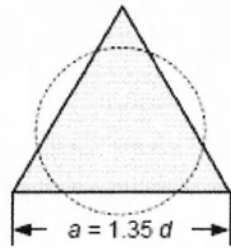

Βελτίωση τριβής και πρόσφυσης

Διαμορφώνοντας κατάλληλα τη συνηθισμένη μορφή κυκλικής διατομής των ινών (α) σε μια νέα διατομή (β) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10, παρατηρείται ότι οι δυο διατομές έχουν την ίδια περίμετρο, ενώ το εμβαδό της διατομής (β) είναι μόνο το 28% της αρχικής κυκλικής. Εάν υποτεθεί ίδιο μήκος ινών, ίδιο μήκος έμπηξης, καθώς και ίδιες μηχανικές ιδιότητες, οι ίνες με αυτές τις διατομές θα έχουν το ίδιο φορτίο εξόλκευσης. Όμως η ένταση στις ίνες με διατομή (β) θα είναι 3,66 φορές μεγαλύτερη από αυτές με διατομή (α), που σημαίνει ότι είναι πιο αποδοτικές. Επιπλέον, για το ίδιο ποσοστό κατ' όγκο, το μίγμα με τις ίνες διατομής (β) θα παρουσιάσει 3,66 φορές μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή μετά τη ρηγμάτωση. Αυτό το παράδειγμα αποδεικνύει την επιρροή της διατομής των ινών στο τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 2.10. (α) Ίνα κυκλικής διατομής, (β) Ίνα με διαμορφωμένη διατομή

Η ίνα με διατομή (β) έχει πολύ αιχμηρές πλευρές και δεν είναι πολύ πρακτική στην κατασκευή, όμως είναι δυνατό να κατασκευαστούν ίνες με τριγωνική ή πολυγωνική διατομή. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται τρεις πιθανές διατομές των ινών. Η ίνα (Α) είναι κυκλική με διάμετρο d και περίμετρο πd . Η ίνα (Β) είναι τριγωνική και έχει το ίδιο εμβαδό με την ίνα (Α), αλλά περίμετρο 1,28 φορές μεγαλύτερη. Συνεπώς, αν όλες οι άλλες παράμετροι είναι ίδιες, οι ίνες με αυτή τη διατομή θα οδηγήσουν θεωρητικά σε 28% αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης μετά τη ρηγμάτωση. Η ίνα (Γ) έχει περίπου την ίδια περίμετρο με την ίνα (Α), αλλά διατομή που αντιστοιχεί μόνο στο 45% της κυκλικής, που σημαίνει ότι θα οδηγήσει σε 220% αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης μετά τη ρηγμάτωση. Αυτό το παράδειγμα αναδεικνύει την επιρροή του λόγου περιμέτρου προς διάμετρο της ίνας και τη σημασία του σχήματος της διατομής της ίνας. Χαρακτηριστικά πολυγωνικά σχήματα όπως η ίνα (Β) αλλά και άλλα σχήματα διατομής όπως η ίνα (Γ), είναι πιο αποδοτικές σε σχέση με τις ίνες κυκλικής διατομής σε συνεισφορά στη συμπεριφορά του μίγματος μετά τη ρηγμάτωση, οπότε και αναλαμβάνουν δυνάμεις οι ίνες.

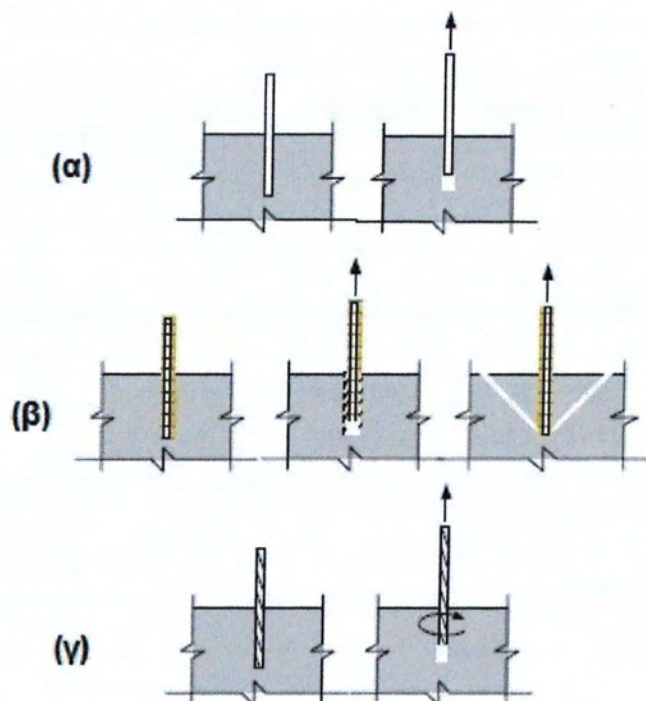
Κυκλική Ίνα (Α)	Τριγωνική Ίνα (Β)	Ουσιωδώς Τριγωνική Ίνα (Γ)
 <p>Ίνα διαμέτρου d, εμβαδού A και περιμέτρου πd</p>	 <p>Ίνα πλευράς a, ίδιου εμβαδού με την κυκλική ίνα διαμέτρου d, αλλά με 28% μεγαλύτερη περίμετρο</p>	 <p>Ίνα περίπου ίδιας περιμέτρου με την κυκλική ίνα διαμέτρου d, όμως με εμβαδό μόνο το 45% του Α</p>

Σχήμα 2.11. Παράδειγμα βελτίωσης της διατομής της ίνας (Α. Naaman, 2003)

Βελτίωση μηχανικού μέρους της συνάφειας

Όπως προαναφέρθηκε, για τη βελτίωση της μηχανικής αγκύρωσης των ινών χάλυβα στο κονίαμα, επιβάλλονται μηχανικές παραμορφώσεις στις ίνες. Το αποτέλεσμα αυτών των παραμορφώσεων μπορεί να είναι ίνες με πτυχές, με κεκαμμένα άκρα, με «κουμπιά» στα άκρα κ.ά. Ο πιο αποδοτικός τρόπος για την ανάπτυξη μηχανικής συνάφειας είναι η στρέβλωση των ινών με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύψει εικόνα παρόμοια με μια βίδα. Για να σχηματιστούν ραβδώσεις στις ίνες με τη στρέβλωση, οι ίνες πρέπει να έχουν πολυγωνικό σχήμα διατομής, καθώς στις κυκλικές ίνες αυτό δεν είναι εφικτό. Η στρέβλωση των ινών και η δημιουργία ραβδώσεων αυξάνει την αντοχή σε εξόλκευση με τρόπο παρόμοιο όπως η βίδα συμπεριφέρεται καλύτερα σε εξόλκευση από ένα καρφί.

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί που ενεργοποιούνται για κάθε τύπο ίνας σε δοκιμή εξόλκευσης, ώστε να προσδιοριστεί καλύτερα ο απαιτούμενος βαθμός στρέβλωσης των ινών. Στην περίπτωση που η ίνα είναι λεία (α), ουσιαστικά ολισθαίνει προς τα έξω με ελάχιστη βλάβη στο περιβάλλον κονίαμα. Εάν η ίνα είναι τύπου «βίδας» (β), η αγκύρωσή της πιθανόν να είναι πολύ ισχυρή σε σημείο που εάν το φορτίο εξόλκευσης είναι αυξημένο, οι τρόποι αστοχίας του είναι δύο: είτε πραγματοποιείται εξόλκευση λόγω απώλειας συνάφειας με το περιβάλλον κονίαμα, είτε επέρχεται αστοχία με τη μορφή κώνου απόσχισης (του οποίου η κορυφή βρίσκεται στο άκρο του αγκυρίου) λόγω υπέρβασης των χαρακτηριστικών αντοχής του κονιάματος, όπως και στα αγκύρια. Στην περίπτωση κατάλληλα στρεβλωμένης ίνας πολυγωνικής διατομής, το αυξανόμενο φορτίο εξόλκευσης τείνει να ομαλοποιήσει («ξεστρίψει») την ίνα, ενώ αυτή ολισθαίνει από το κονίαμα και συνεπώς η αντίσταση της ίνας σε εξόλκευση παραμένει σταθερή ή και αυξάνεται. Για να συμβεί όμως αυτό, οι ραβδώσεις των ινών πρέπει να κατασκευαστούν κατάλληλα, σύμφωνα με τις ιδιότητες τους αλλά και του κονιάματος. Ένας τελευταίος μηχανισμός, ο οποίος ενεργοποιείται μόνο στις στρεβλωμένες ίνες, μπορεί να περιγραφεί εύκολα ως ένας επαναληπτικός μηχανισμός «σφηνώματος-ολίσθησης» (stick – slip) και προκαλείται από το κύμα ομαλοποίησης της ίνας, που διαδίδεται κατά μήκος της, όταν αυτή καταπονείται σε φορτίο εξόλκευσης. Αυτός ο μηχανισμός είναι υπεύθυνος για τη σταθεροποίηση της σχέσης των τάσεων συνάφειας με την ολίσθηση της ίνας, ακόμα και για σχετικά μεγάλες τιμές ολίσθησης.

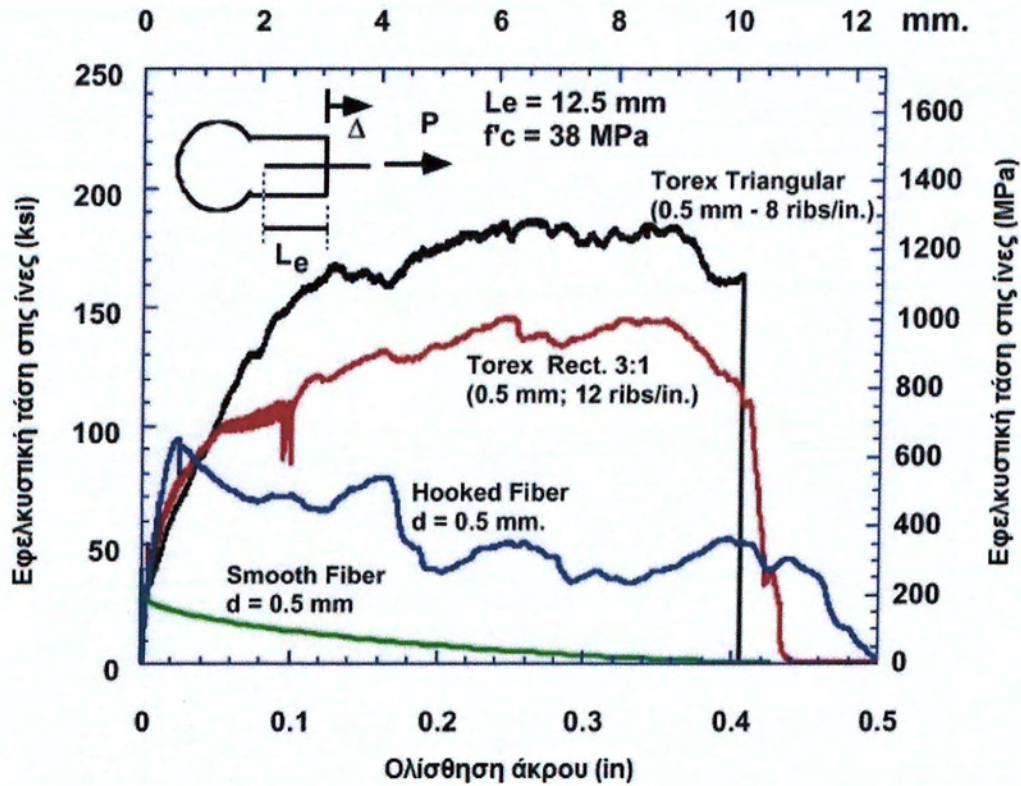


Σχήμα 2.12. Χαρακτηριστική συμπεριφορά ινών χάλυβα σε δοκιμή εξόλκευσης από το κονίαμα: (α) Λεία ίνα, (β) Ίνα τύπου «βίδας», (γ) Στρεβλωμένη ίνα πολυγωνικής διατομής (A. Naaman, 2003)

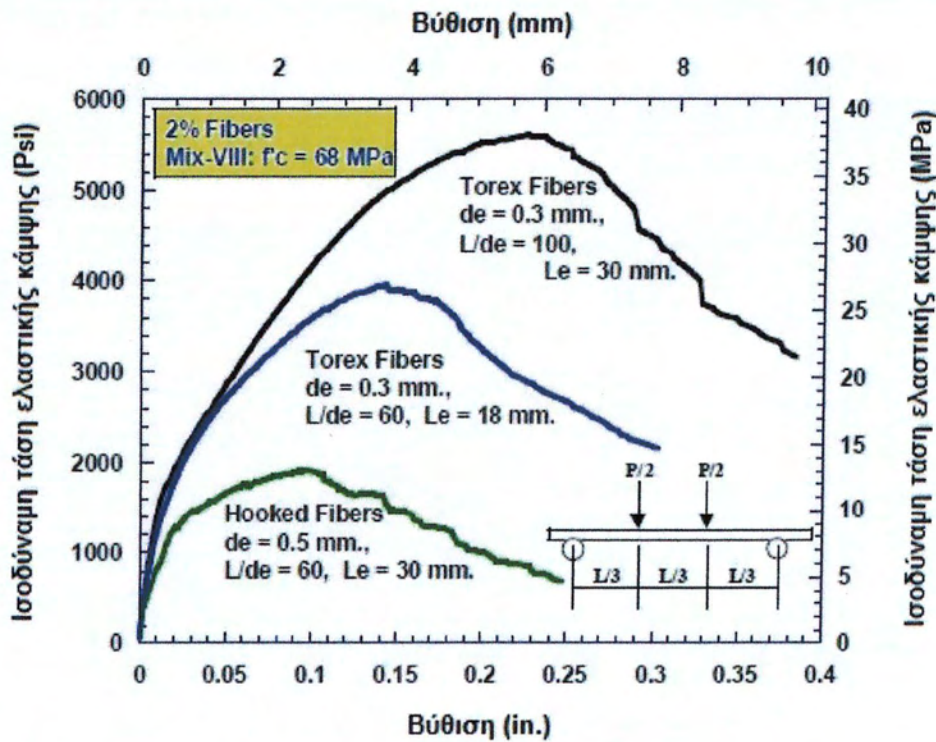
Προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση των στρεβλωμένων ινών και να συγκριθεί με αυτή των άλλων ινών που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, διεξήχθησαν πειράματα στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.13, 2.14 και 2.15.

Στο Σχήμα 2.13 το φορτίο εξόλκευσης έχει μετατραπεί σε εφελκυστική τάση που ασκείται στις ίνες. Το πιο αξιοσημείωτο συμπέρασμα είναι ότι οι στρεβλωμένες ίνες διατηρούν υψηλή αντοχή σε φορτίο εξόλκευσης ακόμα και σε μεγάλες τιμές ολίσθησης που αντιστοιχούν στο $70 \div 80\%$ του μήκους έμπτυξης. Αυτό υπονοεί τη θετική επίδραση των στρεβλωμένων ινών, οι οποίες περιορίζουν αποτελεσματικά το άνοιγμα των ρωγμών ακόμα και όταν εμφανιστούν ρωγμές μεγάλου εύρους στο κονίαμα. Από όλα τα διαγράμματα συμπεραίνεται το μεγαλύτερο φορτίο εξόλκευσης των στρεβλωμένων ινών και κατ' επέκταση η καλύτερη απόδοσή τους.

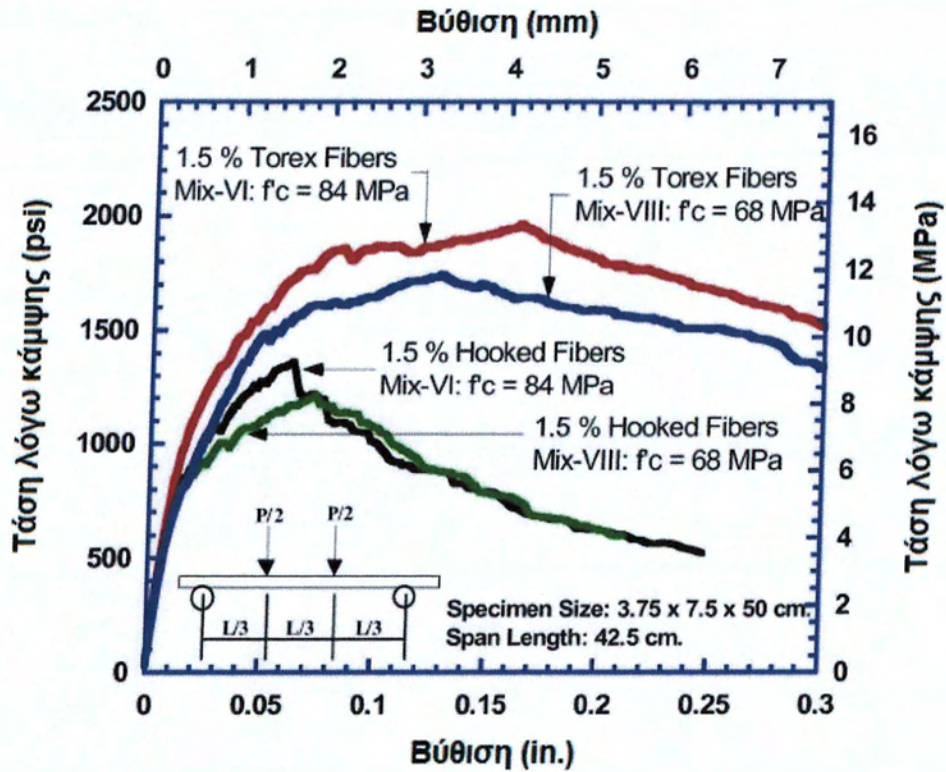
Παρόλο που τα πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν την ανωτερότητα των στρεβλωμένων ινών έναντι των υπόλοιπων ινών του εμπορίου, η πρακτική εφαρμογή τους σε πραγματικές κατασκευές δεν έχει διαδοθεί ιδιαίτερα. Αυτό ίσως οφείλεται στο μικρό αριθμό πειραματικών μελετών, αφού ακόμη και αυτές διεξήχθησαν την τελευταία δεκαετία και είναι σχετικά πρόσφατες.



Σχήμα 2.13. Σύγκριση διαγραμμάτων εφελκυστικής τάσης – ολίσθησης λείων ινών, ινών με κεκαμμένα άκρα (hooked end) και στρεβλωμένων ινών σε δοκιμή εξόλκευσης (A. Naaman, 2003)



Σχήμα 2.14. Τυπική απόκριση κάμψης δοκιμίων μικρού πάχους (12.5 mm) ενισχυμένων με στρεβλωμένες ίνες και με ίνες με κεκαμμένα άκρα (hooked end) (A. Naaman, 2003)



Σχήμα 2.15. Τυπική απόκριση κάμψης δοκιμίων μεγάλου πάχους (37.5 mm) ενισχυμένων με στρεβλωμένες ίνες και με ίνες με κεκαμμένα άκρα (hooked end) (A. Naaman, 2003)

Κεφάλαιο 3 : Επισκευές – Ενισχύσεις

3.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια η επισκευή και ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών αποκτά όλο και περισσότερο ενδιαφέρον και αναδεικνύεται σε ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογών της δομοστατικής μηχανικής. Σε περίπτωση που ένα κτίριο υποστεί βλάβες, επιδιώκεται η αποκατάσταση του βαθμού αντισεισμικής ασφάλειας και ενδεχομένως αύξηση αυτού εάν κριθεί αναγκαίο. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποκατάσταση ή και την αύξηση της ικανότητας του κτιρίου να απορροφάει και να κατανέμει στο φέροντα οργανισμό την εισαγόμενη σεισμική ενέργεια. Για λόγους αισθητικούς αλλά και ψυχολογικούς, συνήθως επισκευάζονται και οι φθορές που δεν επηρεάζουν την ασφάλεια του κτιρίου. Σε πολλές περιπτώσεις, η επισκευή ή η ενίσχυση μιας κατασκευής είναι πιο οικονομική από την ανακατασκευή της εξολοκλήρου.

Τα πιο συνήθη αίτια για επισκευή ή ενίσχυση κατασκευών είναι οι βλάβες και φθορές στο φέροντα οργανισμό μετά από σεισμό ή άλλες δράσεις, η αύξηση του επιπέδου ασφαλείας της κατασκευής (συμμόρφωση με νέους κανονισμούς), η αλλαγή χρήσης του κτιρίου (αύξηση ωφέλιμων φορτίων), η αλλοίωση χαρακτηριστικών λόγω της ηλικίας της κατασκευής και οι αποκλίσεις από την αρχική μελέτη ή η διαπίστωση σφαλμάτων κατά τη μελέτη ή την εκτέλεση.

Με τον όρο επέμβαση νοείται η στοχευόμενη μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή, δυσκαμψία, πλαστιμότητα κ.λπ.) ενός στοιχείου ή μιας κατασκευής με συνέπεια την τροποποίηση της απόκρισής του. Όμως ο όρος αυτός είναι γενικός, δηλαδή μπορεί να αναφέρεται σε επισκευή ή ενίσχυση αλλά και σε άλλες ενέργειες όπως συντήρηση, αναστήλωση, ανακατασκευή κ.ά.

Με τον όρο επισκευή νοείται η διαδικασία επέμβασης σε ένα στοιχείο (ή μια κατασκευή) που στοχεύει στην αποκατάσταση των μηχανικών χαρακτηριστικών του στα επίπεδα προ της βλάβης και το επαναφέρει στην αρχική του φέρουσα ικανότητα.

Με τον όρο ενίσχυση νοείται η διαδικασία επέμβασης σε ένα στοιχείο (ή μια κατασκευή) με ή χωρίς βλάβες που στοχεύει στην αναβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του έως μια επιθυμητή στάθμη υψηλότερη από αυτή του αρχικού σχεδιασμού.

3.1.1. Διαδικασία ανασχεδιασμού

Για να ληφθεί απόφαση για επέμβαση σε μια κατασκευή, λαμβάνονται υπόψη κάποια βασικά κριτήρια, τα οποία είναι το κόστος της επισκευής - ενίσχυσης, οι επιπτώσεις στη χρήση της κατασκευής, η διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών αλλά και οι αρχιτεκτονικές συνέπειες.

Η διαδικασία ανασχεδιασμού μίας κατασκευής περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες:

- Προσεκτική καταγραφή τυχόν βλαβών και προσπάθεια αξιολόγησης και ερμηνείας τους
- Αποτίμηση της υφιστάμενης κατασκευής
- Εξέταση όλων των εναλλακτικών λύσεων επέμβασης και επιλογή της καταλληλότερης με κριτήρια την επιθυμητή αντοχή του φορέα και το κόστος
- Αναδιαστασιολόγηση του φορέα

3.1.2. Σημασία των επεμβάσεων σε δοκούς

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές που διέπουν τον αντισεισμικό σχεδιασμό των δομικών στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ), η απόσβεση της σεισμικής ενέργειας πρέπει να γίνεται κυρίως από στοιχεία που διαθέτουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα και που είναι πιο εύκολο να επισκευασθούν, δηλαδή πρέπει να γίνει ιεράρχηση των αστοχιών έτσι ώστε η αστοχία των δοκών να προηγείται της αστοχίας των υποστυλωμάτων. Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητο η απόσβεση αυτή να γίνεται μέσω καμπτικών μηχανισμών διαρροής και όχι από διατμητικούς ή ολισθητικούς. Από αυτά συμπεραίνεται ότι οι δοκοί είναι τα δομικά στοιχεία στα οποία αναμένεται να αποσβεστεί το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής ενέργειας, άρα είναι επιτακτική η ανάγκη για την κατάλληλη διαστασιολόγηση και κατασκευαστική διαμόρφωση ώστε να εξασφαλίζεται μια επαρκής στάθμη αντοχής και πλαστιμότητας.

3.2. Τεχνικές Επισκευής Δοκών

Ανάλογα με το μέγεθος της βλάβης εφαρμόζονται τεχνικές, όπως η εφαρμογή επισκευαστικών κονιαμάτων, οι επικολήσεις μεταλλικών ελασμάτων και οι μανδύες.

Η εφαρμογή των επισκευαστικών κονιαμάτων προτείνεται όταν το απαιτούμενο πάχος του υλικού είναι μικρό και απαιτείται πολύ καλή πρόσφυση. Το υψηλό τους κόστος αποτελεί και το βασικό μειονέκτημά τους, το οποίο όμως δεν είναι μεγάλης σημασίας, αφού η ποσότητα που χρειάζεται είναι μικρή και προσφέρει υψηλό βαθμό προστασίας. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται, τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο και τα κονιάματα με πολυμερή.

Τα κονιάματα με πολυμερή χρησιμοποιούνται για να αποκατασταθούν μικρές βλάβες σε δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (π.χ. αποφλοίωση σκυροδέματος, μικρορωγμές), ενώ τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη (π.χ. καθαίρεση και αποκατάσταση περιοχών αποδιοργανωμένου σκυροδέματος). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κονιάματα με πολυμερή έχουν σαφώς μεγαλύτερο κόστος από τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις η χρήση τους προσφέρει περισσότερα

πλεονεκτήματα. Τα κονιάματα με πολυμερή λέγονται και ρητινοκονιάματα, επειδή συνήθως χρησιμοποιείται ρητίνη ως πολυμερές.

3.2.1. Επισκευή δοκών με χαμηλό βαθμό βλάβης

Μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδος επισκευής μικρών βλαβών (ρωγμών) σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος είναι οι ρητινενέσεις. Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως εποξειδικές ρητίνες, για ενέσεις εντός ρωγμών για τη συγκόλληση ρηγματωμένου σκυροδέματος. Εφαρμόζονται μόνο στην επισκευή δοκών που δεν έχουν υποστεί κάποια σοβαρή βλάβη, δηλαδή με ελαφρά ρήγματα χωρίς συντριβή στο σκυρόδεμα ή διαρροή στους οπλισμούς. Το εύρος των ρωγμών στο οποίο εφαρμόζονται συνήθως κυμαίνεται από 0,1 mm έως 3 mm.

Η διαδικασία εφαρμογής ξεκινά με τον καθαρισμό της ρωγμής με πεπιεσμένο αέρα και ακολουθεί η διάνοιξη μικρών οπών διαμέτρου 5 ÷ 10 mm κατά μήκος της ρωγμής. Στη συνέχεια τοποθετούνται στόμια ανάλογης διαμέτρου και σφραγίζεται η ρωγμή επιφανειακά με ρητινόστοκο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη διοχέτευση εποξειδικής ρητίνης αναμεμιγμένη με σκληρυντή με ειδικό πιεστικό δοχείο. Την επόμενη μέρα, η εποξειδική ρητίνη έχει σκληρυνθεί αποκτώντας αντοχές υψηλότερες του σκυροδέματος και συγκολλά ξανά το ρηγματωμένο τμήμα. Τα τελευταία βήματα της τεχνικής είναι η αφαίρεση του ρητινόστοκου και η λείανση επιφάνειας.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής είναι κυρίως η εύκολη εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές, η υψηλή αντοχή εφελκυσμού και συνάφειας που εμποδίζουν την αύξηση του εύρους των ρωγμών, το πλήρες σφράγισμα των ρωγμών και επομένως η διασφάλιση της συνέχειας του υλικού και το αισθητικό αποτέλεσμα.

Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι το διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας με το σκυρόδεμα και η μικρή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα χαρακτηριστικά των ρητινών σε θερμοκρασίες άνω των 50°C αλλάζουν και η αντοχή τους μειώνεται, οπότε η εφαρμογή αυτής της τεχνικής πρέπει να συνοδεύεται και με μέτρα πυροπροστασίας (π.χ. επίχρισμα). Τα μειονεκτήματα όμως αυτά είναι σαφώς μικρότερης σημασίας από τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής, με την οποία είναι δυνατή η πλήρης επισκευή των ρωγμών και η επαναφορά της μονολιθικότητας και της στατικής ακεραιότητας του δομικού στοιχείου.

3.2.2. Επισκευή δοκών με υψηλό βαθμό βλάβης

Η πιο συνηθισμένη τεχνική επισκευής δοκών με υψηλό βαθμό βλάβης είναι η καθαίρεση και αποκατάσταση. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις βλαβών όπως η συντριβή σκυροδέματος, η απώλεια συνάφειας, η αποφλοιώση από δράση βλήτρου κ.λπ. ενώ προηγείται πάντα υποστύλωση.

Εάν η αστοχία του σκυροδέματος είναι επιφανειακή γίνεται μερική καθαίρεση και αποκατάσταση, όμως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διασφάλιση υψηλής συνάφειας μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος. Σε περίπτωση που η αστοχία είναι καθολική γίνεται πλήρης αφαίρεση του υλικού, τοποθέτηση με συγκόλληση νέων διαμήκων οπλισμών και συνδετήρων και σκυροδέτηση. Συνήθως στην περίπτωση αυτή, κατασκευάζεται και μανδύας από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που η σκυροδέτηση δεν μπορεί να γίνει από το άνω μέρος της δοκού με ειδικά ανοίγματα στην πλάκα, προκύπτουν δυσκολίες εφαρμογής της μεθόδου σχετικές με τη συμπύκνωση του σκυροδέματος.

3.3. Μέθοδοι Καμπτικής Ενίσχυσης Δοκών

3.3.1. Ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers – FRP)

3.3.1.1. Περιγραφή της μεθόδου

Τα σύνθετα υλικά FRP (Fiber Reinforced Polymers) έχουν προκύψει ως μια νέα τεχνολογία δομικών ενισχύσεων ως απάντηση στην αυξανόμενη ανάγκη για επισκευή και ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και αποτελούνται από το συνδυασμό ινών σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά ονομάζονται ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) και χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες που είναι αρκετά χρήσιμες στον τομέα των επισκευών - ενισχύσεων δομικών στοιχείων όπως τα υποστυλώματα, οι δοκοί, τα δάπεδα και οι σήραγγες. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος συνίσταται στην επικόλληση τους σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων, με τον κατάλληλο προσανατολισμό ώστε να αναλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται παλιότερα στην παραγωγή ράβδων οπλισμού ή τενόντων προέντασης σκυροδέματος, κατασκευή δεξαμενών και γενικά σε πεδία εφαρμογών όπου η επιλογή υλικών είχε βασικό στόχο την ανθεκτικότητα στη διάρκεια, το χαμηλό βάρος και την υψηλή αντοχή. Στο πεδίο των ενισχύσεων, η χρήση τους είναι αρκετά διαδεδομένη διότι έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ανθεκτικότητα σε διάβρωση
- Χαμηλό βάρος (περίπου ¼ του χάλυβα)
- Υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα)
- Διαθεσιμότητα υλικών σε μεγάλα μήκη
- Μεγάλη ευκαμψία

Συμπεραίνεται εύκολα ότι αυτή η τεχνική ενίσχυσης χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής. Βασικά μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι το υψηλό κόστος των σύνθετων υλικών, η μεγάλη επιρροή από υψηλές θερμοκρασίες και η έλλειψη πλαστιμότητας,

όχι όμως και παραμορφωσιμότητας, η οποία οδηγεί πολλές φορές σε σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας των στοιχείων που ενισχύονται.

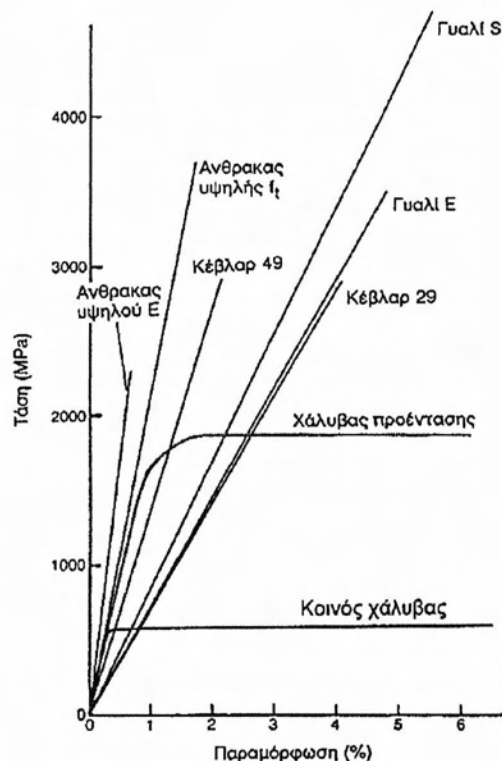
Οι ίνες στα σύνθετα υλικά είναι διαμέτρου $5 \div 25 \mu\text{m}$, αναλαμβάνουν παράλληλα στη διεύθυνση τους σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις, ενώ συμπεριφέρονται γραμμικά μέχρι και τη θραύση τους. Οι βασικοί τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), ίνες γυαλιού (υαλονήματα), και ίνες αραμιδίου. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα τυπικά διαγράμματα εφελκυστικής τάσης - παραμόρφωσης, ενώ στον Πίνακα 3.1 οι ενδεικτικές ιδιότητες του κάθε τύπου (μονοτονική φόρτιση).

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών, η οποία είναι συνήθως ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Η μήτρα συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, εξασφαλίζει τη μεταφορά δυνάμεων σε αυτές και καθορίζει αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Συνήθως επιλέγεται η χρήση εποξειδικής ρητίνης λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών της και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Βέβαια, αποτελεί και τον πιο ακριβό τύπο μήτρας, αλλά σπάνια χρησιμοποιείται πολυεστέρας ή βινυλεστέρας.

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Αθ. Τριανταφύλλου, Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά, 2004)

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
Άνθρακας			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ.	500-700	2100-2400	0.2-0.4
Γυαλί			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Ειδικότερα, η εφαρμογή συνθέτων υλικών FRP για ενισχύσεις δοκών έναντι κάμψης γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων σε μία ή παραπάνω στρώσεις, τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα παράλληλα στον άξονα της δοκού, ώστε να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις λόγω κάμψης.



Σχήμα 3.1. Τυπικά διαγράμματα εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών (Αθ. Τριανταφύλλου, Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά, 2004)

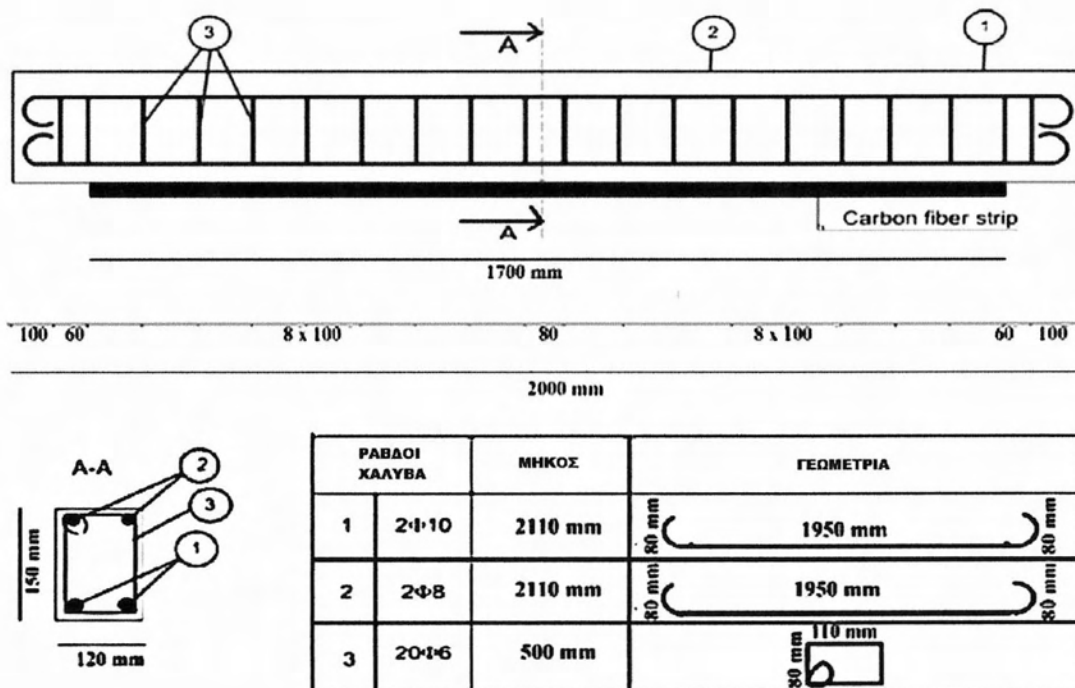
Εκτός από την απλούστερη περίπτωση επικόλλησης υφασμάτων στο εφελκυσμένο πέλμα για την καμπτική ενίσχυση δοκών, εφαρμόζονται και παραλλαγές αυτής της μεθόδου, όπως για παράδειγμα η προένταση των υφασμάτων FRP για την περαιτέρω αύξηση της καμπτικής αντοχής των δοκών.

3.3.1.2. Ενίσχυση με επικόλληση φύλλων από ίνες άνθρακα CFRP (O. Benjeddou, 2005)

Στη δημοσίευση «Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates, 2005» του Omrane Benjeddou και των συνεργατών του, διερευνάται η αποτελεσματικότητα των φύλλων FRP από άνθρακα (CFRP) στη καμπτική συμπεριφορά δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα με βλάβη, τη συνεισφορά τους στην αντοχή και τη δυσκαμψία. Στην εφελκυσμένη παρειά (λόγω της φόρτισης) των δοκών με βλάβη, επικολλήθηκαν φύλλα FRP με ίνες άνθρακα. Η παράμετρος που διερευνήθηκε περισσότερο στα συγκεκριμένα πειράματα ήταν το μέγεθος της βλάβης (ο λόγος του φορτίου που εφαρμόστηκε στη δοκό προς το φορτίο της καμπτικής αστοχίας), ο οποίος ήταν 0%, 80%, 90% και 100%. Για να διερευνηθεί η επιρροή της γεωμετρίας των φύλλων CFRP στη μηχανική συμπεριφορά των δοκών, σε κάποιες δοκούς

εφαρμόστηκε διαφορετικό πλάτος φύλλων, 50 mm και 100 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη σκυροδέματος, ένα κανονικής θλιπτικής αντοχής (38 MPa) και ένα χαμηλής θλιπτικής αντοχής (21 MPa).

Σκυροδετήθηκαν συνολικά 8 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος με ίδιες διαστάσεις διατομής, ίδιο διαμήκη οπλισμό και διάταξη συνδετήρων. Οι διαστάσεις τους ήταν πλάτος 0,12 m, ύψος 0,15 m, και μήκος 2 m. Το άνοιγμα των δοκών ήταν 1,80 m, ενώ το μήκος των φύλλων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1,70 m. Ο μέγιστος κόκκος αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στη σκυροδέτηση ήταν 16 mm. Για όλες τις δοκούς τοποθετήθηκαν 2 διαμήκεις ράβδοι οπλισμού Ø10 στην εφελκυσόμενη και 2 ράβδοι Ø8 στη θλιβόμενη παρειά, από χάλυβα χαρακτηριστικής εφελκυστικής αντοχής 400 MPa και μέτρου ελαστικότητας 200 GPa. Οι συνδετήρες είχαν διάμετρο Ø6 και η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα ήταν 235 MPa και το μέτρο ελαστικότητας 200 GPa. Ως ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν φύλλα από ίνες άνθρακα μίας διεύθυνσης με εποξειδική ρητίνη. Όλες οι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων και σχεδιάστηκαν υπεροπλισμένες έναντι τέμνουσας για την αποφυγή διατμητικής αστοχίας.



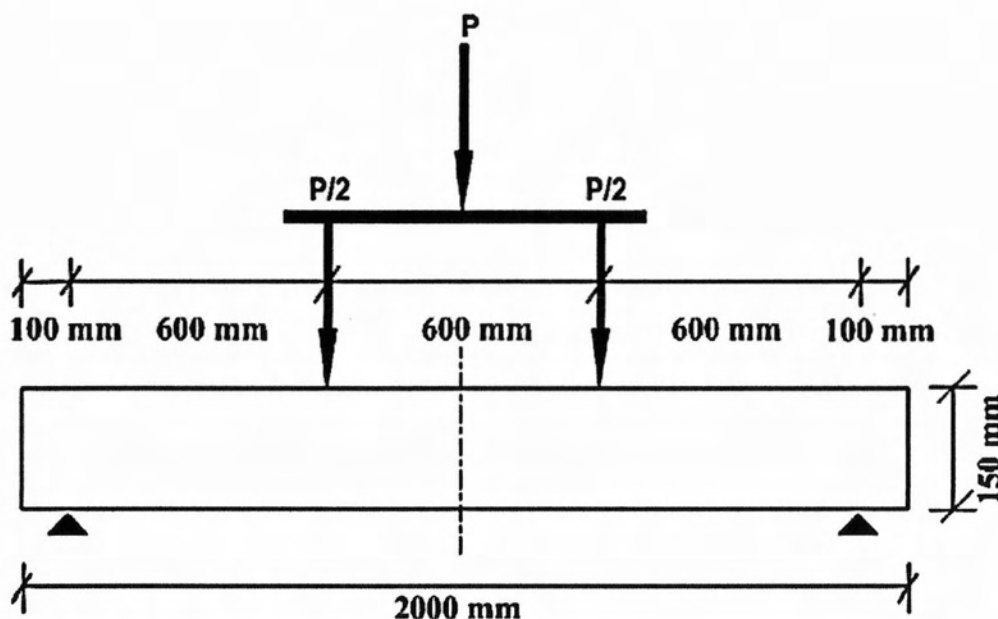
Σχήμα 3.2. Λεπτομέρειες των δοκών (O. Benjeddou, 2005)

Μετά από 28 μέρες ωρίμανσης του σκυροδέματος, προκλήθηκε βλάβη στις 6 δοκούς σε διαφορετικό βαθμό. Έπειτα αυτές οι δοκοί ενισχύθηκαν με φύλλα CFRP μίας διεύθυνσης. Στις 5 δοκούς, τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πλάτος 100 mm ενώ σε μία δοκό είχαν πλάτος 50 mm. Το πάχος όλων των φύλλων ήταν 1,2 mm.

Γνωρίζοντας την τιμή του φορτίου καμπτικής αστοχίας της δοκού αναφοράς (F), υπολογίστηκε το μέγεθος της βλάβης (D) εφαρμόζοντας το επιθυμητό φορτίο (P). Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$D = \frac{P}{F} (\%)$$

Δύο δοκοί χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς (χωρίς φύλλα CFRP), ενώ μία δοκός ενισχύθηκε με επικόλληση φύλλων CFRP στην παρειά της δοκού που εφελκύεται λόγω της φόρτισης με χρήση εποξειδικής ρητίνης, χωρίς να προκληθεί βλάβη ($D = 0\%$). Στις υπόλοιπες δοκούς προκλήθηκε βλάβη πρώτα και μετά ενισχύθηκαν με διαφορετικά ποσά φύλλων CFRP, τροποποιώντας το μέγεθος βλάβης, το πλάτος φύλλων και την αντοχή σκυροδέματος.



Σχήμα 3.3. Πειραματική διάταξη (O. Benjeddou, 2005)

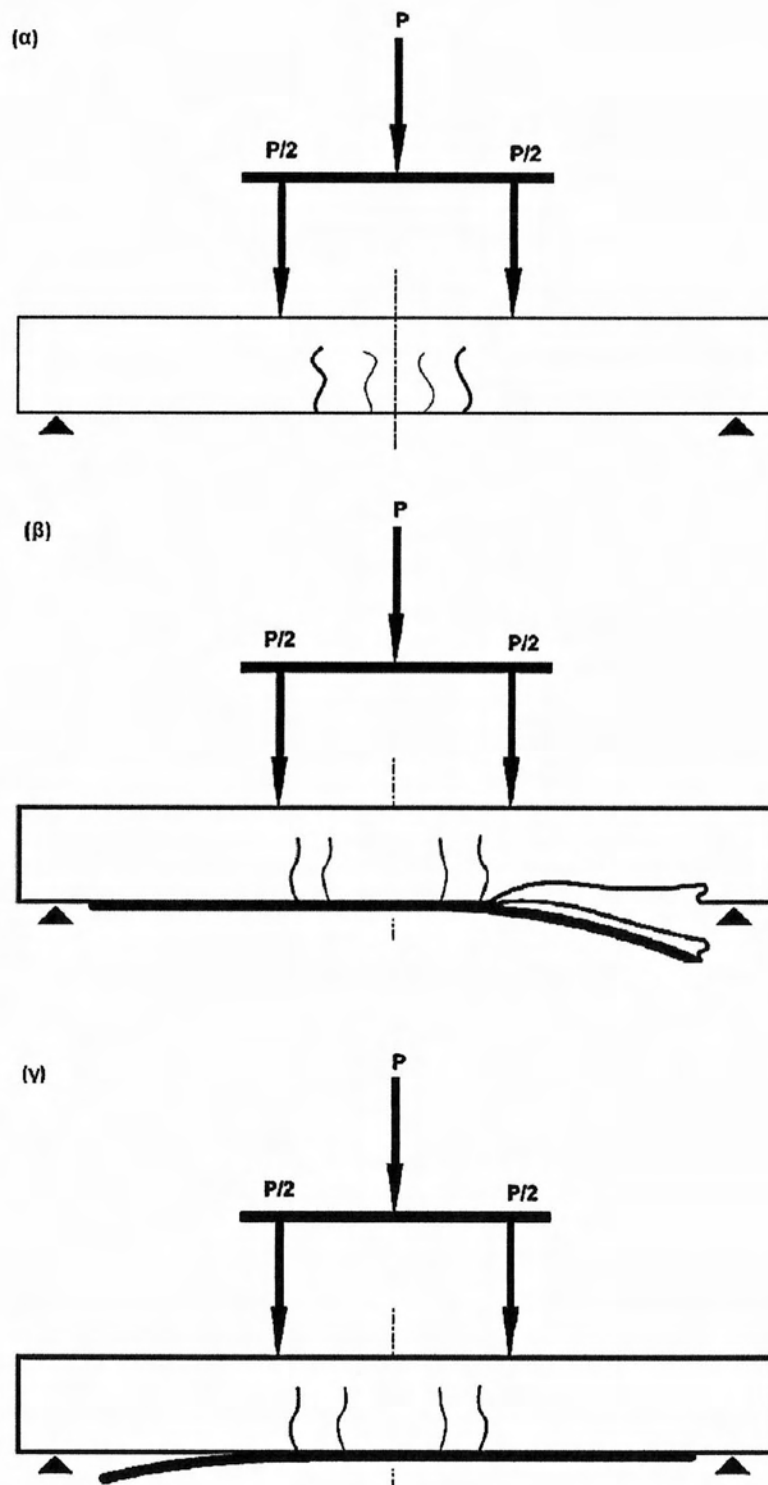
Μετά τη φόρτιση έως το επιθυμητό μέγεθος βλάβης, οι δοκοί αποφορτίστηκαν. Οι δοκοί στις οποίες προκλήθηκε μέγεθος βλάβης $D = 80\%$, παρέμειναν στην ελαστική περιοχή χωρίς τη δημιουργία ρωγμών. Στις δοκούς με βλάβη $D = 90\%$, εμφανίστηκαν δύο ρωγμές και βέλος κάμψης περίπου 1,8 mm (πλαστική περιοχή), ενώ στις δοκούς με βλάβη $D = 100\%$, εμφανίστηκαν περισσότερες ρωγμές και βέλος κάμψης 10,5 mm.

Όλες οι ρωγμές και η καμπύλωση των δοκών δεν αποκαταστάθηκαν, όμως τα αποδιοργανωμένα κομμάτια σκυροδέματος απομακρύνθηκαν και η επιφάνεια της δοκού εκτραχύνθηκε με συρμάτινη βούρτσα και μετά έγινε η εφαρμογή των φύλλων CFRP.

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά των δοκών που εξετάστηκαν (O. Benjeddou, 2005)

Όνομα Δοκού	Θλιπτική Αντοχή 28 ημερών	Περιγραφή	Μέγεθος Βλάβης (%)	Πλάτος φύλλου CFRP (mm)
CB1	21	Δοκίμιο αναφοράς	-	-
CB2	38	Δοκίμιο αναφοράς	-	-
RB1	21	Ενίσχυση	0	100
RB2	21	Επισκευή	80	100
RB3	21	Επισκευή	90	100
RB4	21	Επισκευή	100	100
RB5	21	Επισκευή	90	50
RB6	38	Επισκευή	90	100

Η αστοχία των δοκών αναφοράς προήλθε λόγω διαρροής του οπλισμού χάλυβα, δίνοντας μεγάλο βέλος κάμψης. Αυτός ο τρόπος αστοχίας χαρακτηρίζεται από δύο ρωγμές που εμφανίστηκαν κάτω από τα δύο σημεία εφαρμογής του φορτίου και ακολούθησαν μικρορωγμές ανάμεσα τους. Για όλες τις επισκευασμένες δοκούς παρατηρήθηκαν δύο τρόποι αστοχίας: η αποκόλληση και η αστοχία της διεπιφάνειας. Σε καμία δοκό δεν αστόχησαν τα φύλλα CFRP. Η αποκόλληση εμφανίστηκε σε όλες τις δοκούς με φύλλα πλάτους 100 mm ενώ η αστοχία της διεπιφάνειας στις δοκούς με φύλλα πλάτους 50 mm. Από αυτά συμπεραίνεται ότι το πλάτος των φύλλων επηρεάζει τον τρόπο αστοχίας των επισκευασμένων δοκών. Για την περίπτωση των φύλλων μεγαλύτερου πλάτους, η αστοχία λόγω αποκόλλησης εξηγείται από το γεγονός ότι η επαφή μεταξύ του φύλλου και του σκυροδέματος είναι αρκετά ισχυρή ώστε να μην αστοχεί η διεπιφάνεια, ενώ για τα φύλλα μικρότερου πλάτους η επαφή αυτή δεν επιτρέπει καλή συνάφεια.

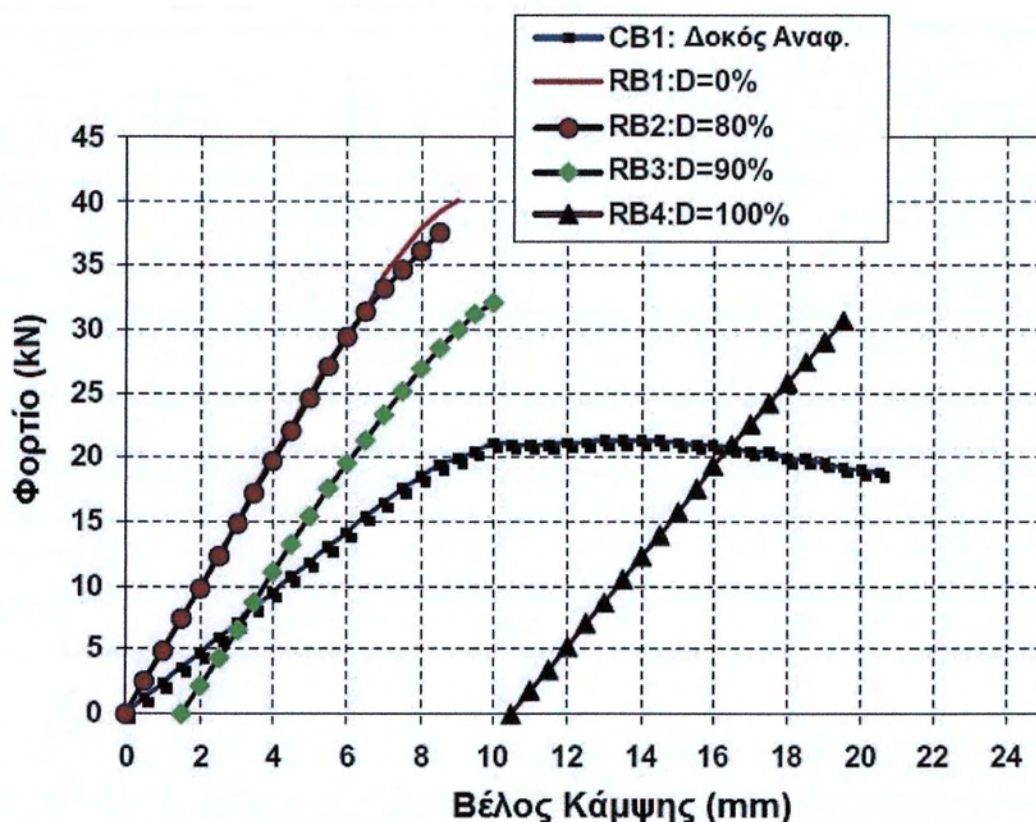


Σχήμα 3.4. α) Αστοχία των δοκών αναφοράς, β) Αστοχία των ενισχυμένων δοκών λόγω αποκόλλησης, γ) Αστοχία των ενισχυμένων δοκών λόγω αστοχίας της διεπιφάνειας (O. Benjeddou, 2005)

Όπως προαναφέρεται, για τις δοκούς αναφοράς η αστοχία προήλθε λόγω διαρροής του οπλισμού χάλυβα. Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλαστική περιοχή με σημαντική πλαστιμότητα. Για τις επισκευασμένες δοκούς όμως, η αστοχία ήταν ψαθυρή λόγω της απόλυτης ελαστικής συμπεριφοράς των φύλλων CFRP. Συνεπώς, η πλαστιμότητα των επισκευασμένων δοκών είναι μικρότερη από αυτή των δοκών αναφοράς.

Μία δοκός αναφοράς CB1 (Control Beam 1) και άλλες τέσσερις δοκοί δοκιμάστηκαν: RB1 (μέγεθος βλάβης $D=0\%$), RB2 (μέγεθος βλάβης $D=80\%$), RB3 (μέγεθος βλάβης $D=90\%$) και RB4 (μέγεθος βλάβης $D=100\%$) και μετά επισκευάστηκαν με φύλλα CFRP μήκους 1,70m και πλάτους 100 mm. Η συνεισφορά στο φορτίο αστοχίας είναι ο λόγος του φορτίου αστοχίας της επισκευασμένης δοκού προς το αντίστοιχο της δοκού αναφοράς. Αντίστοιχα, η συνεισφορά στη δυσκαμψία είναι ο λόγος της δυσκαμψίας της επισκευασμένης δοκού προς την αντίστοιχη της δοκού αναφοράς (ως δυσκαμψία λαμβάνεται ο λόγος του ελαστικού ορίου προς το αντίστοιχο βέλος κάμψης).

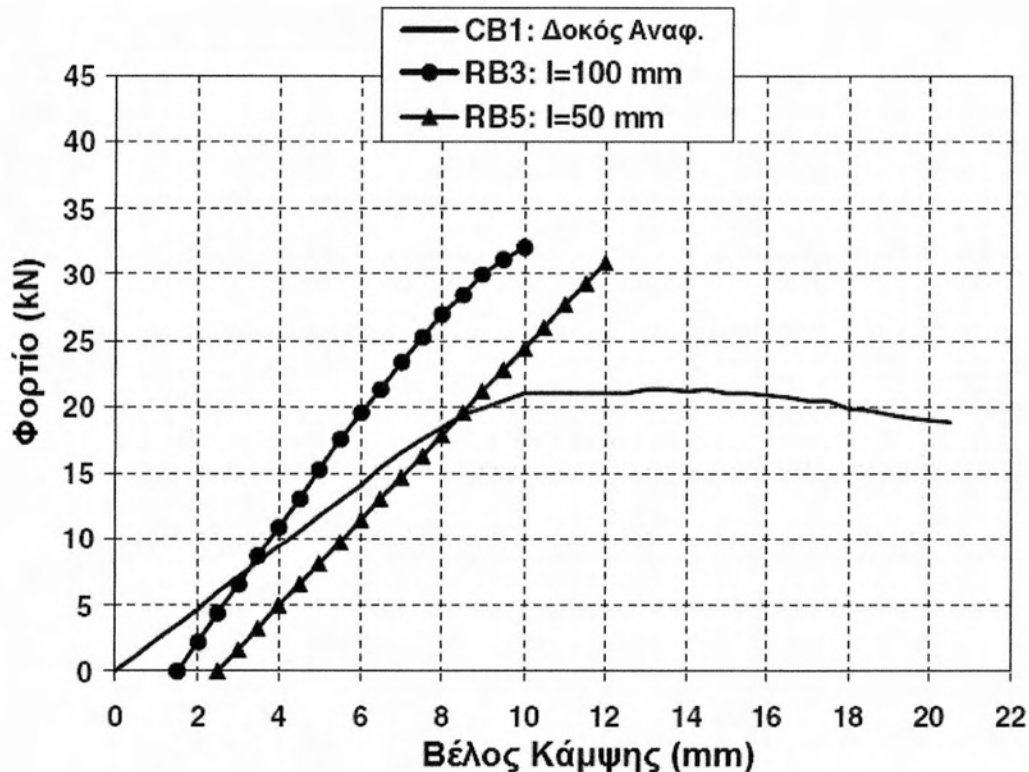
Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει ότι όλες οι επισκευασμένες δοκοί έχουν καλύτερη μηχανική συμπεριφορά σε όρους φορτίου αστοχίας και δυσκαμψίας. Το φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 87% στη δοκό RB1 και κατά 44% στη δοκό RB4 σε σχέση με τη δοκό αναφοράς CB1. Συγκρίνοντας τις ίδιες δοκούς, η δυσκαμψία αυξήθηκε κατά δύο φορές στη δοκό RB1 και κατά 47% στη δοκό RB4 αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι για οποιοδήποτε βαθμό βλάβης, τα φύλλα CFRP παρέχουν υψηλότερες μηχανικές επιδόσεις στις επισκευασμένες δοκούς. Αυτή η παρατήρηση προκύπτει και από το Σχήμα 3.5, που παρουσιάζονται το φορτίο αστοχίας σε σχέση με το μέγεθος της βλάβης. Παρόλο που η δοκός RB4 καταστράφηκε εντελώς, η συνεισφορά των φύλλων CFRP στο φορτίο αστοχίας (144%) και στη δυσκαμψία (147%) είναι πολύ σημαντική. Παρατηρείται επίσης, ότι οι δοκοί RB1 και RB2 έχουν παρόμοια φορτία αστοχίας ($RB1 = 40,1 \text{ kN}$, $RB2 = 37,7 \text{ kN}$) και παρόμοια δυσκαμψία ($RB1 = 4,85 \text{ kN/mm}$, $RB2 = 4,88 \text{ kN/mm}$), αφού στη δοκό RB1 δεν προκλήθηκε βλάβη ($D = 0\%$) και η δοκός RB2 παρέμεινε στην ελαστική περιοχή, οπότε οι δύο δοκοί έχουν ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά πριν την εφαρμογή της ενίσχυσης. Επίσης σημειώνεται ότι η συμπεριφορά των επισκευασμένων δοκών άλλαξε από ελαστοπλαστική σε ελαστική. Όσον αφορά τις υπόλοιπες δοκούς συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο και εμφάνισαν υψηλότερη απόδοση σε όρους φορτίου αστοχίας και δυσκαμψίας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι για οποιοδήποτε μέγεθος βλάβης, η επισκευή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με την επικόλληση φύλλων CFRP είναι αποτελεσματική και η απόδοση των επισκευασμένων δοκών οφείλεται κυρίως στα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά των φύλλων CFRP.



Σχήμα 3.5. Διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης (O. Benjeddou, 2005)

Επιρροή του πλάτους των φύλλων

Για την παρατήρηση της επιρροής του πλάτους των φύλλων από ίνες άνθρακα στο φορτίο αστοχίας και τη δυσκαμψία των επισκευασμένων δοκών, δύο παρόμοιες δοκοί βλάφθηκαν και επισκευάστηκαν με διαφορετικό πλάτος φύλλων: η δοκός RB3 ($b_{FRP} = 100$ mm περίπου το 83% του συνολικού πλάτους της δοκού) και η δοκός RB5 ($b_{FRP} = 50$ mm περίπου το 42% του συνολικού πλάτους της δοκού). Αρχικά παρατηρήθηκε ότι το πλάτος των φύλλων επηρεάζει τον τρόπο αστοχίας, από αστοχία της διεπιφάνειας σε αποκόλληση όταν το πλάτος αυξάνεται από 50 σε 100 mm. Τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Τα φορτία αστοχίας είναι $RB3 = 32,1$ kN και $RB5 = 30,1$ kN. Η δυσκαμψία για τις δύο δοκούς είναι $RB3 = 4,4$ kN/mm και $RB5 = 3,2$ kN/mm αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι και για τις δύο περιπτώσεις η συμπεριφορά των επισκευασμένων δοκών είναι καλύτερη από εκείνη της δοκού αναφοράς (φορτίο αστοχίας $CB1 = 21,4$ kN και δυσκαμψία $CB1 = 2,4$ kN/mm). Επίσης σημειώνεται ότι η αύξηση του πλάτους των φύλλων απέφερε και μια μικρή αύξηση του φορτίου αστοχίας (από 140% για τη δοκό RB5 σε 150% για τη δοκό RB3) αλλά και μια σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας (από 137% για τη δοκό RB5 σε 189% για τη δοκό RB3). Συνεπώς, για την αύξηση του φορτίου αστοχίας, η εφαρμογή φύλλων CFRP με πλάτος περίπου το μισό του συνολικού πλάτους της δοκού κρίνεται ικανοποιητική. Σε περίπτωση που προκύψει αστοχία της διεπιφάνειας, είναι εφικτή η αντικατάσταση των φύλλων CFRP.



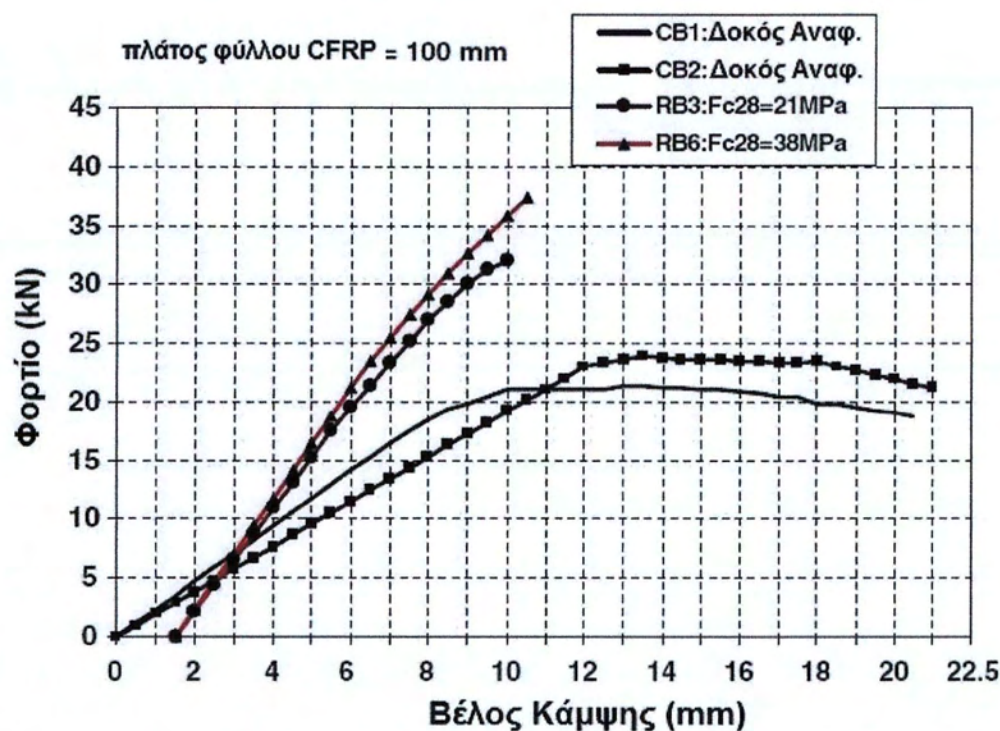
Σχήμα 3.6. Διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης των δοκών με διαφορετικό πλάτος φύλλων CFRP (O. Benjeddou, 2005)

Επιρροή της αντοχής του σκυροδέματος

Για τη διερεύνηση της επιρροής της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στο φορτίο αστοχίας και στη δυσκαμψία, δοκιμάστηκαν τέσσερις δοκοί. Οι δοκοί CB1 και RB3 αποτελούνταν από σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής C21, ενώ οι δοκοί CB2 και RB6 από σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής C38. Οι δοκοί CB1 και CB2 χρησιμοποιήθηκαν ως δοκοί αναφοράς και οι δοκοί RB3 και RB6 βλάφθηκαν (μέγεθος βλάβης 90%) και μετά επισκευάστηκαν με φύλλα CFRP μήκους 1,70 m και πλάτους 100 mm. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

Παρατηρείται ότι η μηχανική συμπεριφορά των δύο επισκευασμένων δοκών όσον αφορά το φορτίο αστοχίας και τη δυσκαμψία είναι καλύτερη από την αντίστοιχη των δοκών αναφοράς. Για το σκυρόδεμα C21, το φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 50% και η δυσκαμψία κατά 89% στη δοκό RB3 συγκριτικά με τη CB1. Για το σκυρόδεμα C38, το φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 56% και η δυσκαμψία κατά 189% στη δοκό RB6 σε σχέση με τη δοκό CB2. Επισημαίνεται ότι οι δύο επισκευασμένες δοκοί έχουν την ίδια δυσκαμψία παρόλο που αποτελούνται από σκυροδέματα διαφορετικής αντοχής, οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι η δυσκαμψία των δοκών εξαρτάται αποκλειστικά από τα φύλλα CFRP. Η διαφορά που παρατηρείται στο φορτίο αστοχίας των δοκών RB3 και RB6 οφείλεται στην αυξημένη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Για οποιαδήποτε τιμή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, τα φύλλα

CFRP προσθέτουν επιπλέον περίπου το μισό φορτίο αστοχίας. Τα φύλλα CFRP τελικά ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στη μηχανική συμπεριφορά των επισκευασμένων δοκών από ότι οι ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα.



Σχήμα 3.7. Διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης των δοκών με σκυρόδεμα διαφορετικής αντοχής (Ο. Benjeddou, 2005)

Πίνακας 3.3. Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων (Ο. Benjeddou, 2005)

Όνομα Δοκού	Φορτίο αστοχίας (kN)	Βέλος κάμψης στην αστοχία (mm)	Συνεισφορά στο φορτίο αστοχίας (%)	Δυσκαμψία	Συνεισφορά στη δυσκαμψία (%)	Τρόπος αστοχίας
CB1	21,4	12,86	-	2,35	-	Διαρροή χάλυβα
CB2	23,9	13,50	-	1,82	-	Διαρροή χάλυβα
RB1	40,1	9,02	187	4,85	206	Αποκόλληση
RB2	37,7	8,65	176	4,88	207	Αποκόλληση
RB3	32,1	9,87	150	4,45	189	Αποκόλληση
RB4	30,8	19,5	144	3,45	147	Αποκόλληση
RB5	30,1	13,5	140	3,23	137	Αστοχία Διεπιφάνειας
RB6	37,4	10,5	156	4,72	289	Αποκόλληση

3.3.2. Επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων στο σκυρόδεμα

Πρόκειται για μια αξιόπιστη μέθοδο επέμβασης, η οποία με την πάροδο του χρόνου οδήγησε στη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) που αντιμετωπίζει επιτυχώς τις αδυναμίες της. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία εφαρμογής και το χαμηλό κόστος. Συγκριτικά με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών όμως, εμφανίζει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι η ευκολία διάβρωσης του χάλυβα, η σχετικά δυσκολότερη εφαρμογή λόγω του μεγάλου βάρους του χάλυβα και η ανάγκη για κατασκευή ενώσεων των ελασμάτων στις περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλα μήκη.

Η επικόλληση γίνεται με εποξειδική ρητίνη στο εφελκυσμένο πέλμα των δοκών. Το έλασμα είναι από ανοξείδωτο και λεπτό φύλλο χάλυβα πάχους συνήθως $1 \div 1,5$ mm και με όριο διαρροής που κυμαίνεται από $240 \div 400$ MPa.

Βασική επιδίωξη της μεθόδου αυτής είναι το στοιχείο που ενισχύεται να παρουσιάσει καμπτική αστοχία ανάλογη με αυτή των συμβατικών δοκών εξαντλώντας την αντοχή του σε κάμψη. Το επικολλητό έλασμα πρέπει να παραμορφώνεται παράλληλα με το εφελκυσμένο πέλμα της δοκού, παρουσιάζοντας όλκιμη συμπεριφορά όπως και οι εσωτερικοί ράβδοι οπλισμού, ενώ οι ρωγμές που θα εμφανιστούν πρέπει να είναι κατακόρυφες και καμπτικές. Η αστοχία της διεπιφάνειας ελάσματος - δοκού εμφανίζεται με δυο μορφές: διατμητική και καμπτική απόσχιση. Αυτή η μορφή αστοχίας, δηλαδή η αποκόλληση του ελάσματος από τη δοκό θεωρείται ανεπιθύμητη και πρέπει να αποφεύγεται καθώς στόχος είναι η μονολιθική συμπεριφορά του στοιχείου.

3.3.3. Κατασκευή μανδύα

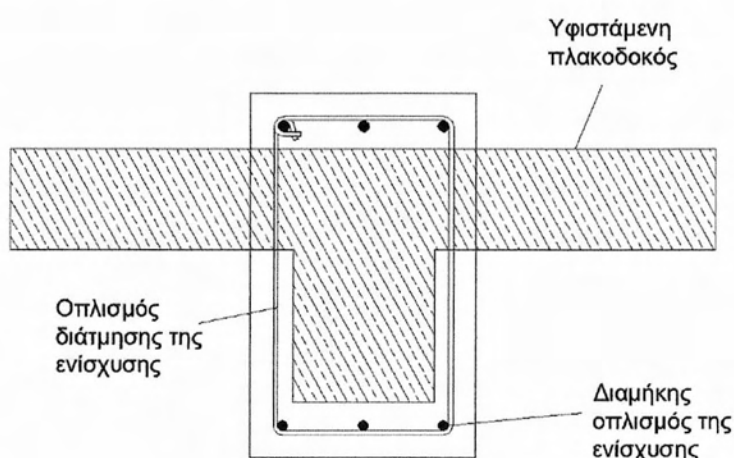
3.3.3.1. Περιγραφή της μεθόδου

Η κατασκευή μανδύα από σκυρόδεμα βελτιώνει την αντίσταση σε σεισμικά φορτία, αυξάνει την αντοχή του στοιχείου και μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα είδη κατασκευών, όπως σε σπίτια, σε βιομηχανικά κτίρια ακόμα και σε γέφυρες που μπορεί να έχουν υποστεί βλάβες λόγω σεισμών. Στις περισσότερες εφαρμογές για την κατασκευή μανδύα σε δοκούς Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ο/Σ) χρησιμοποιείται σκυρόδεμα, το οποίο τοποθετείται στους ξυλότυπους μαζί με τους επιπρόσθετους οπλισμούς γύρω από τη δοκό, ενώ έχει προηγηθεί εκτράχυνση της επιφάνειας της δοκού.

Οι μανδύες σκυροδέματος μπορούν να κατασκευαστούν στη μία, στις τρεις ή στις τέσσερις πλευρές της δοκού. Μανδύες στην κάτω παρειά της δοκού χρησιμεύουν μόνο για την αύξηση της καμπτικής της ικανότητας. Μανδύες στις τρεις πλευρές της δοκού χρησιμεύουν για την αύξηση της καμπτικής και της διατμητικής ικανότητας της δοκού σε κατακόρυφα φορτία, όχι όμως και για σεισμική δράση. Μανδύες και στις τέσσερις πλευρές της δοκού είναι η πλέον αποτελεσματική λύση (Σχήμα 3.8). Η επάνω στρώση σκυροδέματος κατασκευάζεται με τέτοιο πάχος ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στο δάπεδο (περίπου $5 \div 7$ cm). Η διέλευση των

συνδετήρων γίνεται από οπές που διανοίγονται στην πλάκα ανά πυκνές σχετικά αποστάσεις, οι οποίες χρησιμεύουν και στη σκυροδέτηση. Οι διαμήκεις οπλισμοί του μανδύα συγκολλούνται με αυτούς του παλιού σκυροδέματος. Επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα σκυροδέτησης από πάνω μέσα σε ξυλότυπο, η μόνη ρεαλιστική μέθοδος κατασκευής μανδύα είναι με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Προς επίτευξη συνεργασίας παλιού και νέου σκυροδέματος απαιτείται τόσο εκτράχυνση της επιφάνειας του παλιού σκυροδέματος, όσο και συγκόλληση παρεμβλημάτων ανάμεσα στους παλιούς και στους νέους οπλισμούς.



Σχήμα 3.8. Συνήθης διάταξη ενίσχυσης σε υφιστάμενη πλακοδοκό

Η διαδικασία της κατασκευής μανδύα περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες:

- Αποφόρτιση και υποσύλωση πλακών και δοκών
- Απομάκρυνση αποδιοργανωμένου σκυροδέματος και αποκατάσταση τυχόν βλαβών (π.χ. λυγισμένες ράβδοι οπλισμού)
- Διάνοιξη οπών στις θέσεις που προβλέπονται βλήτρα
- Καθαρισμός επιφάνειας με αέρα υπό πίεση
- Αγκύρωση των νέων διαμήκων ράβδων οπλισμού
- Αγκύρωση βλήτρων
- Τοποθέτηση νέων συνδετήρων (δημιουργία οπών στην πλάκα)
- Τελικός καθαρισμός επιφανειών με αέρα και νερό υπό πίεση
- Διαβροχή της επιφάνειας του παλαιού σκυροδέματος τουλάχιστον 6 ώρες πριν τη σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος μανδύα
- Μέτρα συντήρησης

3.3.3.2. Ενίσχυση με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος (F. Altun, 2004)

Το 2004 δημοσιεύτηκε η πειραματική μελέτη του Fatih Altun «An experimental study of the jacketed reinforced-concrete beams under bending», στόχος της οποίας ήταν να προσδιοριστούν πειραματικά και να συγκριθούν οι μηχανικές ιδιότητες των δοκών Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ο/Σ) σε καθαρή κάμψη, πριν και μετά την εφαρμογή του μανδύα, όπως το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, το μέγιστο φορτίο, η πλαστιμότητα και η δυσθραυστότητα.

Όλες οι δοκοί είχαν ορθογωνική διατομή, κατασκευάστηκαν με σκυρόδεμα αντοχής C20 και διατηρήθηκαν νωπές σε θερμοκρασία δωματίου για 28 μέρες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δοκιμάστηκαν 9 δοκοί Ο/Σ, τριών διαφορετικών ομάδων με διαστάσεις 15x15x200cm, 20x15x200cm και 20x20x200cm αντίστοιχα, οι οποίες κατασκευάστηκαν υπο-οπλισμένες και υποβλήθηκαν σε καθαρή κάμψη μέχρι την πλαστική διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού. Έπειτα το εξωτερικό τμήμα μέχρι το σημείο των συνδετήρων αποκόπηκε και οι αρχικές διαστάσεις των διατομών των δοκών που ήταν 15x15cm, 20x15cm και 20x20cm, απέμειναν περίπου 13x13cm, 18x13cm και 18x18cm αντίστοιχα, περισφιγμένες από τους αρχικούς συνδετήρες. Επειδή η φόρτιση των δοκών σταμάτησε μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού και δεν συνεχίστηκε μέχρι την πλήρη διάρρηξη των ράβδων, το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη περιοχή των δοκών ήταν σε καλή κατάσταση και οι ράβδοι χάλυβα ήταν στη θέση τους, έχοντας όμως υποστεί κάποια μόνιμη επιμήκυνση. Συνεπώς, οι αρχικές δοκοί είχαν μια μη-αμελητέα συνεισφορά στην απόδοση των ενισχυμένων δοκών, η οποία ήταν εμφανής από το καταγεγραμμένο φορτίο, το βέλος κάμψης και την παρατήρηση των ρωγμών.

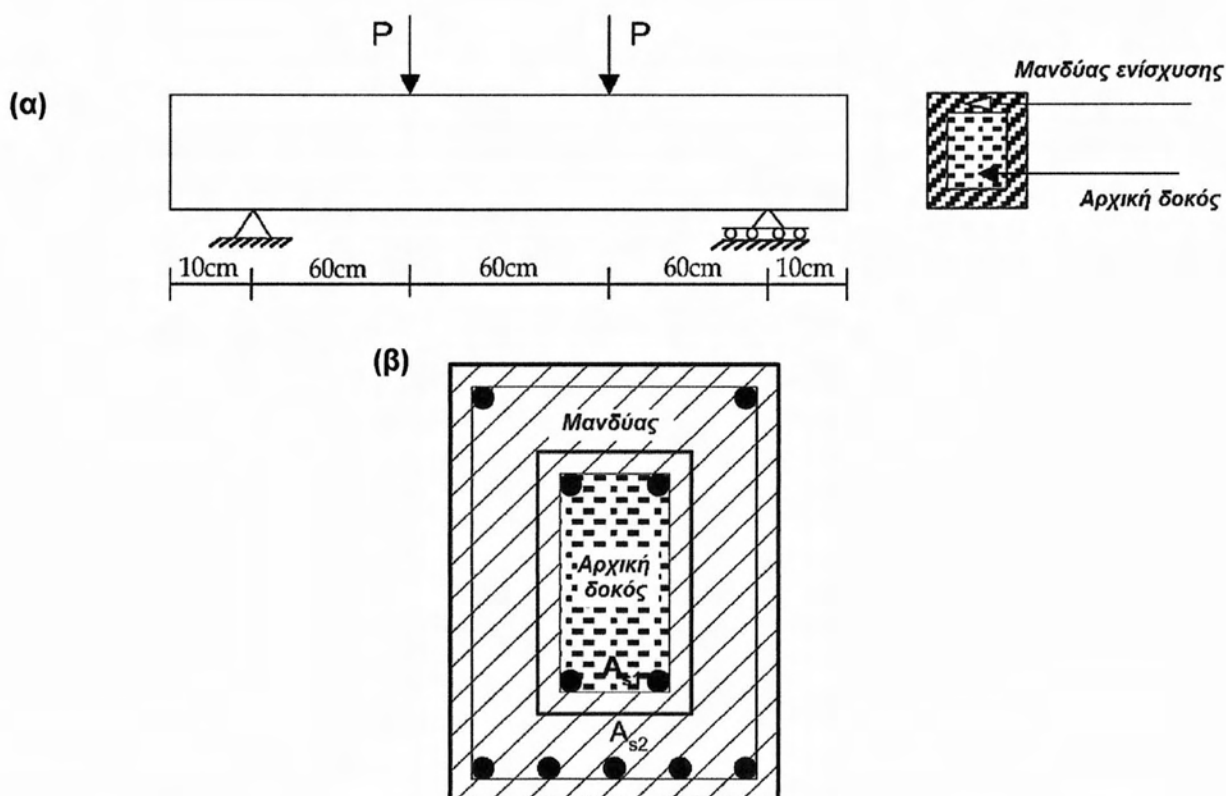
Το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού της ενίσχυσης (δηλαδή του μανδύα) αλλά και του οπλισμού διάτμησης καθορίστηκαν και πάλι ώστε οι διατομές να είναι υπο-οπλισμένες, αμελώντας αυτούς των αρχικών δοκών. Το πάχος του μανδύα ήταν 10 cm. Σε πραγματικές κατασκευές, για την ενίσχυση δοκών Ο/Σ που έχουν υποστεί βλάβη από σεισμό, μια κοινή πρακτική είναι η επιλογή μανδύα πάχους 10 cm και αυτός ήταν ο καθοριστικός παράγοντας της επιλογής του συγκεκριμένου πάχους. Για την όσο το δυνατόν διατήρηση της ομοιομορφίας, οι παλιοί και οι νέοι οπλισμοί συγκολλήθηκαν με ράβδους σχήματος Z, διαμέτρου Ø8 και ανά απόσταση 40 cm (Ø8/40).

Στους Πίνακες 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και των οπλισμών των αρχικών και των ενισχυμένων δοκών. Στον Πίνακα 3.5 αναγράφεται ότι ο οπλισμός του μανδύα ενίσχυσης ήταν 4Ø2 και 5Ø2 αντίστοιχα, το οποίο δεν φαίνεται λογικό και οφείλεται πιθανόν σε τυπογραφικό λάθος. Στη δημοσίευση αναφέρεται ότι το ποσοστό οπλισμού ήταν σταθερό και περίπου $\rho = 0,005$ και για τις αρχικές και για τις ενισχυμένες δοκούς, οπότε προκύπτει ότι οι ράβδοι οπλισμού της ενίσχυσης ήταν διαμέτρου Ø12 και όχι Ø2, κάτι που είναι προφανές και από το Σχήμα 3.10.

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά σκυροδέματος και οπλισμών των αρχικών δοκών (F. Altun, 2004)

Αριθμός Δοκιμίων	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος		Εφελκυστική αντοχή χάλυβα		Εφελκυσμένος Οπλισμός Χάλυβα	Συνδετήρες
	f_{ck} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_{ym} (MPa)		
1 έως 3 (15x15cm)	20	22	420	430	2Ø8	Ø8/10
4 έως 6 (20x15cm)	20	22	420	430	3Ø8	Ø8/10
7 έως 9 (20x20cm)	20	22	420	430	3Ø8	Ø8/10

όπου : f_{ck} = Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 f_{cm} = Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 f_{yk} = Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή χάλυβα
 f_{ym} = Μέση εφελκυστική αντοχή χάλυβα



Σχήμα 3.9. (α) Διαστάσεις και διάταξη φόρτισης, (β) Διατομή ενισχυμένης δοκού (F. Altun, 2004)



Σχήμα 3.10. Τοποθέτηση των οπλισμών της ενίσχυσης γύρω από τους πυρήνες των αρχικών δοκών με βλάβη και συγκόλληση των οπλισμών με ράβδους οπλισμού σχήματος Z (F. Altun, 2004)

Πίνακας 3.5. Χαρακτηριστικά σκυροδέματος και οπλισμών της ενίσχυσης (F. Altun, 2004)

Αριθμός Δοκιμίων	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος		Εφελκυστική αντοχή χάλυβα		Εφελκυσμένος Οπλισμός Χάλυβα	Συνδετήρες
	f_{ck} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_{ym} (MPa)		
10 έως 12 (35x35cm)	20	23,5	420	435	4Ø2 (4Ø12)	Ø8/10
13 έως 15 (40x35cm)	20	23,5	420	435	5Ø2 (5Ø12)	Ø8/10
16 έως 18 (40x40cm)	20	23,5	420	435	5Ø2 (5Ø12)	Ø8/10

όπου : f_{ck} = Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 f_{cm} = Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 f_{yk} = Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή χάλυβα
 f_{ym} = Μέση εφελκυστική αντοχή χάλυβα

Οι ενισχυμένες δοκοί εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά με τις συνήθεις δοκούς Ο/Σ από την αρχή της φόρτισης μέχρι και την αστοχία. Η πρώτη ρωγμή που παρατηρήθηκε ήταν μια τυπική καμπτική ρωγμή στο μέσο του ανοίγματος, η οποία αναπτύχθηκε σταδιακά σε αναλογία με την αύξηση του φορτίου. Τα ανοίγματα των ρωγμών παρέμειναν μικρά (τριχοειδείς) μέχρι το

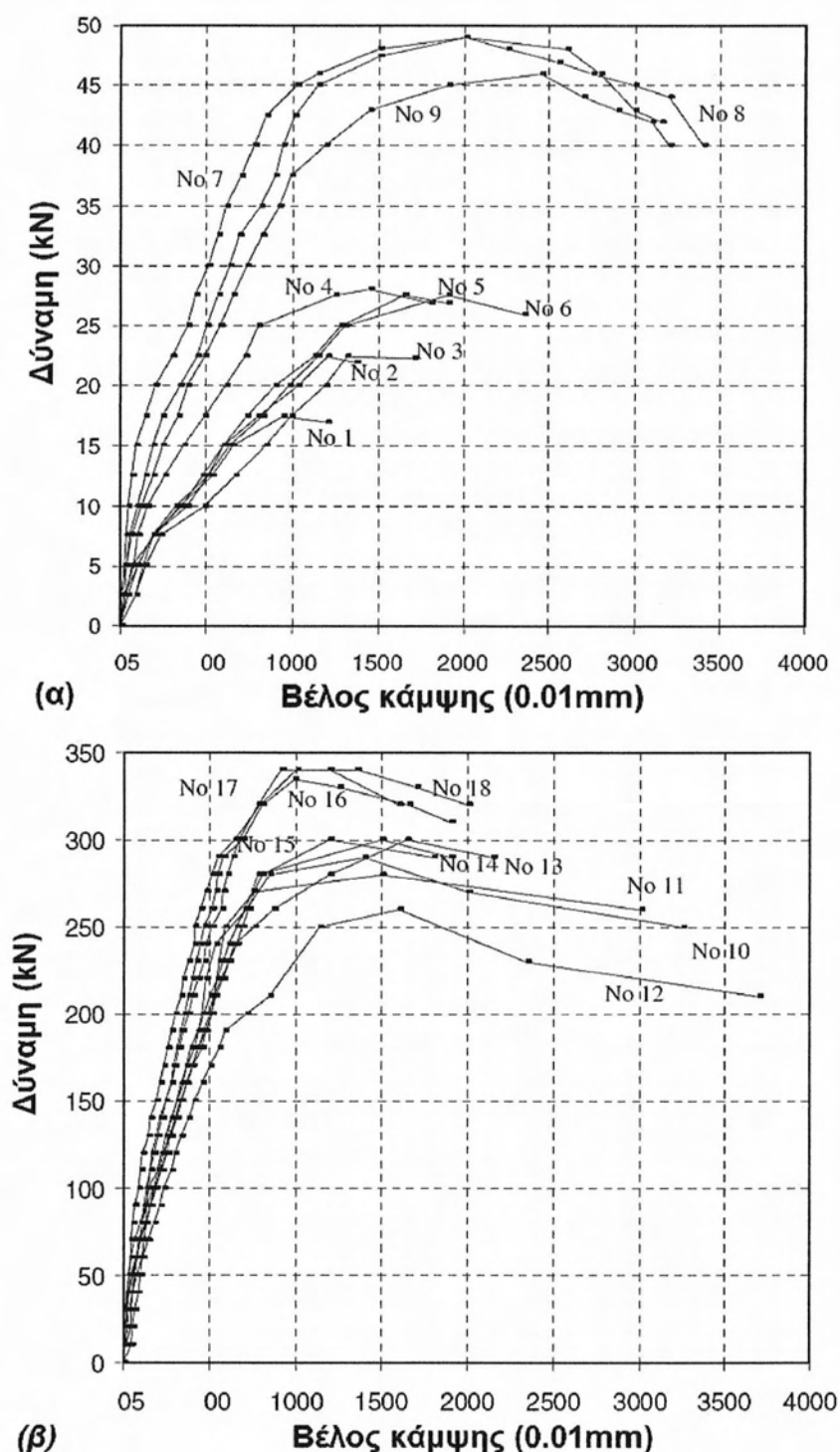
σημείο που αντιστοιχεί στο 50% του φορτίου διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού χάλυβα. Οι κατακόρυφες ρωγμές εμφάνισαν κλίση προς τα σημεία στήριξης και διαδόθηκαν προς την πάνω ίνα της δοκού με την αύξηση του φορτίου. Τη στιγμή που διέρρευσε ο εφελκόμενος οπλισμός παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση του βέλους κάμψης, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 3.11β.

Πίνακας 3.6. Δυσθραυστότητα των αρχικών και των ενισχυμένων με μανδύα δοκών Ο/Σ (F. Altun, 2004)

Αριθμός Δοκιμών	1 έως 3 (15x15cm)	4 έως 6 (20x15cm)	7 έως 9 (20x20cm)	10 έως 12 (35x35cm)	13 έως 15 (40x35cm)	16 έως 18 (40x40cm)
Δυσθραυστότητα (kNmm x 10 ⁻²)	0,23 x10 ⁵	0,42 x10 ⁵	0,86 x10 ⁵	6,52 x10 ⁵	4,26 x10 ⁵	3,44 x10 ⁵

Πίνακας 3.7. Αποτελέσματα δοκιμών των αρχικών δοκών και των ενισχυμένων με μανδύα (F. Altun, 2004)

Αριθμός Δοκιμών	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Φορτίο πρώτης ρωγμής (kN)	Βέλος κάμψης στη διαρροή (mm)	Βέλος κάμψης στην αστοχία (mm)	Δείκτης πλαστιμότητας
1 (15x15)	19,85	18	8,9	18,5	2,08
2 (15x15)	23,25	17,1	8	13,65	1,71
3 (15x15)	23	13,5	9,9	15,8	1,6
4 (20x15)	31,5	16	9,3	13,1	1,41
5 (20x15)	28,05	15	12,8	19	1,48
6 (20x15)	28,45	14,2	13	23,5	1,81
7 (20x20)	39,95	31	19	28,5	1,5
8 (20x20)	40,25	30,5	18	30	1,67
9 (20x20)	40,8	38	15	24,5	1,63
10 (35x35)	262	75	7,1	15	2,11
11 (35x35)	247	78	7,65	16,5	2,16
12 (35x35)	246	86	8,54	17,2	2,01
13 (40x35)	283	104	8,7	21,5	2,47
14 (40x35)	296	110	7,3	20,75	2,84
15 (40x35)	295	105	7,8	20,2	2,59
16 (40x40)	337	98	6,7	12,5	1,86
17 (40x40)	343	108	6,07	12	1,97
18 (40x40)	339	130	6	11,8	1,97



Σχήμα 3.11. Διαγράμματα επιβαλλόμενου φορτίου – βέλους κάμψης: (α) των αρχικών δοκών Ο/Σ, (β) των ενισχυμένων δοκών με μανδύα (F. Altun, 2004)

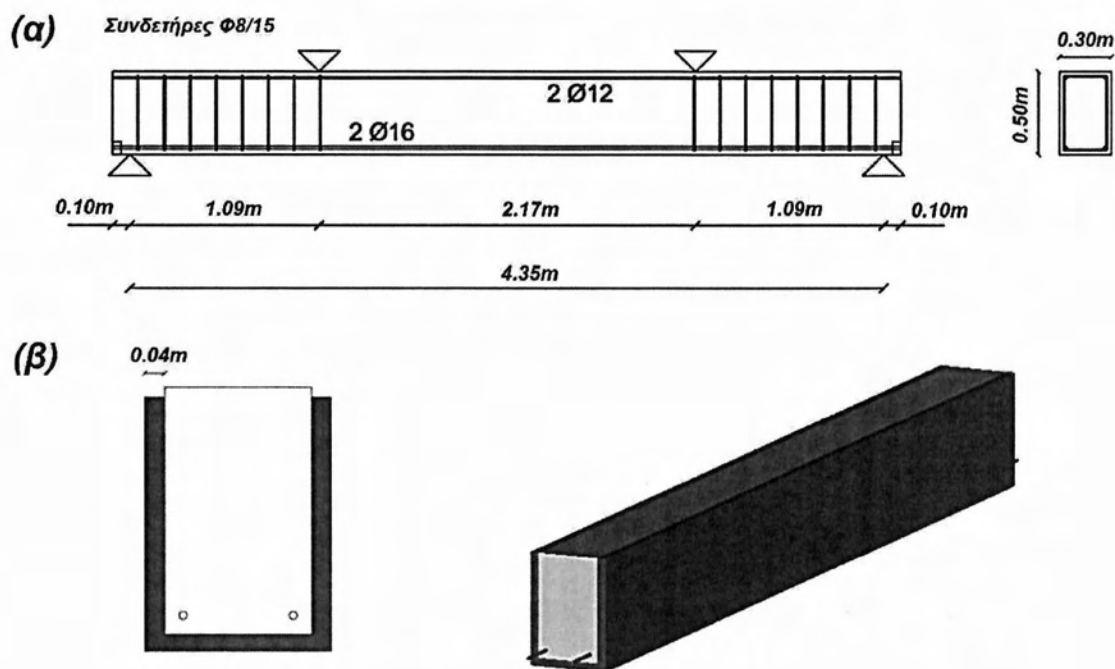
Όπως παρατηρείται και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων στον Πίνακα 3.7, οι ενισχυμένες δοκοί των δυο πρώτων ομάδων δηλαδή διαστάσεων 35x35cm και 40x35cm (15x15cm και 20x15cm πριν την ενίσχυση) παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή, η οποία ήταν 11,5 και 10 φορές η αντίστοιχη των αρχικών, ενώ η αντοχή των δοκών της τρίτης ομάδας

διαστάσεων 40x40cm (20x20cm πριν την ενίσχυση) ήταν 8,4 φορές η αντίστοιχη των αρχικών. Επίσης, οι ενισχυμένες δοκοί εμφάνισαν αυξημένες τιμές δυσθραυστότητας περίπου κατά 28, 10 και 4 φορές αντίστοιχα σε σχέση με τις αρχικές.

Η εκτράχυνση της επιφάνειας των αρχικών δοκών που υπέστησαν βλάβη κατά $4 \div 6$ mm και η συγκόλληση των νέων και των παλιών οπλισμών επιδρούν θετικά στην τελική συμπεριφορά των δοκών. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το αρκετά μεγάλο πάχος του μανδύα (10 cm), είναι αυτό που φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην απόδοση των ενισχυμένων δοκών.

3.3.3.3. Ενίσχυση με μανδύα ινοπλισμένου κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής (G. Martinola et al., 2010)

Στη δημοσίευση «Strengthening and Repair Of RC Beams with Fiber Reinforced Concrete, 2010» των G. Martinola, A. Meda, G.A. Plizzari και Z. Rinaldi διερευνάται πειραματικά η επισκευή και ενίσχυση δοκών Ο/Σ με μανδύα από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερ-υψηλής αντοχής. Οι δοκοί είχαν μήκος 4,55 m, πλάτος 0,30 m και ύψος 0,50 m. Η μία από αυτές ήταν άοπλη (χωρίς διαμήκη οπλισμό και συνδετήρες), ενώ οι άλλες δυο είχαν διαμήκη οπλισμό στην κάτω παρειά 2Ø16, στην πάνω παρειά 2Ø12 και συνδετήρες Ø8/15 στα άκρα τους. Τα άκρα του διαμήκη οπλισμού που τοποθετήθηκαν στην κάτω παρειά αγκυρώθηκαν σε μεταλλική πλάκα ώστε να εξασφαλιστεί καλή αγκύρωση και να αποφευχθεί τυχόν ολίσθηση κατά τη φόρτιση.



Σχήμα 3.12. (α) Γεωμετρία των δοκιμών, (β) Σχεδιάγραμμα της ενίσχυσης (Martinola et al., 2010)

Η κατασκευή των δοκών πραγματοποιήθηκε με σκυρόδεμα κυλινδρικής αντοχής 22 MPa. Από πειραματικές δοκιμές προέκυψε ότι η τάση διαρροής των ράβδων χάλυβα των δοκών Ο/Σ είναι 560 MPa, η εφελκυστική αντοχή τους 680 MPa, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση είναι 10%. Η χαμηλή αντοχή του σκυροδέματος αλλά και το χαμηλό ποσοστό όπλισης (0,3%) επιλέχθηκαν ώστε να προσομοιωθεί μια πραγματική ασθενής δοκός αλλά και να δοθεί έμφαση στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.

Μια από τις δοκούς χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο αναφοράς, ενώ στις άλλες δυο (με και χωρίς οπλισμό) εφαρμόστηκε μανδύας πάχους 4 cm ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12β.

Το υλικό της ενίσχυσης ήταν κονίαμα με μέγιστο μέγεθος αδρανούς 1,3 mm και λόγο νερού/μίγματος (τσιμέντο και πυρίτιο) ίσο με 0,17 του βάρους. Το κονίαμα ήταν ενισχυμένο με 2,5% κατ' όγκο χαλύβδινες μικρο-ίνες μήκους 12 mm και διαμέτρου 0,18 mm.

Το πλεονέκτημα αυτού του υλικού είναι ότι μπορεί να ωριμάσει σε θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος. Η θλιπτική αντοχή αυτού του ινοπλισμένου κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής (High Performance Fiber Reinforced Concrete – HPFRC), όπως μετρήθηκε από κύβους ακμής 100 mm μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης, ήταν 177MPa.

Οι επιφάνειες των δοκών πριν την ενίσχυση εκτραχύνθηκαν $1 \div 2$ mm με αμμοβολή και το ινοπλισμένο κονίαμα σκυροδετήθηκε απευθείας χωρίς καθόλου δόνηση. Ο μανδύας κατασκευάστηκε 3 μήνες μετά τη σκυροδέτηση των αρχικών δοκών και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν 28 μέρες μετά την εφαρμογή του μανδύα.

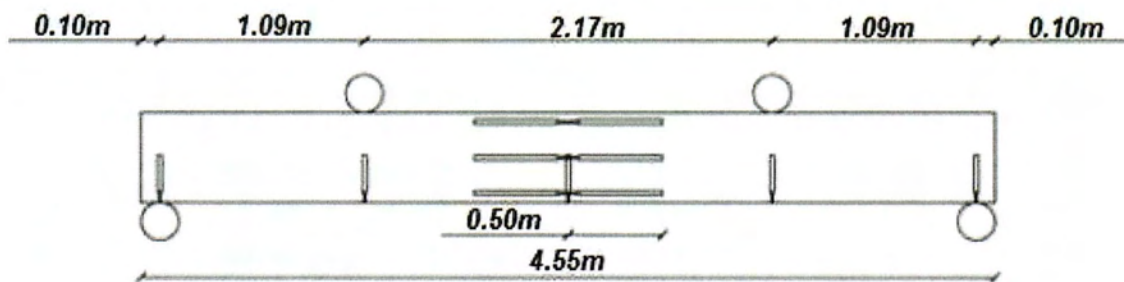
Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν προκύπτει ολίσθηση μεταξύ του μανδύα και της υφιστάμενης δοκού μέχρι την αστοχία από κάμψη. Πιο συγκεκριμένα, στη δημοσίευση «An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for RC beam strengthening» του G. Martinola και των συνεργατών του, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη βελτιστοποίηση της πρόσφυσης μεταξύ του παλιού σκυροδέματος και του νέου ινοπλισμένου κονιάματος. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς διαστάσεων 150x150x600mm. Η επιφάνεια των δοκών εκτραχύνθηκε με αμμοβολή και έπειτα σκυροδετήθηκε μανδύας ινοπλισμένου κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής πάχους 4 cm. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν ακριβώς ίδια με αυτά που περιγράφονται παραπάνω. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι δεν προκύπτει ολίσθηση μεταξύ των δύο υλικών. Συνεπώς, η εκτράχυνση της επιφάνειας μερικών χιλιοστών με αμμοβολή θεωρείται αρκετή πριν τη σκυροδέτηση του ινοπλισμένου μανδύα.



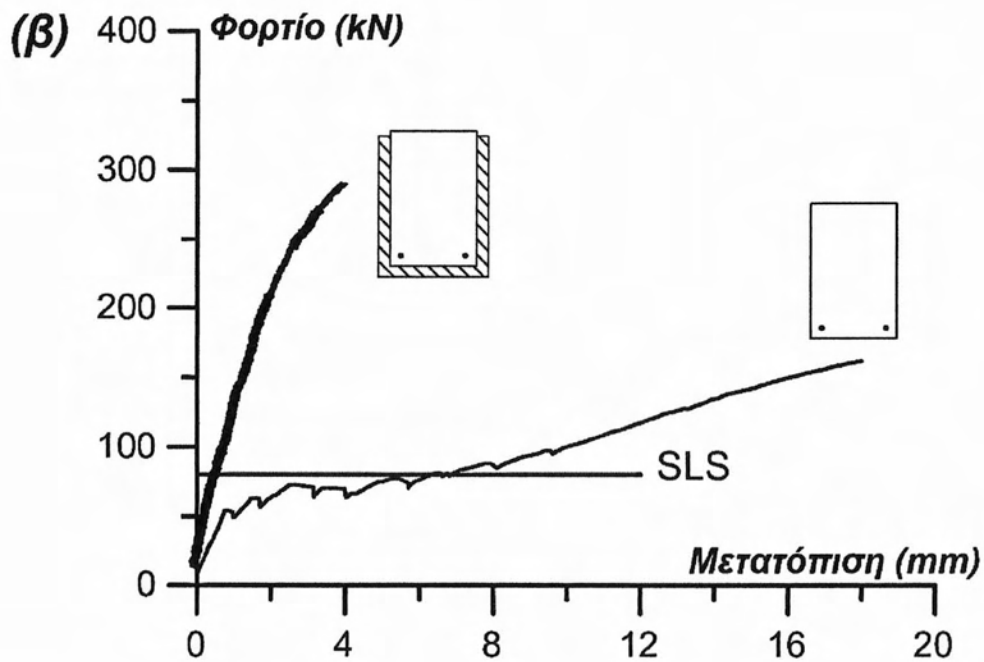
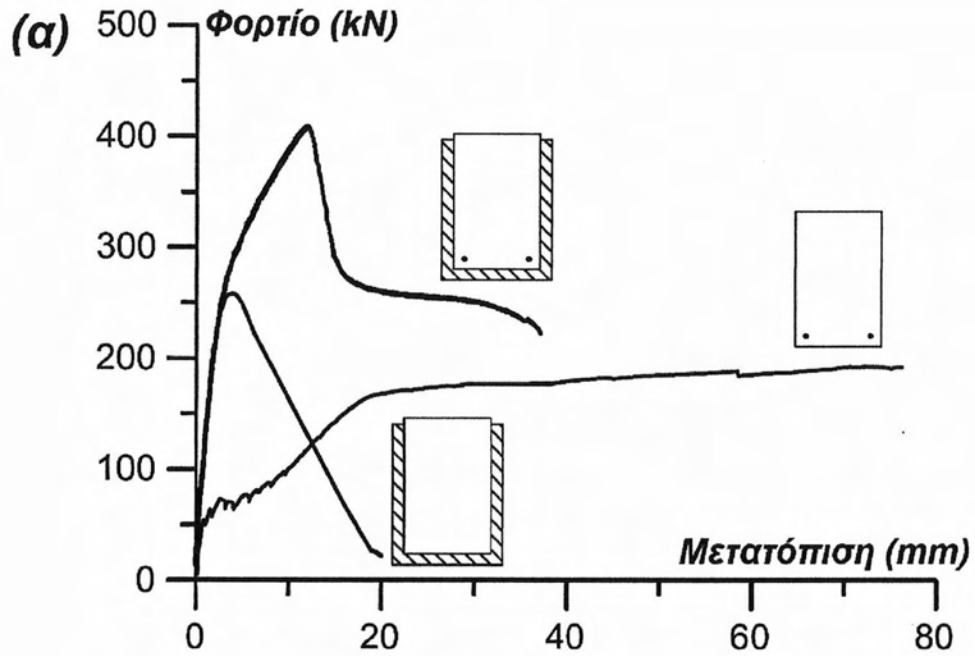
Σχήμα 3.13. Επιφάνεια της δοκού μετά την εκτράχυνση με αμμοβολή και διατομή ενισχυμένης δοκού με μανδύα ινοπλισμένου κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής (Martinola et al., 2007)

Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Οι δοκοί δοκιμάστηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων με άνοιγμα 4,35 m και φορτίστηκαν σε δύο σημεία τα οποία είχαν απόσταση 1,09 m από τις στηρίξεις. Οι δοκιμές έγιναν επιβάλλοντας ένα σταθερό ρυθμό μετατόπισης, ενώ ποτενσιόμετρα και μηχανισιόμετρα LVDT χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της κατακόρυφης και της οριζόντιας μετατόπισης (που περιλαμβάνει το άνοιγμα των ρωγμών), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14. Τοποθέτηση των μηχανισιόμετρων (Martinola et al., 2010)



Σχήμα 3.15. Σύγκριση των διαγραμμάτων: (α) Πλήρη διαγράμματα, (β) Αρχικό τμήμα των διαγραμμάτων για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, Service Limit State (SLS) (Martinola et al., 2010)

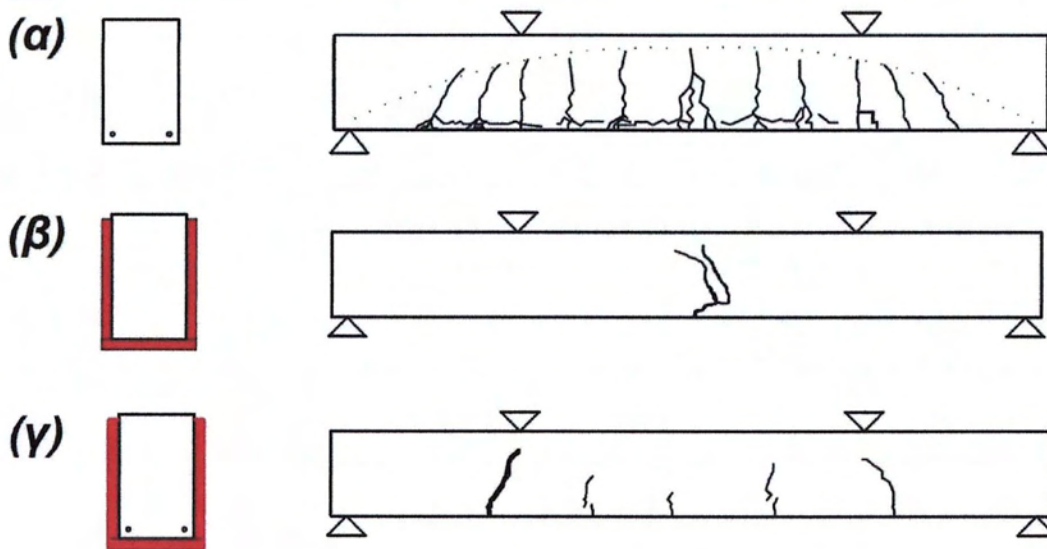
Αρχικά έγινε η δοκιμή της δοκού αναφοράς (δοκός Ο/Σ χωρίς μανδύα). Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού φορτίου (συμπεριλαμβανομένου και του ιδίου βάρους της δοκού) σε σχέση με τη μετατόπιση στο μέσο του ανοίγματος (βέλος κάμψης). Η συμπεριφορά μιας δοκού Ο/Σ είναι ευρέως γνωστή, αλλά κάποιες παρατηρήσεις πρέπει να τονιστούν. Οι κύριες πειραματικές παρατηρήσεις είναι οι εξής:

- Σε φορτίο 50 kN, αναπτύχθηκαν καμπτικές ρωγμές στην περιοχή μεταξύ των σημείων φόρτισης, με την απόσταση των ρωγμών να κυμαίνεται μεταξύ 300 ÷ 400 mm
- Αργότερα από τις ρωγμές στο επίπεδο του οπλισμού, μια έντονη ρωγμή αναπτύχθηκε και οδήγησε σε απώλεια συνάφειας μεταξύ διαμήκους οπλισμού και σκυροδέματος, το οποίο δεν είναι σύνηθες και οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό όπλισης και στην κακή ποιότητα σκυροδέματος
- Το φορτίο αυξήθηκε περαιτέρω με μικρότερη δυσκαμψία μέχρι να διαρρεύσει ο οπλισμός σε φορτίο 190 kN
- Λόγω της απώλειας συνάφειας, η δυσκαμψία της δοκού μειώθηκε αξιοσημείωτα και προέκυψαν μεγάλες παραμορφώσεις
- Οριζόντιες ρωγμές αναπτύχθηκαν από την άνω θλιπτική χορδή, προσδιορίζοντας έτσι μια γεωμετρία μηχανισμού τόξου. (Σχήμα 3.16α)

Το δεύτερο δοκίμιο που δοκιμάστηκε ήταν η άοπλη δοκός ενισχυμένη με μανδύα HPFRC και το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης στο μέσο του ανοίγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15α. Η αστοχία που προέκυψε ήταν ψαθυρή σε φορτίο 258 kN και αναπτύχθηκε μόνο μια κύρια ρωγμή κοντά στο μέσο του ανοίγματος (Σχήμα 3.16β).

Στο τέλος δοκιμάστηκε και η συμβατική δοκός ενισχυμένη με ινοοπλισμένο μανδύα. Λόγω του μανδύα, η δοκός παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά με τη δεύτερη δοκό (χωρίς οπλισμούς) μέχρι την τιμή του φορτίου 258 kN. Τελικά λόγω της παρουσίας του οπλισμού, το φορτίο αυξήθηκε μέχρι τα 410 kN με μια μικρή μείωση της δυσκαμψίας που οφείλεται στην ανάπτυξη ρωγμών σε απόσταση 500 ÷ 600 mm. Μετά τη μέγιστη τιμή του φορτίου στα 410 kN, το φορτίο μειώθηκε και σταθεροποιήθηκε περίπου στα 260 kN, με τον εντοπισμό μιας μόνο ρωγμής σε ένα από τα δύο σημεία φόρτισης (Σχήμα 3.16γ).

Η συμπεριφορά του πειράματος αποδεικνύει τα τρία στάδια που χαρακτηρίζουν τη δομική απόκριση: το ελαστικό στάδιο, το δεύτερο στάδιο όπου η δυσκαμψία συγκρατείται από την πολλαπλή ρηγμάτωση στον ινοοπλισμένο μανδύα, και το τρίτο στάδιο του οποίου η κλίση οφείλεται στον εντοπισμό μακρο-ρωγμών και την παραμένουσα αντοχή. Η αστοχία προήλθε λόγω της εφελκυστικής αστοχίας του διαμήκους οπλισμού με την τελική εικόνα των ρωγμών να παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16γ.



Σχήμα 3.16. Αποτύπωση ρωγμών στην αστοχία: (α) Δοκός Ο/Σ, (β) Άοπλη δοκός ενισχυμένη με ινοπλισμένο μανδύα HPFRC, (γ) Δοκός Ο/Σ ενισχυμένη με ινοπλισμένο μανδύα HPFRC (Martinola et al., 2010)

Συζήτηση αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών δοκών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15. Εστιάζοντας την προσοχή στις δύο δοκούς (με και χωρίς μανδύα ενίσχυσης), παρατηρείται ότι ο μανδύας HPFRC οδηγεί σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας της δοκού (2,15 φορές η αντίστοιχη αρχική), ακόμη και αν η συμπεριφορά μετά το σημείο μέγιστου φορτίου (post- peak) δείχνει σημαντική μείωση της δυσκαμψίας. Μετά τον κλάδο αυτό (μείωση δυσκαμψίας), το φορτίο σταθεροποιείται σε τιμή υψηλότερη από την αντίστοιχη της δοκού χωρίς μανδύα. Πρέπει να τονιστεί ότι το μέγιστο φορτίο της άοπλης δοκού με μανδύα είναι υψηλότερο από αυτό που παρουσίασε η δοκός Ο/Σ χωρίς μανδύα HPFRC. Όσον αφορά την πλαστιμότητα, αξίζει να σημειωθεί η μείωση στη μέγιστη μετατόπιση στις ενισχυμένες δοκούς, ακόμα και αν η πολύ μεγάλη πλαστιμότητα της δοκού χωρίς ενίσχυση οφείλεται, τουλάχιστον εν μέρει, σε απώλεια της συνάφειας. Σε περίπτωση που απαιτείται και αύξηση πλαστιμότητας στην ενισχυμένη δοκό, προτείνεται και τοποθέτηση διαμήκους οπλισμού στο μανδύα.

Ένα άλλο σημαντικό σημείο αυτής της μεθόδου ενίσχυσης αφορά τη λειτουργικότητα. Στις πραγματικές εφαρμογές, οι κανονισμοί απαιτούν τη σωστή συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου (και της κατασκευής) και στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (αύξηση αντοχής) και στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (έλεγχος βελών κάμψης και περιορισμός ανοίγματος ρωγμών). Από αυτή την άποψη, η μέθοδος αυτή αυξάνει σημαντικά τη δυσκαμψία της δοκού με παρόμοια συμπεριφορά με το αρηγμάτωτο στάδιο της δοκού χωρίς ενίσχυση (Σχήμα 3.15β). Πράγματι, ο μανδύας HPFRC περιορίζει την ανάπτυξη των μακρο-ρωγμών με προφανή πλεονεκτήματα σε όρους δυσκαμψίας και ανθεκτικότητας, λαμβάνοντας υπόψη και

τον πολύ χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T) του κονιάματος υπερ-υψηλής αντοχής. Με την υπόθεση φορτίου λειτουργικότητας 80 kN, που αντιστοιχεί σε μέγιστη εφελκυστική τάση στο διαμήκη οπλισμό περίπου 250MPa, η εφαρμογή του μανδύα οδηγεί σε μείωση του βέλος κάμψης από 6 mm σε 0,5 mm (12 φορές μικρότερο), χωρίς ορατή ρηγμάτωση.

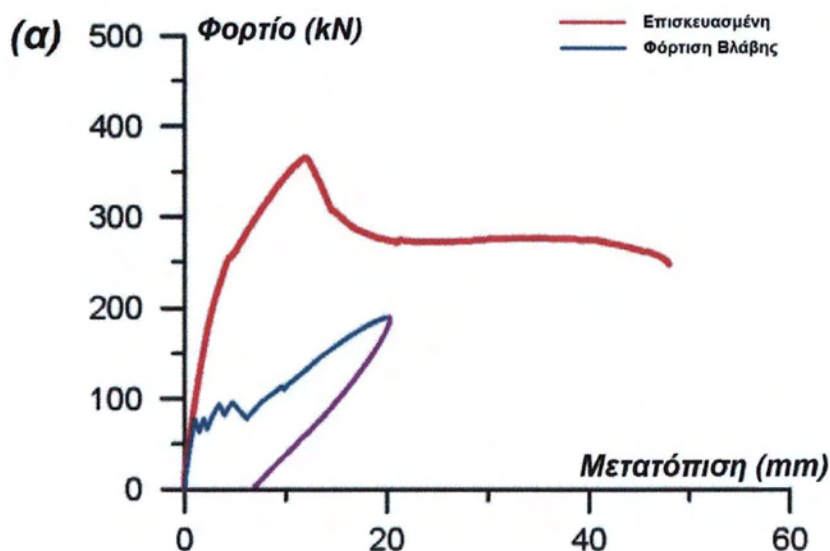
Σε αντίθεση, σε αυτό το στάδιο φόρτισης, στην αρχική δοκό οι ρωγμές έχουν αναπτυχθεί πλήρως, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Επισκευή υφιστάμενης δοκού

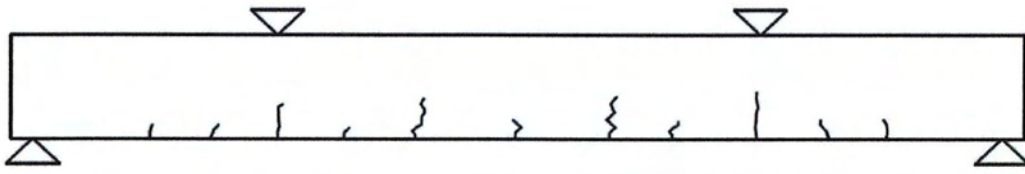
Η μέθοδος ενίσχυσης με μανδύα HPFRC εξετάστηκε επίσης για την επισκευή δοκών Ο/Σ που έχουν υποστεί βλάβη. Μια δοκός Ο/Σ ακριβώς ίδια με αυτή του Σχήματος 3.12, σκυροδετήθηκε με το ίδιο σκυρόδεμα και με τον ίδιο οπλισμό, βλάφθηκε αρχικά μέχρι το σημείο διαρροής του διαμήκους οπλισμού, όπως μπορεί να συμβεί σε παλιές κατασκευές λόγω της αύξησης του φορτίου λειτουργίας. Τελικά η δοκός ενισχύθηκε με μανδύα HPFRC.

Στο Σχήμα 3.17α παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης στη φόρτιση για τη δημιουργία βλάβης. Παρατηρείται ότι το πρώτο φορτίο ρηγμάτωσης (70 kN) και το φορτίο διαρροής (195 kN), είναι παρόμοια με των προηγούμενων δοκών. Όταν διέρρευσε ο οπλισμός, η δοκός αποφορτίστηκε και το υπολειμματικό βέλος κάμψης ήταν ίσο με 7 mm. Η απόσταση των ρωγμών, όπως και στην περίπτωση της δοκού Ο/Σ χωρίς μανδύα, ήταν περίπου 300 ÷ 400 mm, ενώ το μέγιστο άνοιγμα ρωγμής ήταν περίπου 0,4 mm.

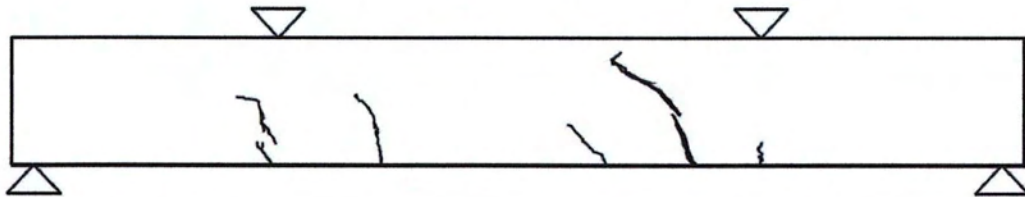
Η δοκός με βλάβη επισκευάστηκε με την απευθείας περίχυση του HPFRC. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια της δοκού εκτραχύνθηκε με αμμοβολή αλλά οι υπάρχουσες ρωγμές δεν επισκευάστηκαν, όπως γίνεται συνήθως στην πράξη.



(β)

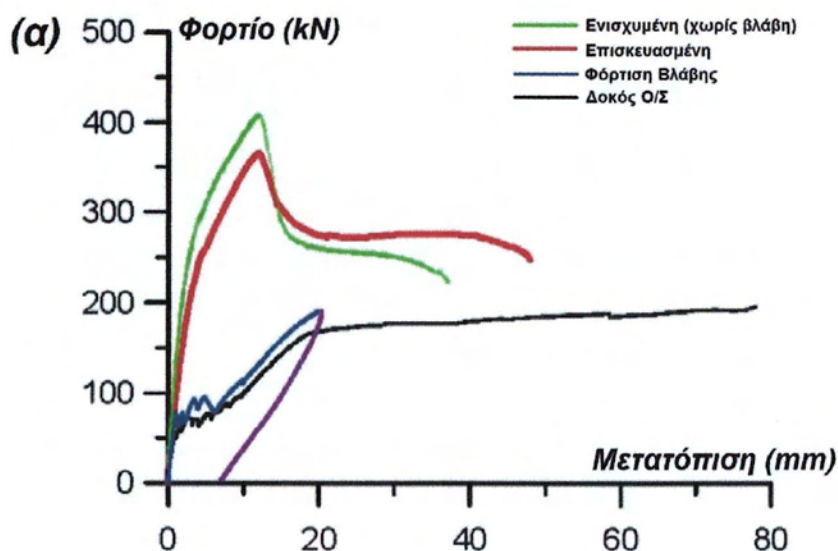


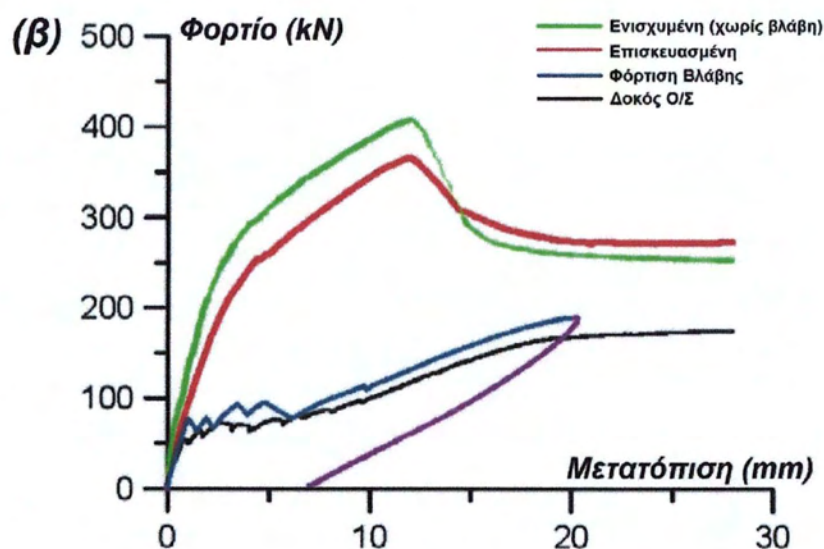
(γ)



Σχήμα 3.17. Επισκευασμένη δοκός: (α) Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης της φόρτισης βλάβης της αρχικής δοκού και της επισκευασμένης, (β) Εικόνα των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης βλάβης της αρχικής δοκού, (γ) Εικόνα των ρωγμών στην αστοχία της επισκευασμένης δοκού (Martinola et al., 2010)

Τα πειραματικά αποτελέσματα της επισκευασμένης δοκού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.17α. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια με την απόκριση της ενισχυμένης δοκού: Χαρακτηρίζεται από έναν αρχικό κλάδο μέχρι το φορτίο να φτάσει την τιμή 250 kN, και ακολουθεί ένας κλάδος με μειούμενη δυσκαμψία μέχρι την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (365 kN). Η αρχική δυσκαμψία της επισκευασμένης δοκού είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με αυτή της ενισχυμένης (Σχήμα 3.18), ενώ δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στη δυσκαμψία μετά τη διαρροή μέχρι το σημείο της μέγιστης έντασης (όπου τα διαγράμματα είναι σχεδόν παράλληλα).





Σχήμα 3.18. Σύγκριση: (α) Πλήρων διαγραμμάτων, (β) Αρχικού τμήματος των διαγραμμάτων (για τη λειτουργικότητα) (Martinola et al., 2010)

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του μανδύα HPFRC για την επισκευή μιας δοκού με βλάβη μπορεί να επιφέρει αύξηση της φέρουσας ικανότητας που υπολογίστηκε ότι είναι περίπου 1,90 φορές η αντίστοιχη της αρχικής δοκού. Αυτή η απόδοση είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με την ενισχυμένη δοκό (χωρίς βλάβη) λόγω της παρουσίας ρωγμών (περίπου 0,1 mm μετά την αποφόρτιση) στη δοκό με βλάβη, οι οποίες δεν επισκευάστηκαν. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο ενδιαφέρον για αξιολόγηση της επίδρασης του μανδύα. Η προετοιμασία της δοκού στην οποία προκλήθηκε βλάβη, με λάξευση των ανοιχτών ρωγμών μπορεί να βοηθήσει στη διεύθυνση των υλικών μεταξύ των επιφανειών των ρωγμών.

Η συμπεριφορά μετά το μέγιστο φορτίο (post - peak) και ο μηχανισμός κατάρρευσης (Σχήμα 3.18β) είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρήθηκαν στην ενισχυμένη δοκό (Σχήμα 3.15), όπως και η εικόνα των ρωγμών (Σχήμα 3.17β), η οποία χαρακτηρίζεται από απόσταση ρωγμών $400 \div 500$ mm.

Όσον αφορά την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (SLS), η μέθοδος ενίσχυσης επιτρέπει μια αξιοσημείωτη αύξηση της δυσκαμψίας της δοκού ακόμα και στην επισκευή δομικών μελών. Στην πραγματικότητα, για φορτίο λειτουργικότητας 80 kN, υπολογισμένο όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η εφαρμογή του μανδύα HPFRC σε δοκό με βλάβη οδηγεί σε βέλος κάμψης έως και 12 φορές μικρότερο σε σχέση με τη δοκό Ο/Σ, χωρίς ορατές ρωγμές στο μανδύα.

Η μείωση των παραμορφώσεων και η επακόλουθη καθυστέρηση στο σχηματισμό και το άνοιγμα των ρωγμών συνεισφέρουν στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του δομικού στοιχείου. Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται και συγκρίνονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8. Πειραματικά αποτελέσματα (Martinola et al., 2010)

Δοκός	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Υπολειμματικό Φορτίο (kN)	Μέγιστη Μετατόπιση (mm)	Υπολειμματική Μετατόπιση (mm)	Μετατόπιση στη Λειτουργικότητα (SLS)
Ο/Σ	190	-	80	-	6
Άοπλη ενισχυμένη με μανδύα	258	-	4	-	0,5
Ο/Σ ενισχυμένη με μανδύα	410	260	12	38	0,5
Ο/Σ επισκευασμένη με μανδύα	365	270	12	43	8

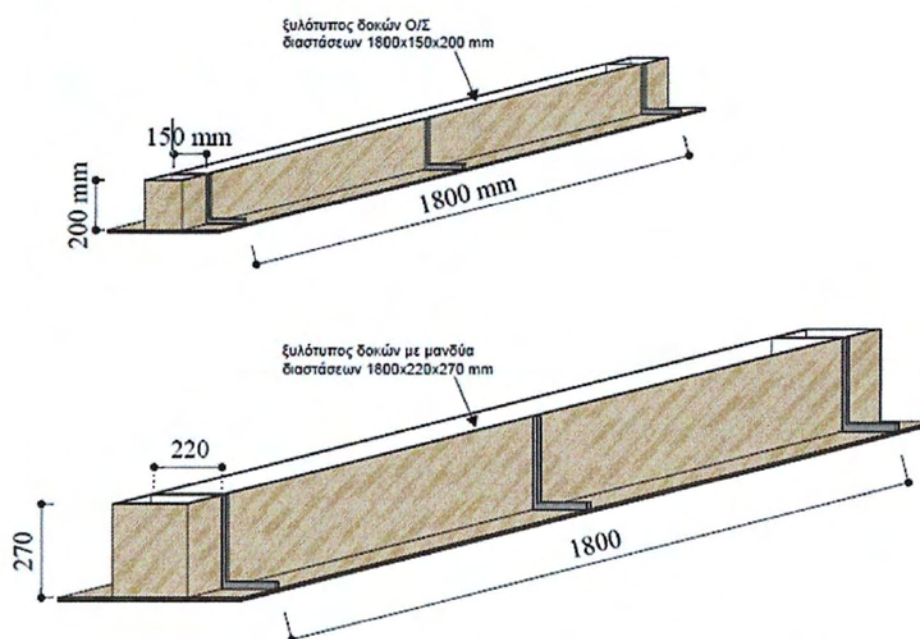
Συμπεράσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου στην ενίσχυση αλλά και στην επισκευή δοκών, καθώς η εφαρμογή του μανδύα πάχους 4cm επιφέρει αύξηση του μέγιστου φορτίου, το οποίο στη μία περίπτωση ήταν 2,15 φορές το αντίστοιχο της αρχικής δοκού Ο/Σ και 1,9 φορές στην περίπτωση της δοκού Ο/Σ με βλάβη. Επίσης, η μέθοδος αυτή παρέχει μια αξιοσημείωτη δομική βελτίωση και στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, με την αύξηση της δυσκαμψίας της δοκού και τη σημαντική μείωση του βέλους κάμψης υπό το φορτίο λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, ο μανδύας δρα ως ένα είδος εξωτερικής προέντασης διατηρώντας την αρχική δυσκαμψία του αρηγμάτωτου στοιχείου. Η εφαρμογή του ινοπλισμένου μανδύα HPFRC είναι σχετικά απλή, καθώς η ωρίμανση σε θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος είναι αρκετή για να επιτρέψει την ανάπτυξη των χαρακτηριστικών του κονιάματος. Το υλικό μπορεί να σκυροδετηθεί σε λεπτά πάχη, ενώ μια κανονική αμμοβολή στην επιφάνεια της δοκού διασφαλίζει την καλή πρόσφυση του μανδύα χωρίς την εφαρμογή ασταριού (βελτιωτικού πρόσφυσης). Εν τέλει, η εφαρμογή του ινοπλισμένου μανδύα υπερ-υψηλής αντοχής αυξάνει την ανθεκτικότητα της κατασκευής, λόγω του μειωμένου ανοίγματος των ρωγμών και της συμπαγότητας του κονιάματος HPFRC.

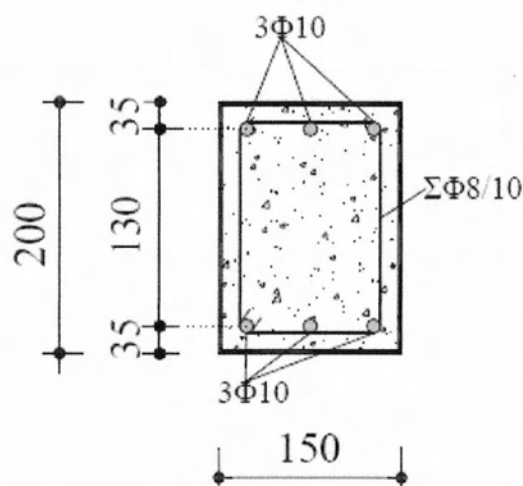
3.3.3.4. Ενίσχυση με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του κ. Θεοχάρη Παπαθεοχάρη με τίτλο «Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς σε Κάμψη Συμβατικά Οπλισμένων Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος, 2012» με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Φίλιππο Περδικάρη, εκτιμάται πειραματικά και αναλυτικά η αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου ενίσχυσης.

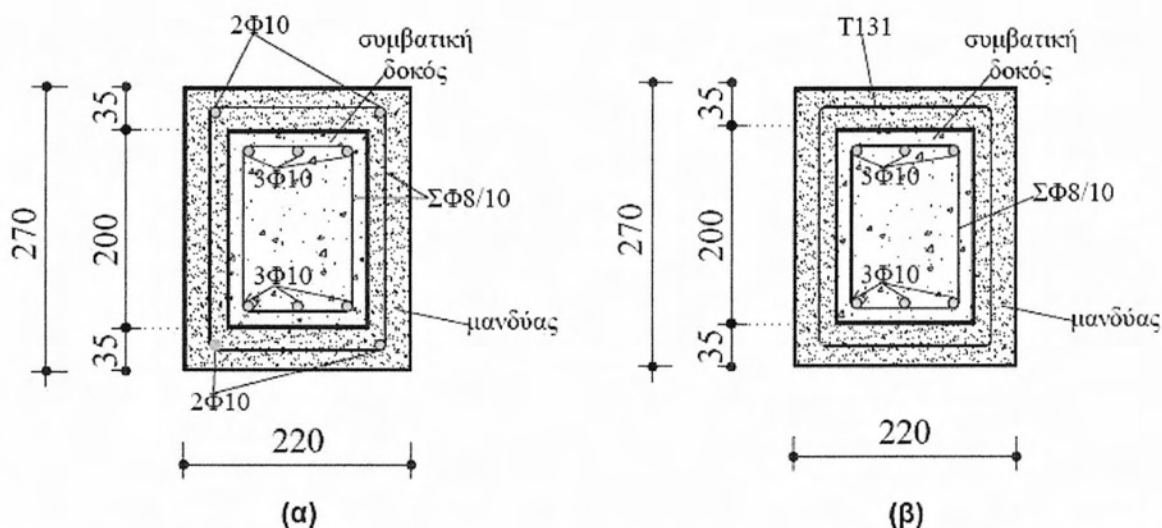
Για τις ανάγκες των πειραμάτων σκυροδετήθηκαν συνολικά δεκαέξι δοκοί από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με διαμήκη οπλισμό 3Ø10 στην πάνω και στην κάτω παρειά. Στις δώδεκα από αυτές τοποθετήθηκαν συνδετήρες ΣØ8/10, ενώ στις υπόλοιπες τέσσερις δεν τοποθετήθηκε εγκάρσιος οπλισμός. (Σχήμα 3.20). Μετά από 28 ημέρες συντήρησης, δέκα δοκοί ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα (CFRT), από τις οποίες οι τέσσερις δεν είχαν εγκάρσιο οπλισμό. Η ενίσχυση των δοκών αφορούσε διαμήκη οπλισμό 2Ø10 πάνω/κάτω και συνδετήρες ΣØ8/10 ή μεταλλικό πλέγμα T131 και ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα πάχους 3,5 cm περιμετρικά της αρχικής δοκού (εσωτερικής) και περιεκτικότητας σε μεταλλικές ίνες 0,8% κ.ό. (Σχήμα 3.21). Το μεταλλικό πλέγμα T131 αποτελούταν από ράβδους Ø5 ανά 15 cm κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση. Πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα, δεν έγινε εκτράχυνση της εξωτερικής επιφάνειας της αρχικής δοκού, αλλά καθαρισμός και διαβροχή της. Για την κατασκευή των δοκών χρησιμοποιήθηκαν προκατασκευασμένοι ξυλότυποι διαστάσεων 150x200x1800mm (πλάτος x ύψος x μήκος) για τις αρχικές δοκούς και 220x270x1800mm για τις ενισχυμένες δοκούς (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19. Ξυλότυποι αρχικών δοκών και ενισχυμένων δοκών με μανδύα (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.20. Διατομή συμβατικά οπλισμένων δοκών (διαστάσεις σε mm) (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

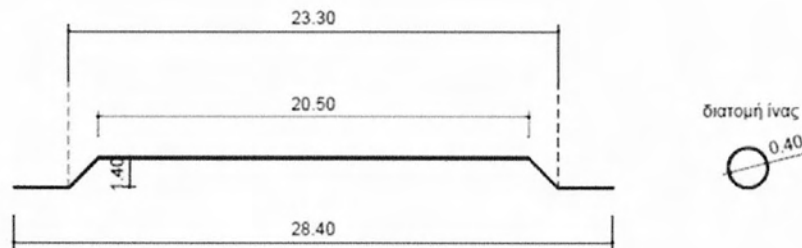


Σχήμα 3.21. Διατομή: (α) Συμβατικά οπλισμένων δοκών ενισχυμένων με ινοπλισμένο μανδύα (με διαμήκη 4Φ10 και εγκάρσιο ΣΦ8/10 οπλισμό), (β) Συμβατικά οπλισμένων δοκών ενισχυμένων με ινοπλισμένο μανδύα (με μεταλλικό πλέγμα T131) (διαστάσεις σε mm) (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Για τη σκυροδέτηση όλων των συμβατικά οπλισμένων δοκών (RC) χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα ονομαστικής ποιότητας C20/25 από την εταιρία Lafarge. Για την κατασκευή των ινοπλισμένων μανδυνών (CFRT) χρησιμοποιήθηκε ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα επί τόπου παρασκευής από την εταιρία Lafarge. Για 75 λίτρα μίγματος αναμίχθηκαν 162 kg τσιμεντοκονιάματος, 18,375 kg νερού και 0,3 kg ρευστοποιητή.

Όλοι οι οπλισμοί των δοκών (διαμήκης, εγκάρσιος, πλέγμα T131) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χάλυβας ποιότητας S500. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονο-αξονικού εφελκυσμού σε έξι δοκίμια ράβδων οπλισμού, τρία για τα Ø10 και τρία για τα Ø8. Η μέση τιμή της τάσης διαρροής για τις Ø10 και Ø8 ήταν 550 και 526 MPa, αντίστοιχα.

Ο μανδύας ήταν ινοπλισμένος με λείες ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής, με κεκαμμένα άκρα (hooked end) (Σχήμα 3.22) σε ποσότητα 63,1 gr/ℓ 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 $\ell/d = 71$. Η εφελκυστική τάση αντοχής είναι μεγαλύτερη των 1400 MPa.



Σχήμα 3.22. Διαστάσεις ινών χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Από τις σκυροδετήσεις των δοκών ελήφθησαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15x15x15cm και κυλινδρικά διαστάσεων 15x30cm (διάμετρος x ύψος) για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος και του ινοπλισμένου κονιάματος. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στον ίδιο θάλαμο συντήρησης της EBETAM μαζί με τις αντίστοιχες δοκούς. Κάποια από τα δοκίμια εξετάστηκαν σε μονο-αξονική θλίψη στις εγκαταστάσεις του Ε.Κ.Ε.Τ., ενώ τα υπόλοιπα δοκιμάστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για όλα τα δοκίμια (κυβικά και κυλινδρικά) παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες.

Πίνακας 3.9. Θλιπτική αντοχή δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος (Ε.Κ.Ε.Τ.) (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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 3.10. Θλιπτική αντοχή δοκιμών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Ε.Κ.Ε.Τ.) (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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

Πίνακας 3.11. Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών συμβατικού σκυροδέματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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 3.12. Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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 3.13. Έμμεση εφελκυστική αντοχή (splitting) συμβατικού σκυροδέματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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	

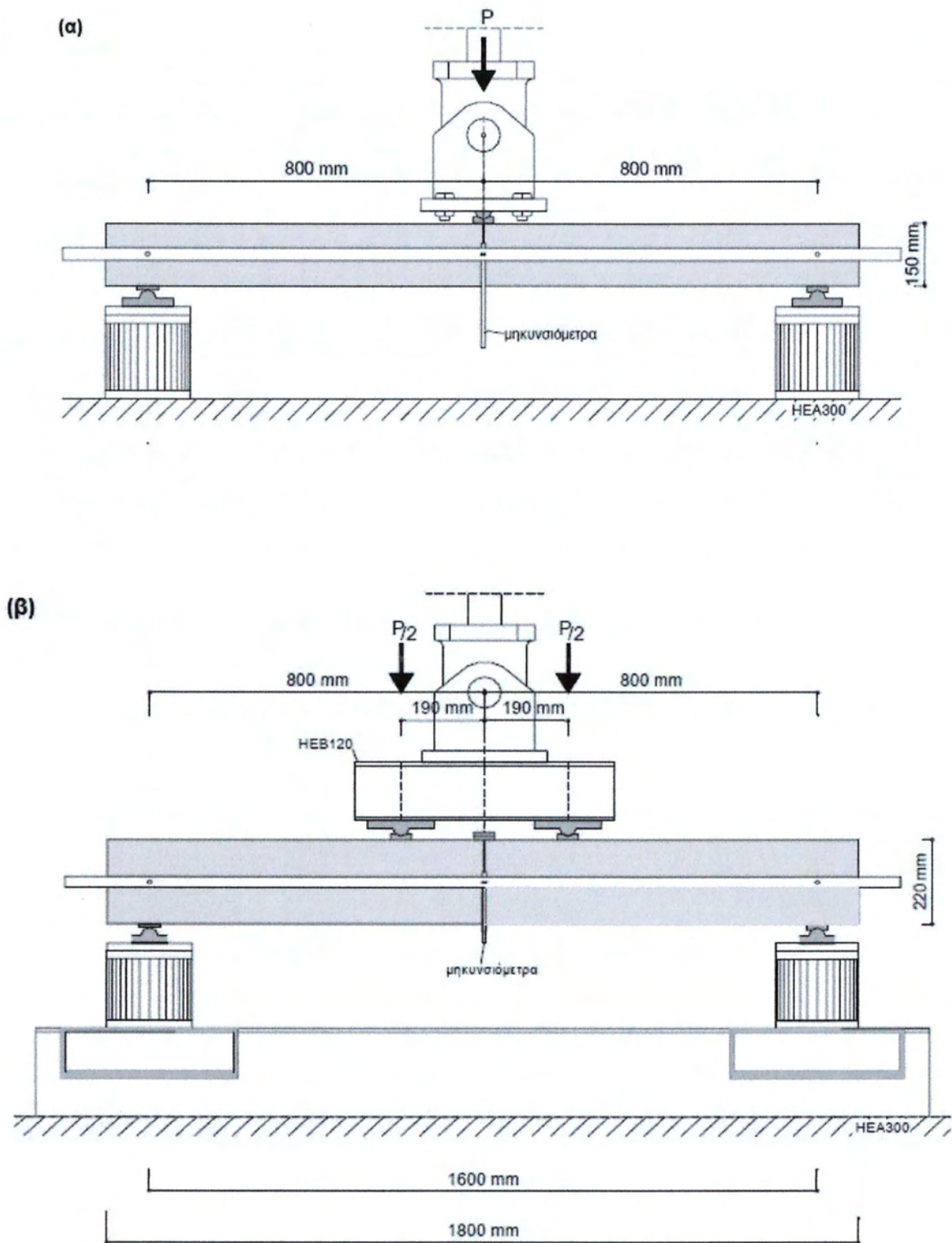
Πίνακας 3.14. Έμμεση εφελκυστική αντοχή (splitting) ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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	

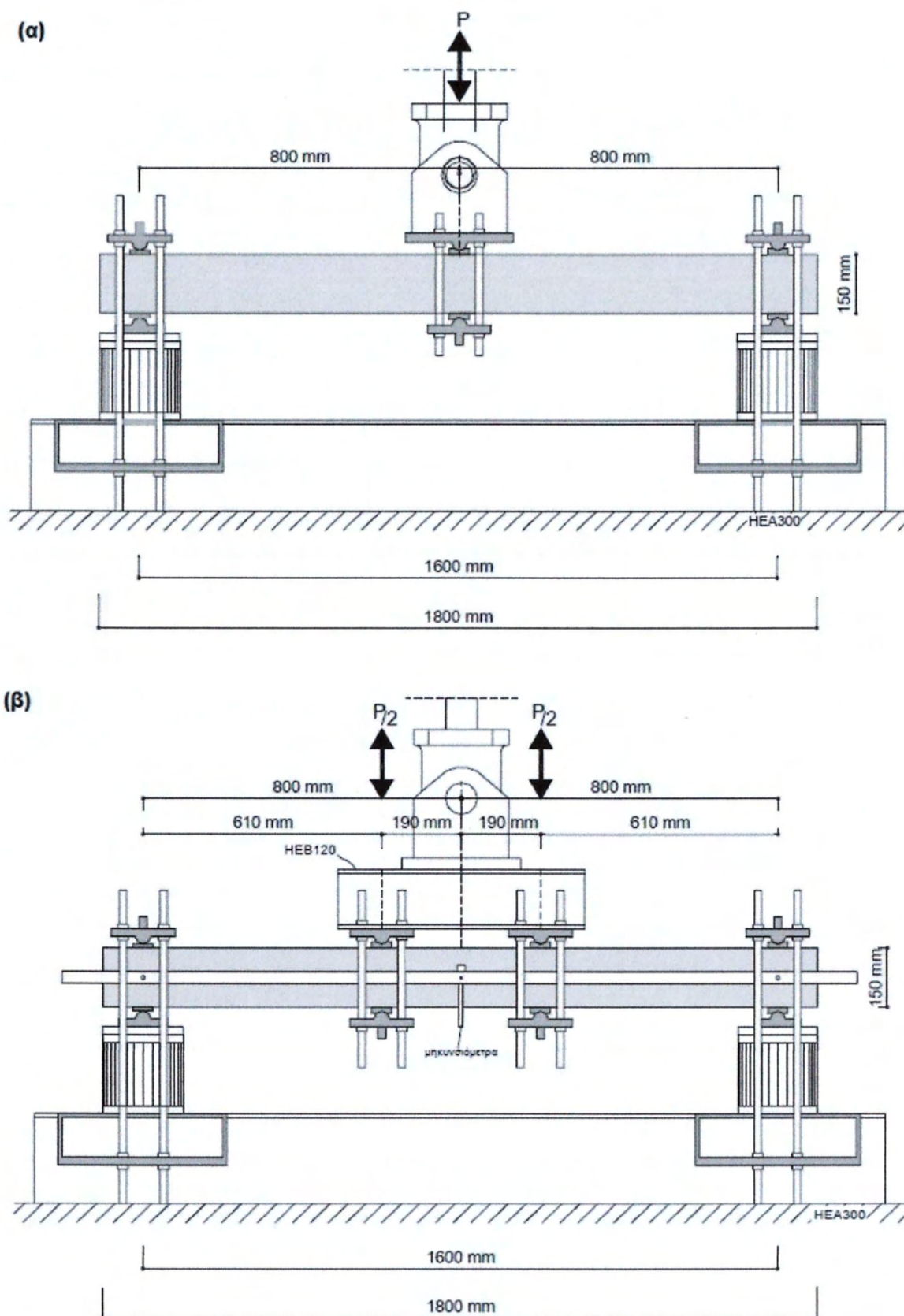
Πειραματική Διάταξη

Η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο φορτίσεων, δηλαδή κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων, ήταν το σημείο επιβολής του φορτίου, το οποίο στην πρώτη περίπτωση εφαρμόστηκε στο μέσο της δοκού, ενώ στη δεύτερη σε δύο σημεία σε απόσταση 19 cm εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος των δοκών μέσω μιας μεταλλικής δοκού HEB120 και δύο μεταλλικών πλακών στο κάτω μέρος της (Σχήματα 3.23 και 3.24).

Η στήριξη των δοκών ήταν αμφιέριστη, με καθαρό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ίσο με 160 cm. Το βέλος κάμψης μετρήθηκε μέσω δύο μηχανομέτρων DCDT που τοποθετήθηκαν στο μέσο του ανοίγματος των δοκών.



Σχήμα 3.23. Πειραματική διάταξη μονοτονικής φόρτισης: (α) τριών σημείων και (β) τεσσάρων σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.24. Πειραματική διάταξη ανακυκλιζόμενης φόρτισης: (α) τριών σημείων και (β) τεσσάρων σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

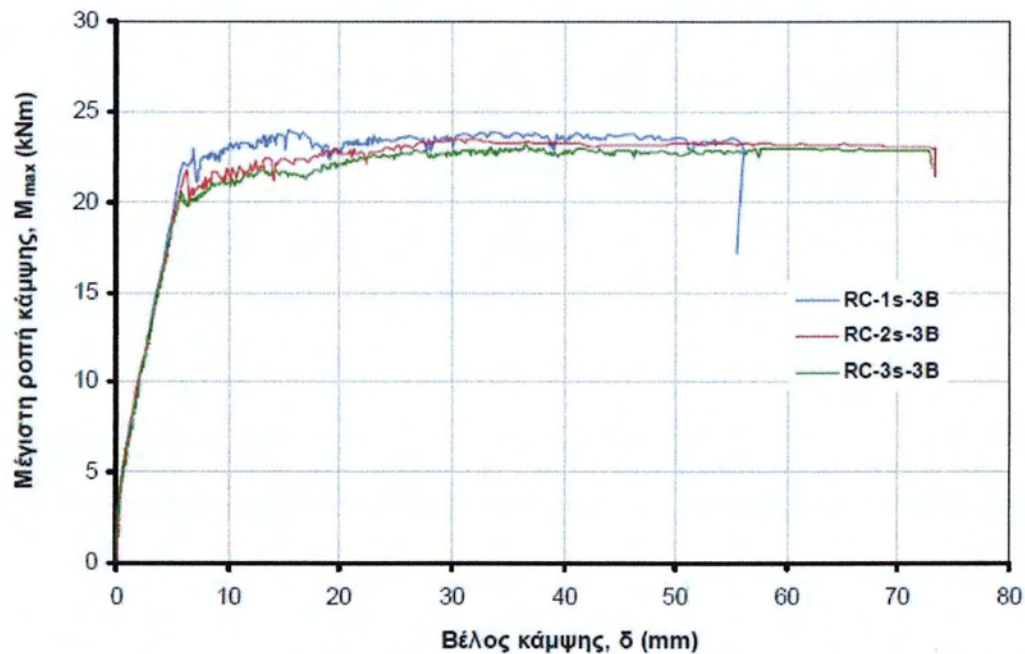
Πίνακας 3.15. Πειραματικό πρόγραμμα (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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

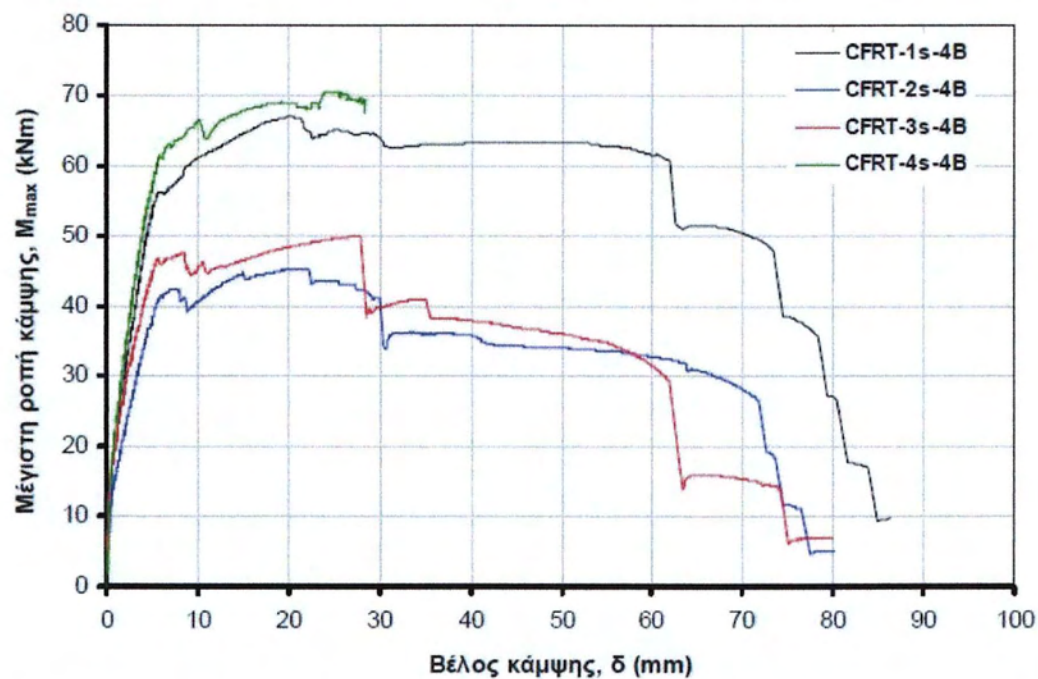
Αποτελέσματα πειραμάτων

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 4Ø10 και εγκάρσιο ΣØ8/10 οπλισμό (CFRT_{4Ø10}) και οι CFRT-2S-4B και CFRT-3S-4B με μεταλλικό πλέγμα T131 (CFRT_{T131}).

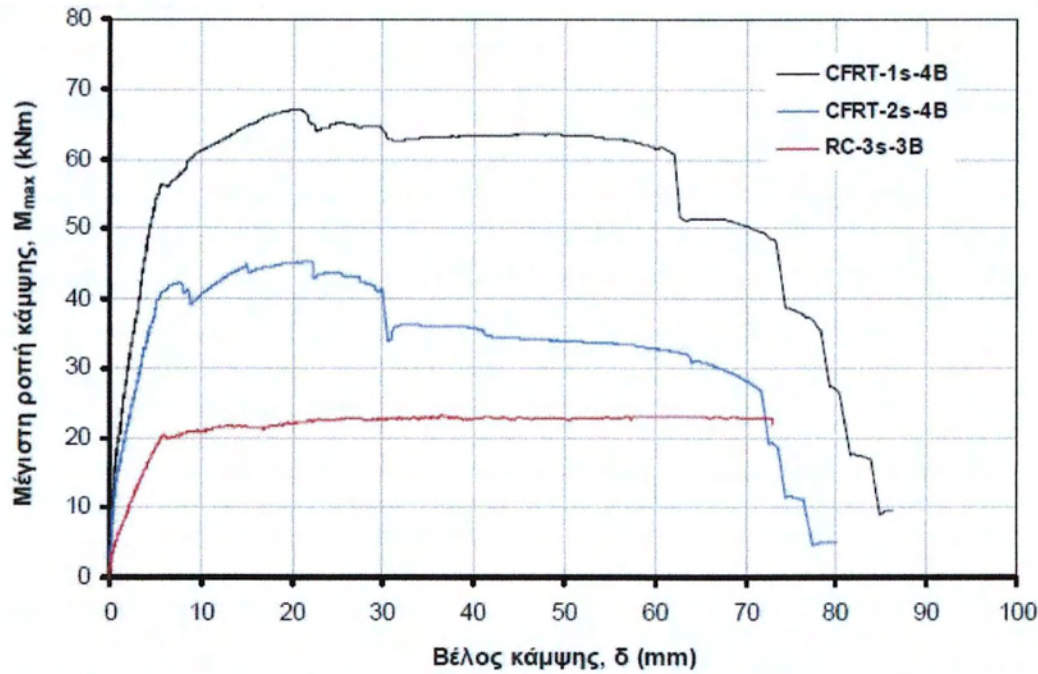
Τα διαγράμματα ροπής κάμψης – βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος για την κάθε ομάδα δοκών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.25 και 3.26, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζεται σύγκριση χαρακτηριστικών διαγραμμάτων ροπών - βελών κάμψης.



Σχήμα 3.25. Διαγράμματα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών RC σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης τριών σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.26. Διαγράμματα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών CFRT σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.27. Διαγράμματα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών RC και CFRT σε στατική μονοτονική φόρτιση κάμψης (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Πίνακας 3.16. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκών RC και CFRT σε μονοτονική δοκιμή κάμψης 3 και 4 σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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 μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη, η οποία ήταν 2÷3 φορές η αντίστοιχη των αρχικών δοκών σπλισμένου σκυροδέματος (RC). Ειδικότερα, η αντοχή των ενισχυμένων δοκών CFRT₄₀₁₀ ήταν κατά μέσο όρο 2,6 φορές σε ρηγμάτωση, 2,7 φορές σε διαρροή και 2,9 φορές στη μέγιστη ροπή σε κάμψη η αντίστοιχη των αρχικών δοκών RC. Η αντοχή των δοκών CFRT_{T131} ήταν κατά μέσο όρο 2 φορές τόσο στη ρηγμάτωση, όσο και στη διαρροή και στη μέγιστη ροπή σε κάμψη η αντίστοιχη

των αρχικών δοκών RC. 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.

Η μέγιστη τιμή της αντοχής σε κάμψη των ενισχυμένων δοκών CFRT_{4Ø10} 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. 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. Στις ενισχυμένες δοκούς CFRT_{4Ø10} 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. Για παραμορφώσεις της τάξεως του $\delta = 30 \div 40$ mm όπου οι συμβατικές δοκοί φτάνουν τη μέγιστη καμπτική αντοχή τους, οι αντοχές των ενισχυμένων δοκών είναι 2,7 φορές η αντίστοιχη των αρχικών δοκών RC όταν πρόκειται για τις δοκούς CFRT_{4Ø10} και 1,6 φορές αν πρόκειται για τις CFRT_{T131}.

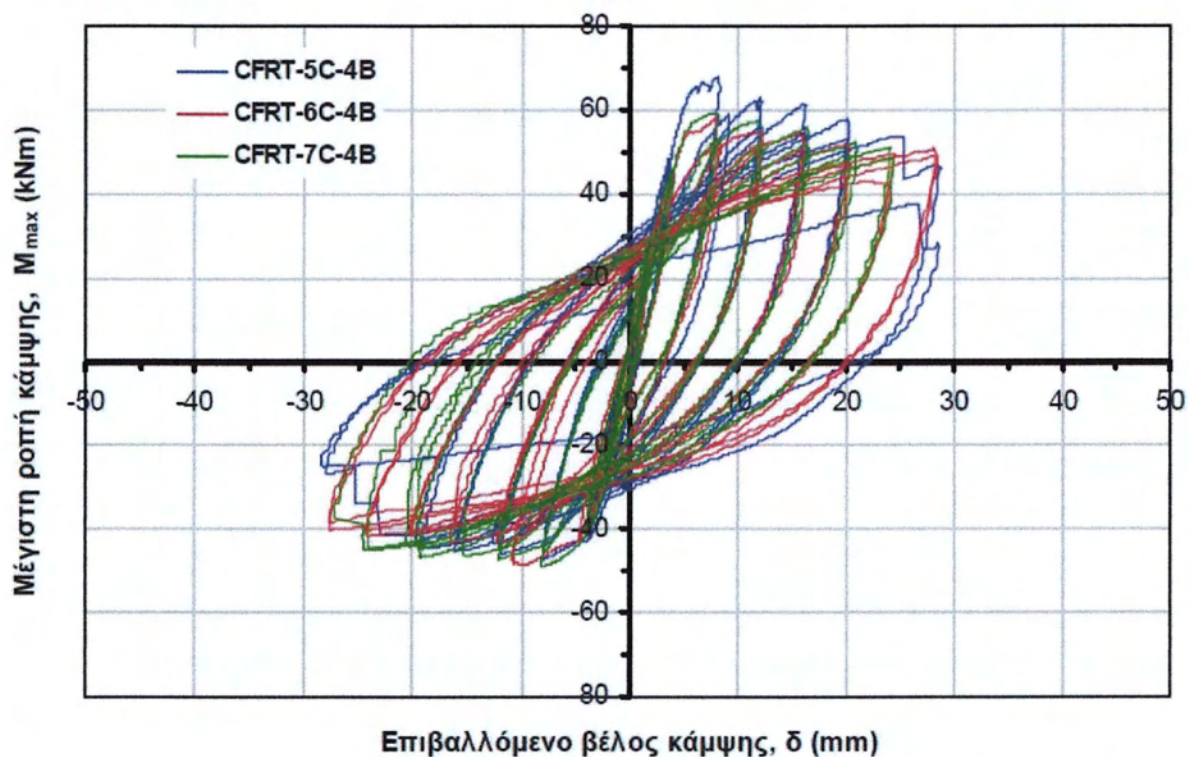
Η συνολική ενέργεια απόσβεσης των ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα ήταν ως τη διαρροή 2 έως 2,5 φορές η αντίστοιχη των συμβατικών δοκών και 1,4 έως 1,8 φορές ως την αστοχία. Ειδικότερα, η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών με διαμήκεις ράβδους ήταν 1,9 φορές ως τη ρηγμάτωση, 2,7 φορές ως τη διαρροή και 1,8 φορές ως τη μέγιστη ροπή κάμψης η αντίστοιχη των αρχικών δοκών. Αντίστοιχα, η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών με πλέγμα ήταν 1,1 φορές ως τη ρηγμάτωση, 2 φορές ως τη διαρροή και 1,4 ως τη μέγιστη ροπή κάμψης η αντίστοιχη των αρχικών δοκών. Η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων δοκών CFRT_{4Ø10} 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.

Στις ενισχυμένες δοκούς CFRT μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής παρατηρείται μείωση της φέρουσας ικανότητας τους λόγω της απώλειας της συνεισφοράς των ινών στην εφελκόμενη 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. 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

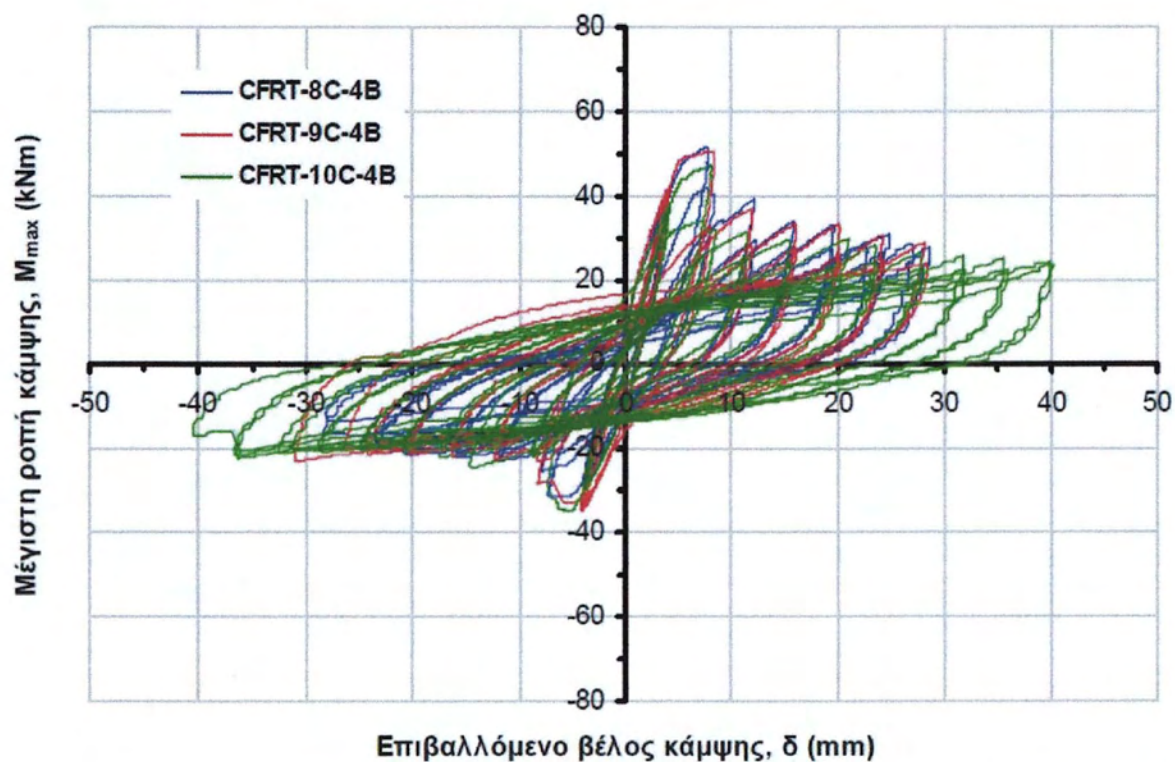
τριχοειδών ρωγμών ήταν αρκετά μεγαλύτερος στις ενισχυμένες δοκούς σε σχέση με τις συμβατικά οπλισμένες δοκούς, ενώ με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της καταπόνησης των δοκών με μανδύα υπήρξε συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε μια περιοχή, με έντονη αύξηση του ανοίγματος ουσιαστικά μίας ή δύο ρωγμών 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 σκυρόδεμα 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 σκυρόδεμα 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 διαμήκειες ράβδους, έναντι 2 και 3 φορών που παρατηρήθηκε αντίστοιχα στις δοκούς με το συγκεκριμένο ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα.

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 ΣØ8/10 οπλισμό (CFRT_{4Ø10}) και οι CFRT-8S-4B, CFRT-9S-4B και CFRT-10S-4B με μεταλλικό πλέγμα T131 (CFRTT131). Η δοκός RC-4C-3B εξετάστηκε σε δοκιμή κάμψης 3-σημείων. Η πειραματική διάταξη δεν επέτρεψε την τοποθέτηση μηχανομητρώων στο μέσον του ανοίγματος, άρα η μόνη μέτρηση παραμόρφωσης της δοκού ήταν αυτή της μετακίνησης του υδραυλικού εμβόλου.

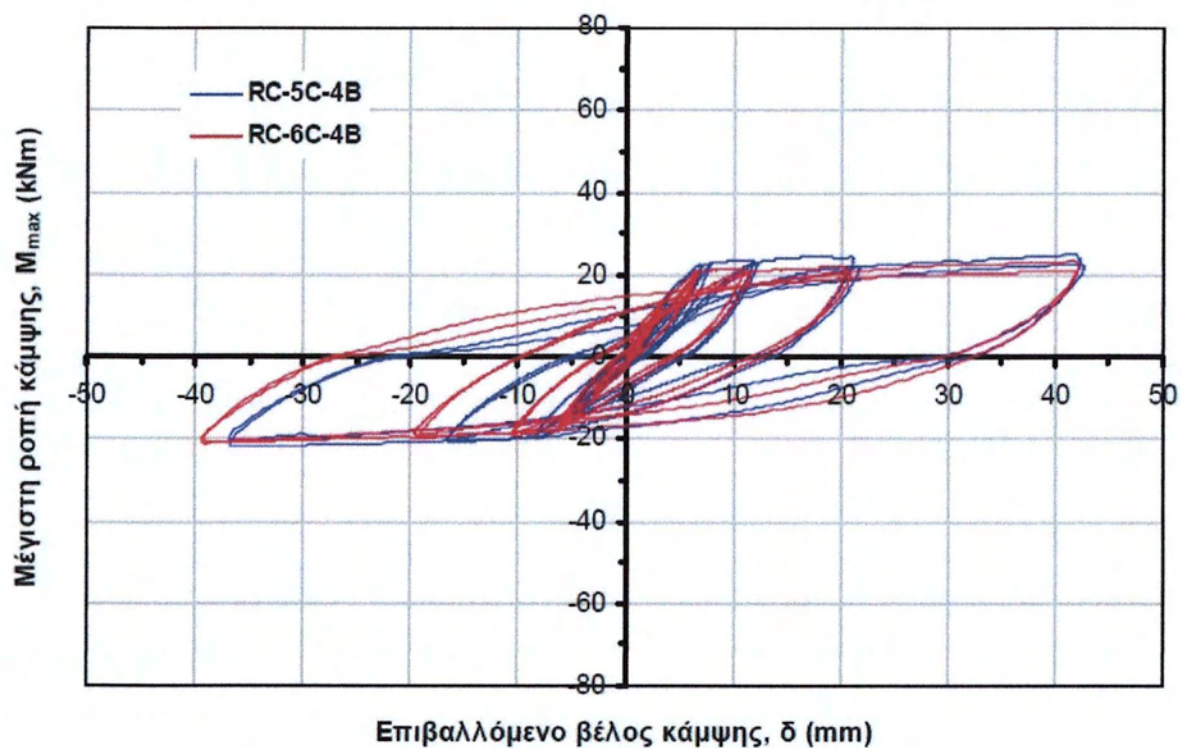
Όσον αφορά τις δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης, τα διαγράμματα μέγιστης ροπής κάμψης – βέλους κάμψης για την κάθε ομάδα δοκών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.28, 3.29 και 3.30, αντίστοιχα. Στα Σχήματα 3.31, 3.32 και 3.33 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης ροπής κάμψης – βέλους κάμψης ανάμεσα στα CFRT_{4Ø10} και RC, στα CFRT_{T131} και RC και στα CFRT_{4Ø10} και CFRT_{T131} δοκίμια, αντίστοιχα και στο Σχήμα 3.34 οι περιβάλλουσες ροπής κάμψης – βέλους κάμψης των 1^{ων} κύκλων αυτών. Οι αντοχές των δοκών σε ρηγμάτωση, πρώτη διαρροή και μέγιστη ροπή κάμψης μαζί με τα αντίστοιχα βέλη τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.17.



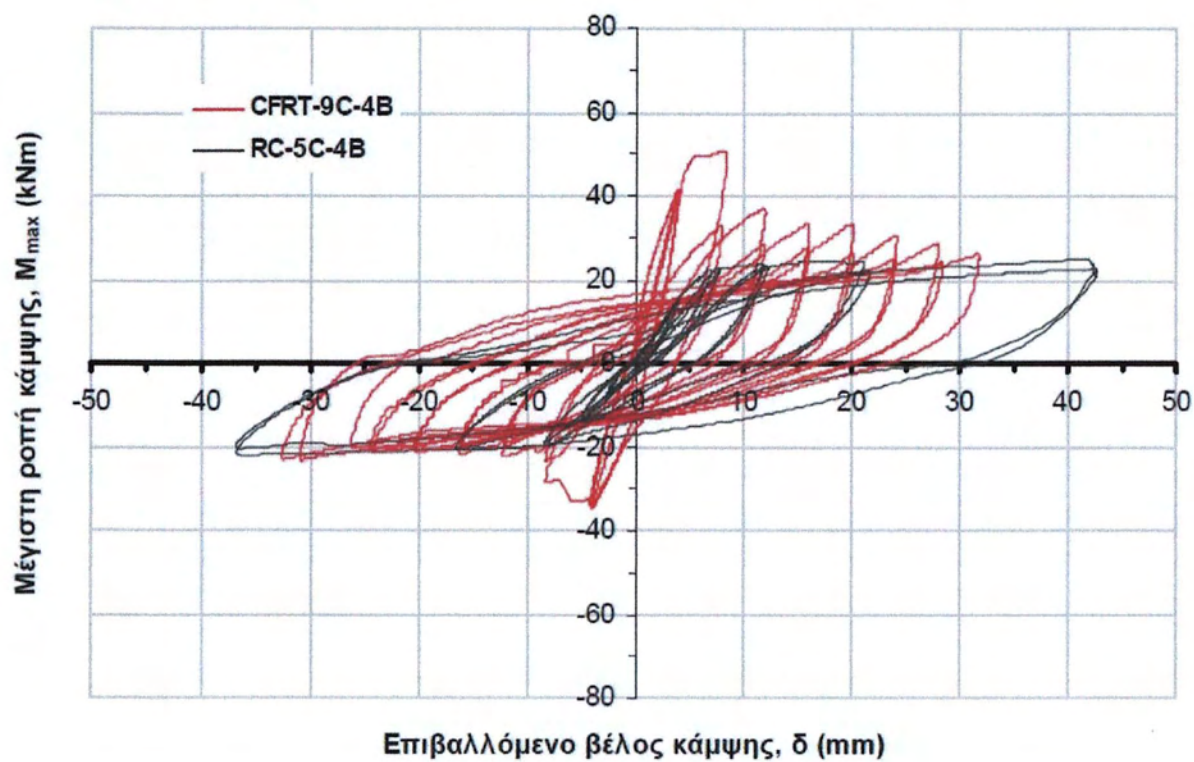
Σχήμα 3.28. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης των δοκών CFRT με διαμήκη οπλισμό 4Ø10 (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



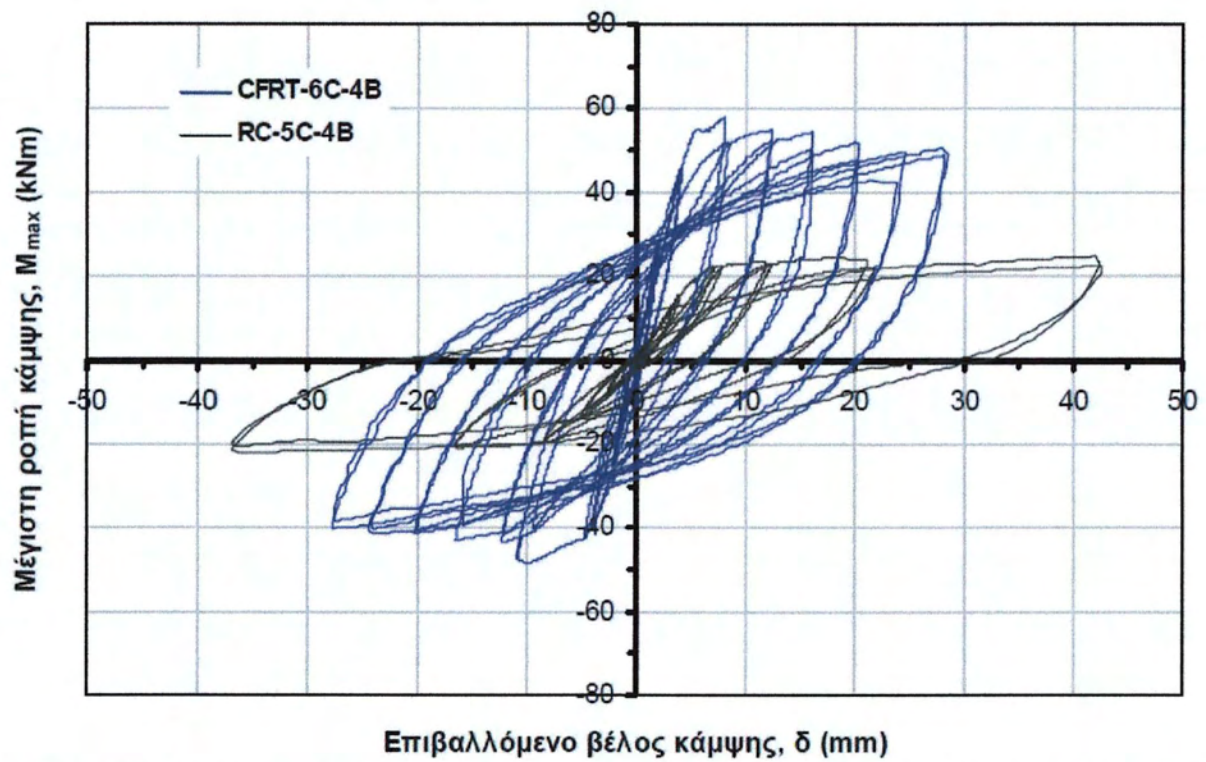
Σχήμα 3.29. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης των δοκών CFRT με μεταλλικό πλέγμα T131 (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



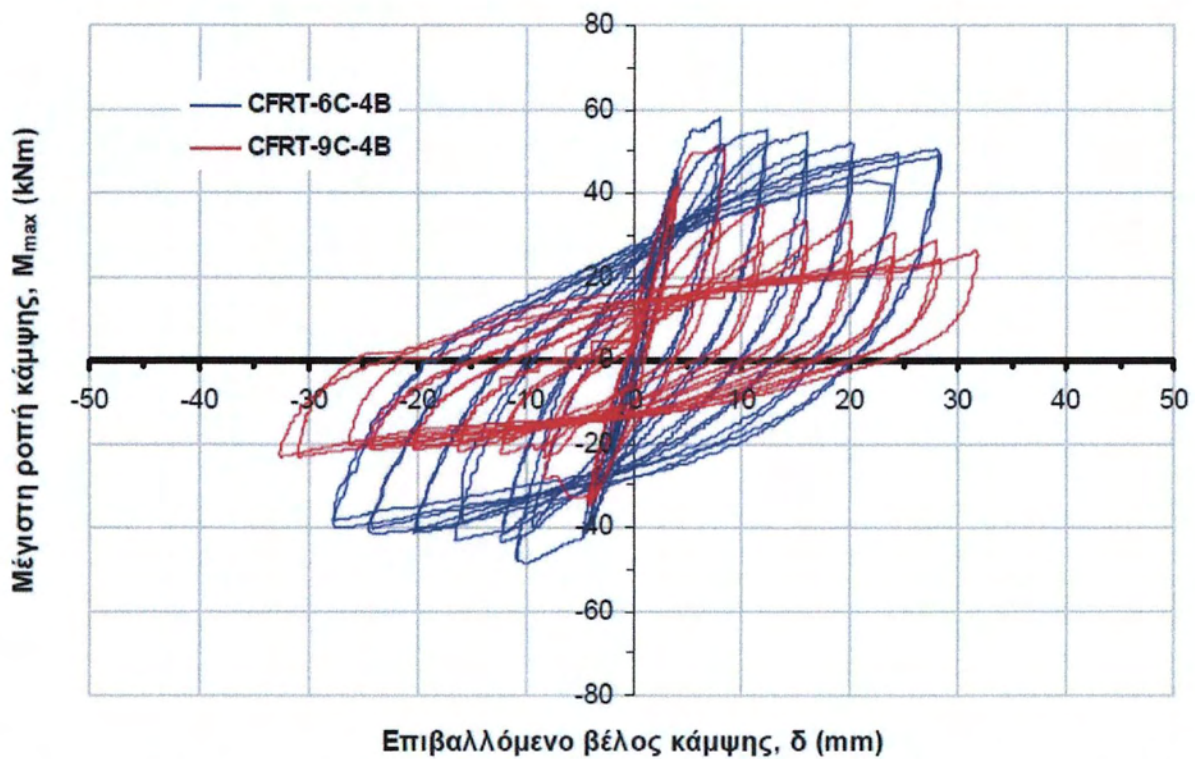
Σχήμα 3.30. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης των συμβατικών δοκών RC (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



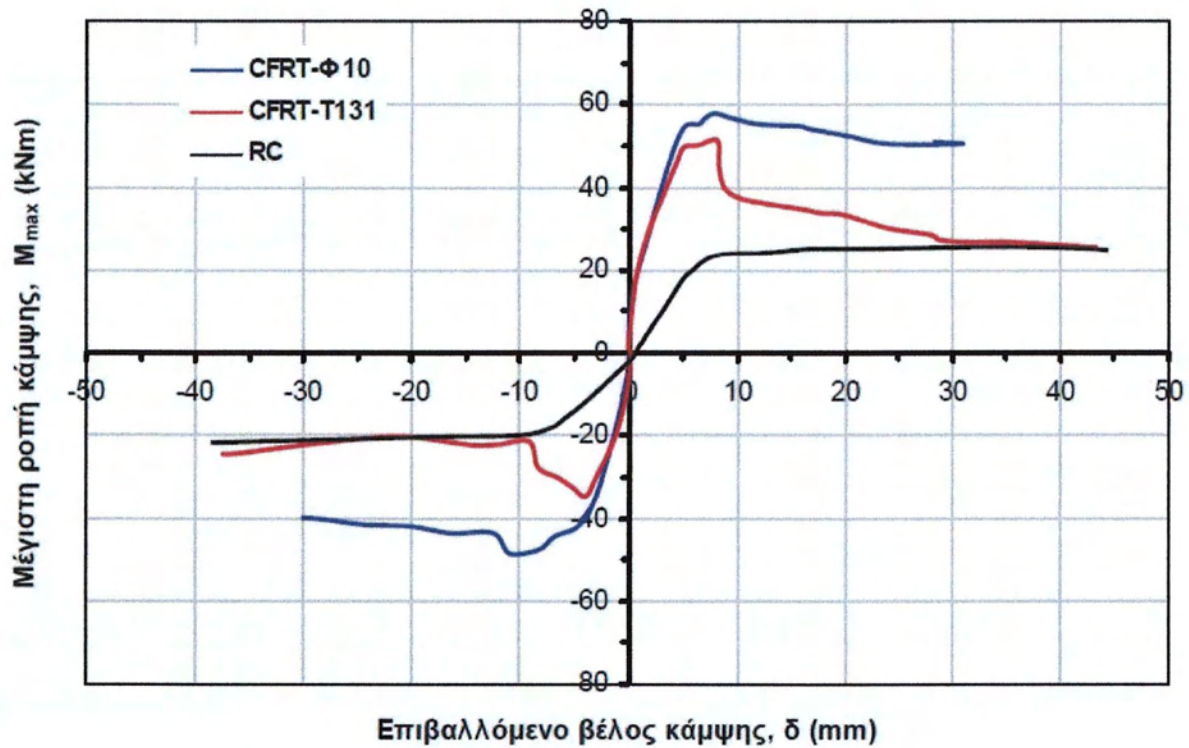
Σχήμα 3.31. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης δοκού CFRT_{T131} και RC (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.32. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης της δοκού CFRT₄₀₁₀ και RC (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.33. Διάγραμμα μέγιστης ροπής - μέγιστου βέλους κάμψης της δοκού CFRT₄₀₁₀ και CFRT_{T131} (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



Σχήμα 3.34. Περιβάλλουσα μέγιστης ροπής - βέλους κάμψης 1^{ων} κύκλων φόρτισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκών CFRT_{Φ10}, CFRT_{T131} και RC (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Πίνακας 3.17. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκών RC και CFRT σε στατική ανακυκλιζόμενη δοκιμή κάμψης 4-σημείων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

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 μεγαλύτερη αντοχή, η οποία ήταν σε ρηγμάτωση, σε διαρροή και φέρουσα ικανότητα που ήταν 3,5, 2,5 και 2,5 φορές η αντίστοιχη των αρχικών συμβατικών δοκών RC, ενώ οι ενισχυμένες δοκοί με πλέγμα CFRT_{T131} σε σύγκριση με την αντίστοιχη των δοκών RC 2,6 φορές σε ρηγμάτωση, 1,9 φορές σε διαρροή και 2 φορές στη μέγιστη καμπτική αντοχή. Οι αντίστοιχες τιμές των CFRT₄₀₁₀ σε ρηγμάτωση, διαρροή και μέγιστη καμπτική αντοχή ήταν 1,35, 1,3 και 1,2 φορές η αντίστοιχη των CFRT_{T131}. Για σχετικά υψηλές τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης ($\delta = \pm 20$ mm) οι ενισχυμένες δοκοί CFRT₄₀₁₀ και CFRT_{T131} παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή που ήταν 2,3 και 1,2 φορές της αντίστοιχης δοκών RC, ενώ οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ 2 φορές σε σχέση με τις CFRT_{T131}.

Για επιβαλλόμενες μετατοπίσεις μεγαλύτερες από $\delta = \pm 8$ mm, όπου γίνεται η πρώτη διαρροή των δοκιμών, οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή μέσης καμπτικής αντοχής, η οποία ήταν 2,5 φορές η αντίστοιχη των συμβατικών δοκών RC, είτε επρόκειτο για θετικές ροπές είτε για αρνητικές ροπές, ενώ 1,7 φορές για θετικές ροπές και 2 φορές για αρνητικές ροπές έναντι των CFRT_{T131}. Αντίστοιχα, οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή μέσης καμπτικής αντοχής, συγκεκριμένα 1,45 φορές για θετικές ροπές και 1,3 φορές για αρνητικές ροπές την αντίστοιχη των συμβατικών δοκών RC.

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 CFRT₄₀₁₀ 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 CFRT₄₀₁₀ είναι 4% και 2% και για τις CFRT_{T131} 8% και 5%, αντίστοιχα.

Γενικότερα, οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών των 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 12%, πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 10%, πτώση απόκρισης μεταξύ των θετικών ροπών 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 8% και πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 7%.

Κατά αντιστοιχία, οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν πτώση απόκρισης μεταξύ του 1^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αρχικής διαρροής κατά 39%, 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% και πτώση απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 12%.

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% και μεταξύ των αρνητικών ροπών του 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης κατά 7%.

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 CFRT₄₀₁₀, της τάξεως του 28% έναντι 5% των CFRT₄₀₁₀. Η πτώση αυτή είναι συνεχώς μεγαλύτερη έναντι εκείνης των CFRT₄₀₁₀, φτάνοντας τελικά στα επίπεδα των συμβατικών δοκών για επίπεδα παραμορφώσεων $\delta = \pm 30$ mm και άνω.

Η απορρόφηση ενέργειας στις ενισχυμένες δοκούς CFRT₄₀₁₀ ήταν κατά μέσο όρο 3,5 φορές η αντίστοιχη των αρχικών δοκών RC. Ειδικότερα, η απόσβεση ενέργειας για τις CFRT₄₀₁₀ ήταν 3,6 φορές για τον 1^ο κύκλο και 3,5 φορές για τον 2^ο κύκλο της κάθε επιβαλλόμενης μετατόπισης η αντίστοιχη των αρχικών δοκών RC. Αντίστοιχα, οι ενισχυμένες δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν απορρόφηση ενέργειας κατά μέσο όρο 2,3 φορές για τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης ως και $\delta = \pm 12$ mm και 1,1 φορές για τιμές του $\delta > \pm 12$ mm την αντίστοιχη των αρχικών δοκών RC. 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 αυξημένες τιμές απορρόφησης ενέργειας κατά 2 φορές περισσότερη κατά μέσο όρο. Ειδικότερα, για τις CFRT₄₀₁₀ η απορρόφηση ήταν 1,9 φορές η αντίστοιχη των CFRT_{T131} για τον 1^ο κύκλο και 2,1 φορές για τον 2^ο κύκλο της κάθε επιβαλλόμενης μετατόπισης.

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 (E24/E8) μεταξύ των θετικών ροπών των 1^{ων} κύκλων κατά 4,3 φορές και αύξηση της απόκρισης μεταξύ των αρνητικών ροπών των 1^{ων} κύκλων κατά 3,7. Οι αντίστοιχες τιμές για τις δοκούς CFRT_{T131} είναι 2,7 και 2,5.

Γενικότερα, οι δοκοί CFRT₄₀₁₀ παρουσίασαν αυξημένες τιμές απορρόφησης ενέργειας μεταξύ των 1^{ων} κύκλων της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αμέσως προηγούμενης κατά 1,4 φορές κατά μέσο όρο, 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.

Οι δοκοί CFRT_{T131} παρουσίασαν αυξημένες τιμές απορρόφησης ενέργειας μεταξύ των 1^{ων} κύκλων της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και της αμέσως προηγούμενης κατά 1,3 φορές κατά μέσο όρο, είτε πρόκειται για θετικές είτε για αρνητικές ροπές. Η πτώση απόκρισης

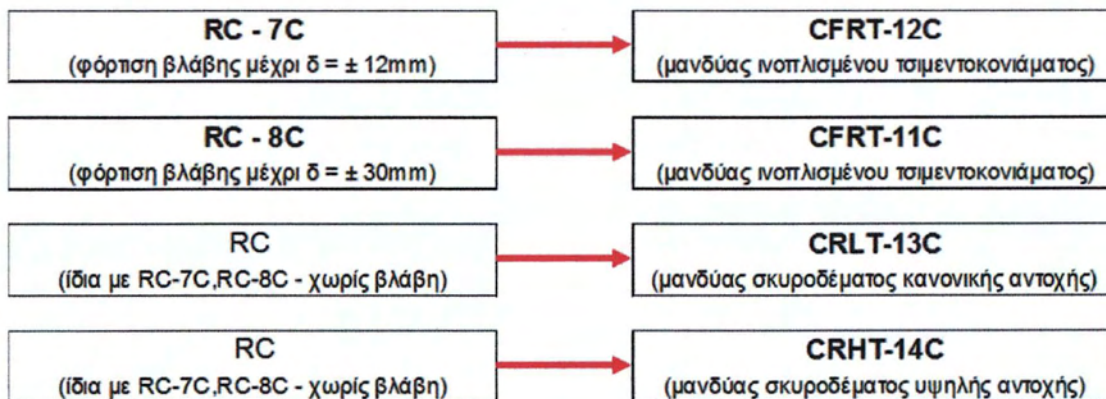
μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} κύκλου της κάθε επιβαλλόμενης παραμόρφωσης ήταν 21% κατά μέσο όρο.

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 διαμήκεις 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 ανακύκλησης. Στις ενισχυμένες δοκούς ο αριθμός των τριχοειδών ρωγμών ήταν αρκετά μεγαλύτερος συγκριτικά με τις συμβατικά σπλισμένες, 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 και ταυτόχρονη απομείωση της αντοχής τους.

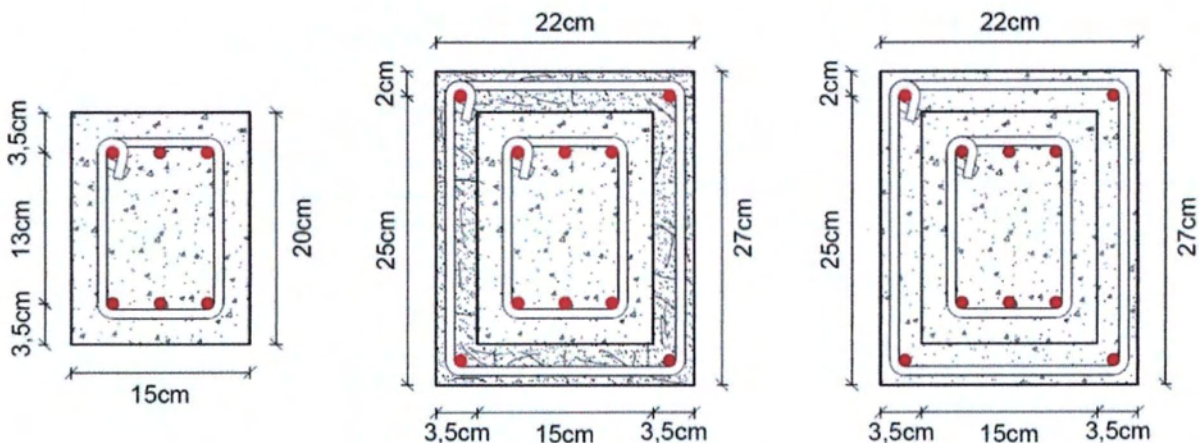
Κεφάλαιο 4 : Λεπτομέρειες δοκιμών και πειραματική διάταξη

4.1. Κατασκευή δοκιμών

Οι αρχικές δοκοί διαστάσεων 15x20x180cm σκυροδετήθηκαν για τις ανάγκες προηγούμενων πειραμάτων (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012). Περιείχαν διαμήκη οπλισμό 3Ø10 πάνω/κάτω και συνδετήρες ΣØ8/10 (Σχήμα 4.1α). Από αυτές τις δοκούς, δύο υποβλήθηκαν σε φόρτιση δημιουργίας βλάβης (δοκίμια RC-7C και RC-8C), ενώ στη συνέχεια ενισχύθηκαν με μανδύα πάχους 3,5 cm από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής (με ονομασία δοκιμών CFRT-12C και CFRT-11C αντίστοιχα). Άλλες δύο δοκοί ενισχύθηκαν απευθείας χωρίς να τους δημιουργηθεί βλάβη, η μία με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος κανονικής αντοχής (CRLT-13C) και η άλλη με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (CRHT-14C). Ο διαμήκης οπλισμός της ενίσχυσης (2Ø10 πάνω/κάτω), ο οπλισμός διάτμησης (ΣØ8/10) αλλά και οι διαστάσεις της διατομής της ενισχυμένης δοκού ήταν ίδιες ανεξάρτητα από το μίγμα (ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα ή συμβατικό σκυρόδεμα). Η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα όλων των οπλισμών των δοκών ήταν 500 MPa (S500).

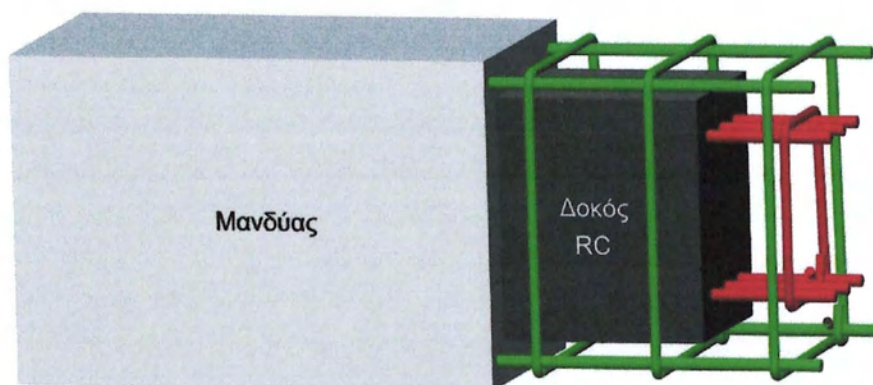


Πίνακας 4.1. Συνοπτικά το πειραματικό πρόγραμμα



Σχήμα 4.1. Διατομή (α) δοκού Ο/Σ, (β) δοκού Ο/Σ με βλάβη ενισχυμένης με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, (γ) δοκού Ο/Σ ενισχυμένης με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος

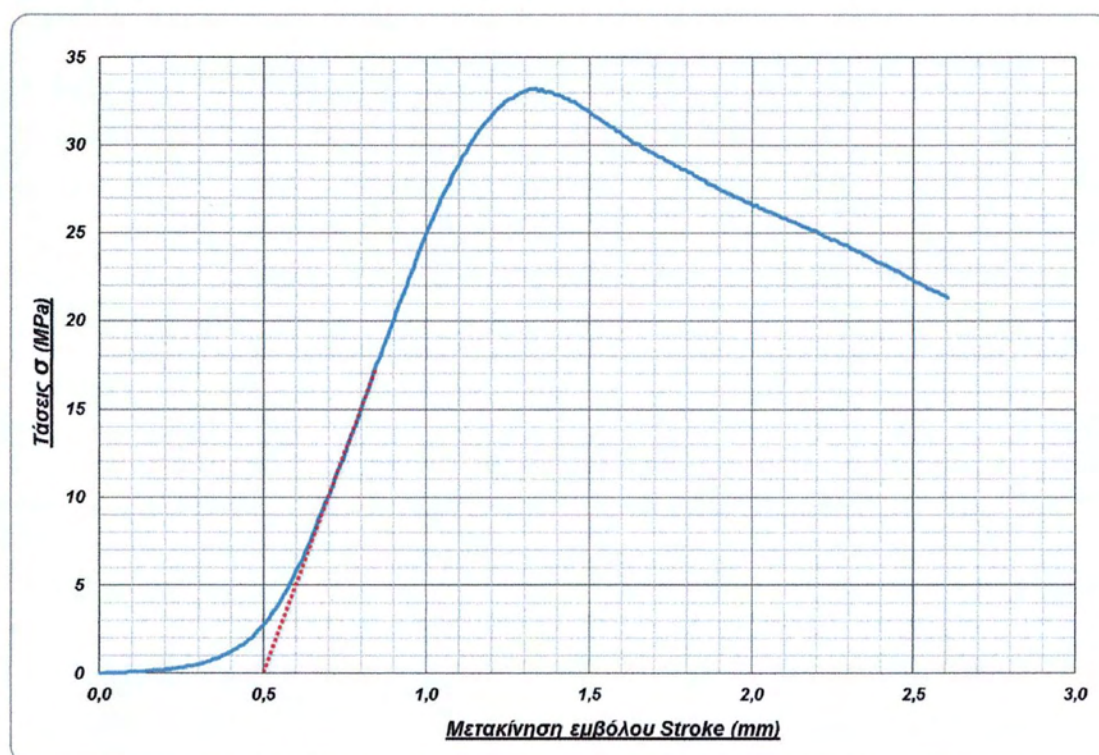
Το πειραματικό πρόγραμμα παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1, ενώ οι διατομές των δοκών και η τομή της ενισχυμένης δοκού στα Σχήματα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2. Τομή ενισχυμένης δοκού

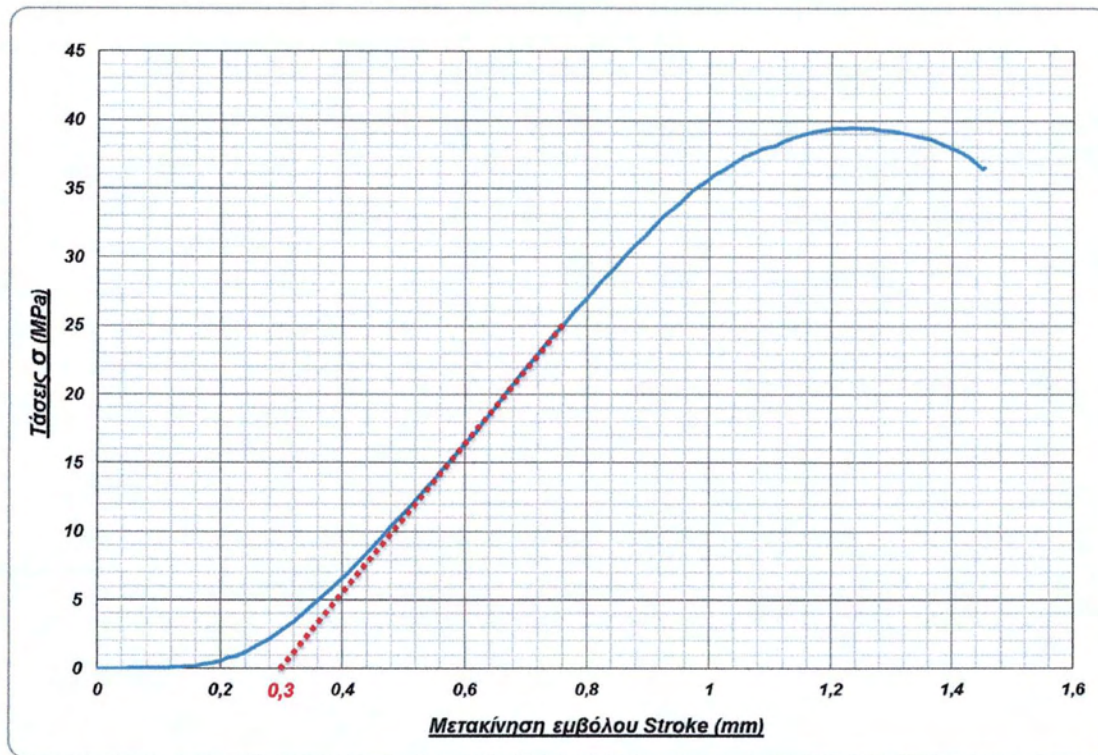
4.1.1. Δοκίμια σκυροδέματος αρχικών δοκών

Όπως προαναφέρεται, οι δοκοί σκυροδετήθηκαν παλαιότερα για τις ανάγκες προηγούμενων πειραμάτων. Κατά τη σκυροδέτησή τους, ελήφθησαν δοκίμια για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής. Μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης, κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και κυλινδρικά διαστάσεων 15,24 x 30,48 cm (6 x 12 in.), υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονο-αξονικής θλίψης, ενώ τις ημέρες που οι δύο δοκοί υποβλήθηκαν σε φόρτιση βλάβης (26 και 27 Φεβρουαρίου 2013), δοκιμάστηκαν άλλα δύο κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm. Τα αποτελέσματα των



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου κυβικού δοκιμίου 28 ημερών σε δοκιμή θλίψης

δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 ενώ τα διαγράμματα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου στα Σχήματα 4.3 και 4.4.



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου κυβικού δοκιμίου RC Cube 8 σε δοκιμή θλίψης την ημέρα της φόρτισης βλάβης

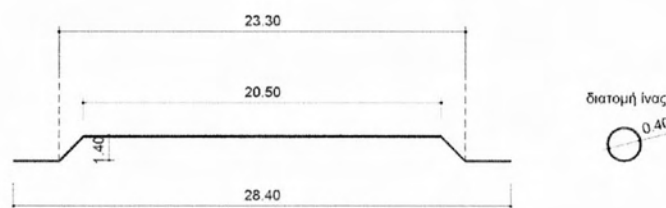
Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα δοκιμών μονο-αξονικής θλίψης κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών

Δοκίμιο	Δοκιμή θλίψης	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
RC Cube 1	28 ημέρες	33,23	33,03
RC Cube 2		33,24	
RC Cube 3		33,11	
RC Cube 4		30,96	
RC Cube 5		32,34	
RC Cube 6		35,31	
RC Cyl.1	28 ημέρες	29,05	25,93
RC Cyl.2		23,51	
RC Cyl.3		25,24	
RC Cube 7	Ημέρα φόρτισης βλάβης	38,89	39,16
RC Cube 8		39,43	

4.1.2. Δοκίμια ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μανδυνών

Στις 15/03/2013 σκυροδετήθηκαν οι μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος πάχους 3,5 cm στις δύο δοκούς με βλάβη, RC-7C και RC-8C. Οι δοκοί τοποθετήθηκαν σε έτοιμους ξυλότυπους διαστάσεων 22x27x180cm, ίδιους με αυτούς του Σχήματος 3.21 (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012), μαζί με τους οπλισμούς της ενίσχυσης. Τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός 2Ø10 στην πάνω και στην κάτω παρειά του μανδύα και οπλισμός διάτμησης δίτμητοι συνδετήρες ΣØ8/10 σε όλο το μήκος της δοκού (Σχήμα 4.1). Για την κατασκευή των μανδυνών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα επί τόπου παρασκευής από την εταιρία Lafarge.

Το τσιμεντοκονίαμα περιείχε λείες ίνες χάλυβα κυκλικής διατομής με κεκαμμένα άκρα (hooked end) σε ογκομετρικό ποσοστό $V_f = 0,8\%$ και ποσότητα 63,1 gr/lit. Οι ονομαστικές τιμές του μήκους των ινών ήταν 28,4 mm, της διαμέτρου τους 0,4 mm και ο λόγος μήκους προς διάμετρο $l/d = 71$ (Σχήμα 4.5). Η εφελκυστική τάση αντοχής των ινών ήταν μεγαλύτερη των 1400 MPa.



Σχήμα 4.5. Σχήμα και διαστάσεις των ινών του τσιμεντοκονιάματος (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Η σύνθεση του τσιμεντοκονιάματος αποφασίστηκε μετά από δοκιμαστικές σκυροδετήσεις κυβικών δοκιμίων και πειραματικές δοκιμές μονο-αξονικής θλίψης. Για τη σκυροδέτηση του ινοπλισμένου μανδύα της δοκού RC-8C, αναμείχθηκαν 149 kg έτοιμου ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με 15 kg νερό (9,1% του συνολικού μίγματος) και 725 gr ρευστοποιητή (0,44% του συνολικού μίγματος). Η ανάμειξη των υλικών έγινε σε αναδευτήρα και το αποτέλεσμα αυτής ήταν περίπου 68,64 lt μίγματος. Για τη σκυροδέτηση του μανδύα της δοκού RC-7C, αναμείχθηκαν τα συστατικά με τις ίδιες ακριβώς αναλογίες, με τη μόνη διαφορά την προσθήκη μικρής ποσότητας νερού παραπάνω κατά τη διάρκεια της ανάδευσης, χωρίς να αλλοιωθούν οι αναλογίες του μίγματος. Το μίγμα τοποθετήθηκε στους ξυλότυπους με ελάχιστη δόνηση (λόγω της χαμηλής του εργασιμότητας) και η επιφάνεια εξομαλύνθηκε προσεκτικά.

Πριν τη σκυροδέτηση των μανδυνών, δεν πραγματοποιήθηκε επισκευή οποιασδήποτε μορφής, δηλαδή οι μανδύες σκυροδετήθηκαν απευθείας. Αυτό συνέβη για να δοθεί έμφαση στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου ενίσχυσης, χωρίς την επιρροή άλλων παραγόντων.

Οι μόνες ενέργειες για την προετοιμασία της σκυροδέτησης ήταν η απομάκρυνση του αποδιοργανωμένου σκυροδέματος των δοκών με βλάβη, ο επιμελής καθαρισμός τους και η διαβροχή των επιφανειών τους πριν τη σκυροδέτηση.

Σε περίπτωση που απαιτούνταν ακόμα καλύτερη απόδοση των ενισχυμένων δοκών, οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν λόγω της φόρτισης βλάβης, θα μπορούσαν να επισκευαστούν με τη χρήση εποξειδικών ρητινών (ρητινενέσεις). Για την καλύτερη πρόσφυση μεταξύ του σκυροδέματος των αρχικών δοκών και του τσιμεντοκονιάματος (της ενίσχυσης), η πιο συνηθισμένη και απλούστερη μέθοδος είναι η εκτράχυνση της επιφάνειας των δοκών με αμμοβολή (μερικά χιλιοστά). Τέλος, η πιο αποδοτική λύση για τη μονολιθική συμπεριφορά του μανδύα και των αρχικών δοκών (εσωτερικών) είναι η τοποθέτηση βλήτρων στις διεπιφάνειες, ωστόσο αυξάνει το κόστος της ενίσχυσης. Άλλωστε, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3, πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι στην περίπτωση ινοπλισμένων μανδύων υψηλής αντοχής δεν απαιτούνται βλήτρα.

Κατά τη σκυροδέτηση των μανδύων ελήφθησαν δύο κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και δύο κυλινδρικά διαστάσεων 152,4 x 304,8 mm (6 x 12 in.) για τον υπολογισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής αντίστοιχα. Οι δύο κύβοι δοκιμάστηκαν σε θλίψη μετά από ωρίμανση 28 ημερών, ενώ οι δύο κύλινδροι υποβλήθηκαν σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Splitting test) τις ημέρες δοκιμών των ενισχυμένων με ινοπλισμένο μανδύα δοκών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C496. Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού στον Πίνακα 4.4. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζονται τα τυπικά διαγράμματα θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων αντίστοιχα, σε συνάρτηση με τη μετακίνηση του εμβόλου (Stroke).

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κυβικών δοκιμών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CFRT Cube 1	15/03/2013	12/04/2013	28	74,33	74,49
CFRT Cube 2				74,64	

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού κυλινδρικών δοκιμών ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

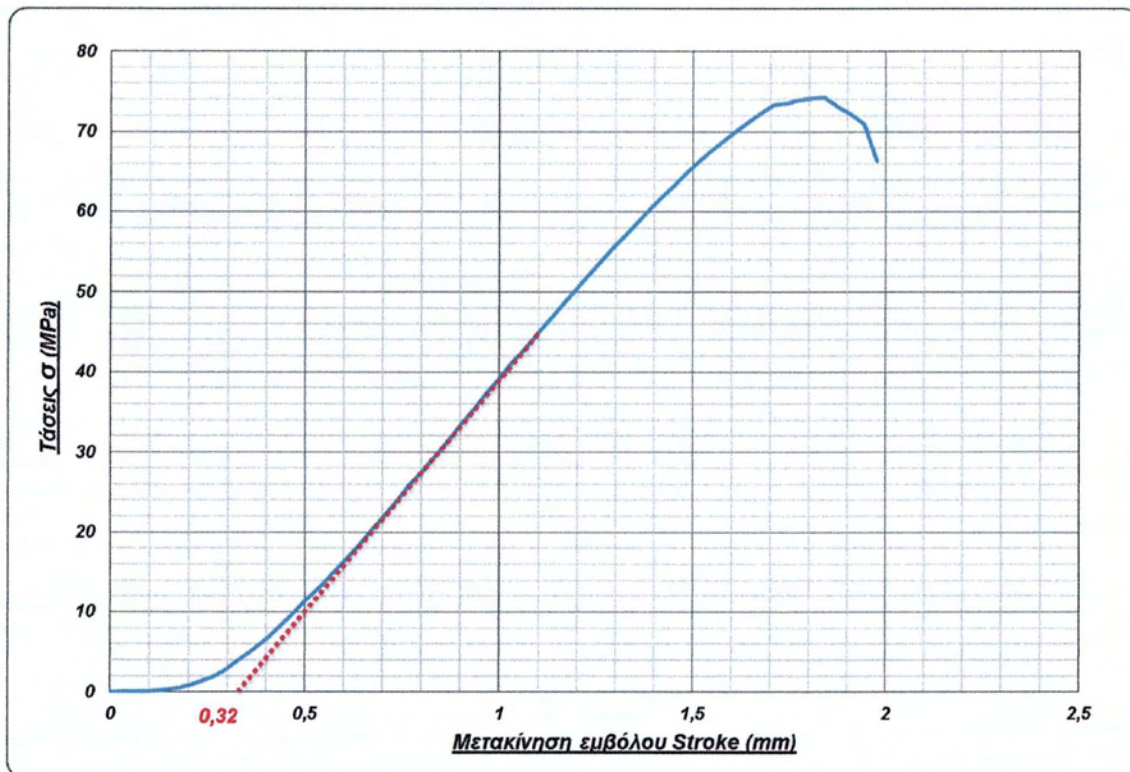
Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CFRT Cyl.1	15/03/2013	30/05/2013	76	7,25	6,87
CFRT Cyl.2				6,48	



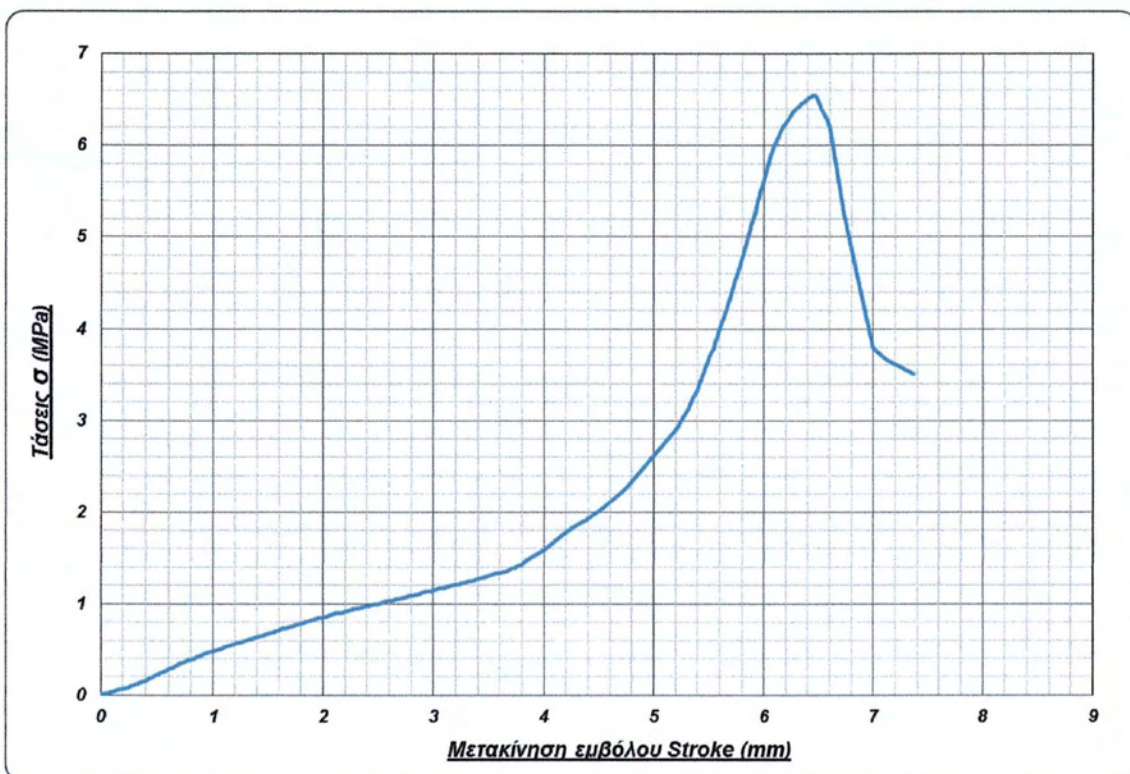
Σχήμα 4.6. Δοκοί με βλάβη RC-7C και RC-8C τοποθετημένες στους ξυλότυπους μαζί με τους οπλισμούς της ενίσχυσης, έτοιμες για σκυροδέτηση του μανδύα



Σχήμα 4.7. Σκυροδέτηση μανδυνών CFRT-11C και CFRT-12C



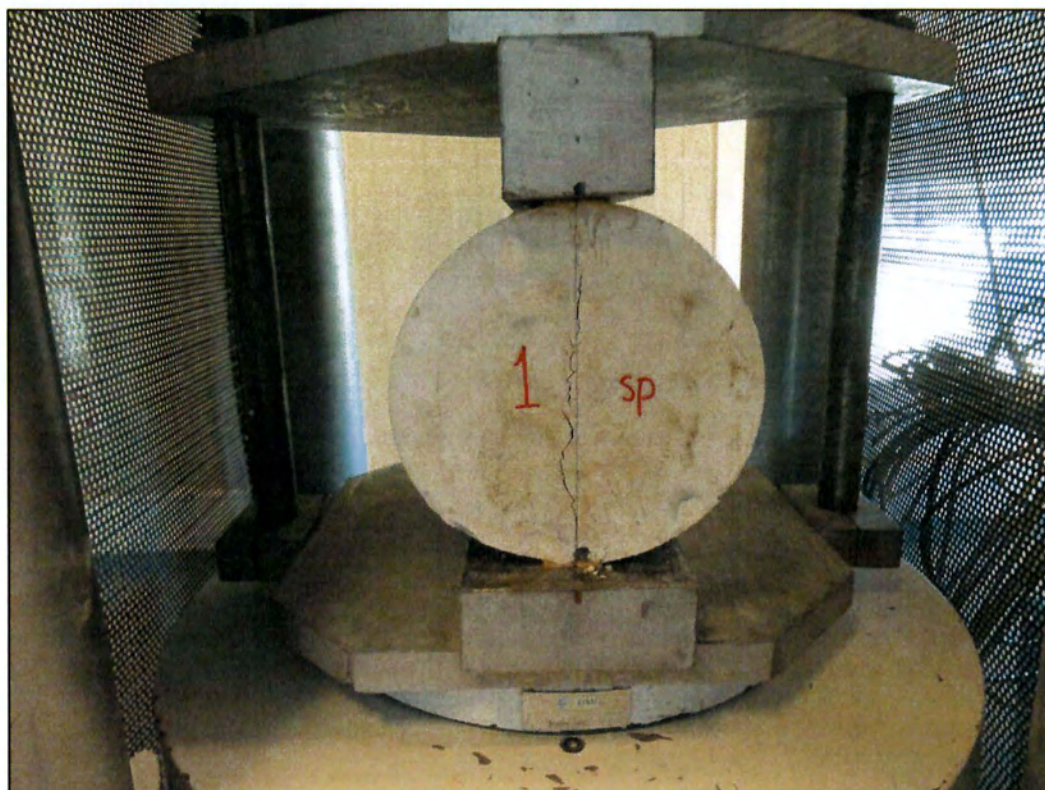
Σχήμα 4.8. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου σε δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου CFRT Cube 1



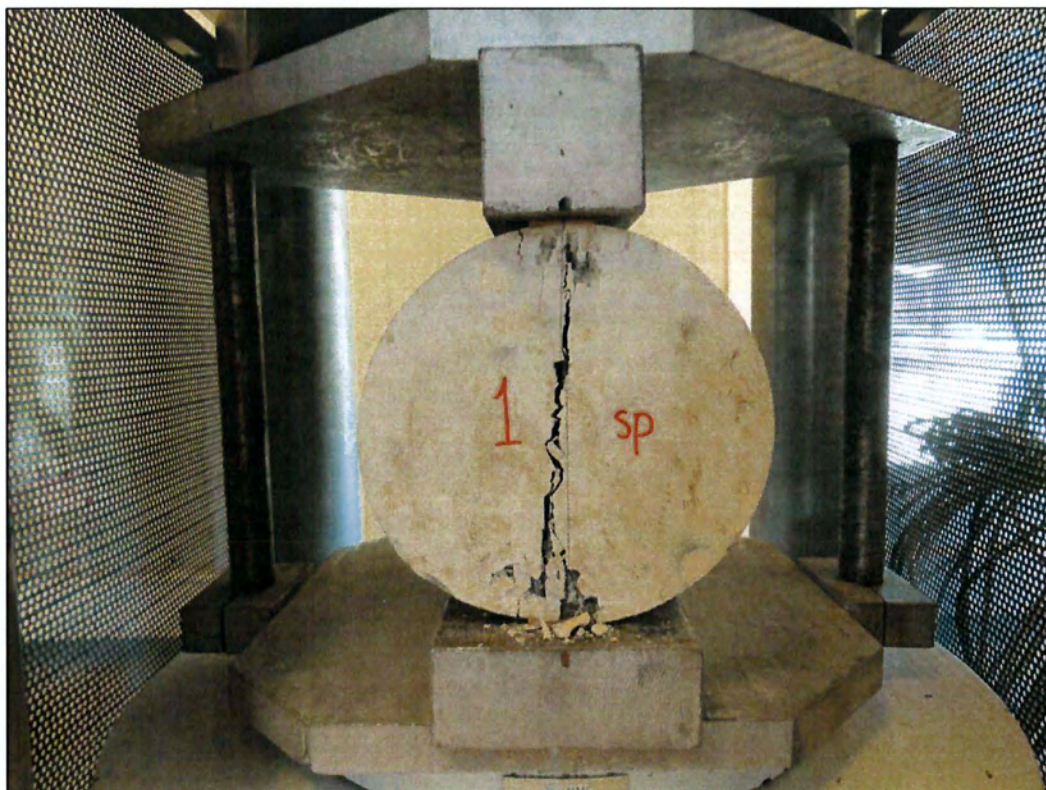
Σχήμα 4.9. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου CFRT Cyl.2.



Σχήμα 4.10. Κυλινδρικό δοκίμιο FRC Cyl.1 πριν τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού



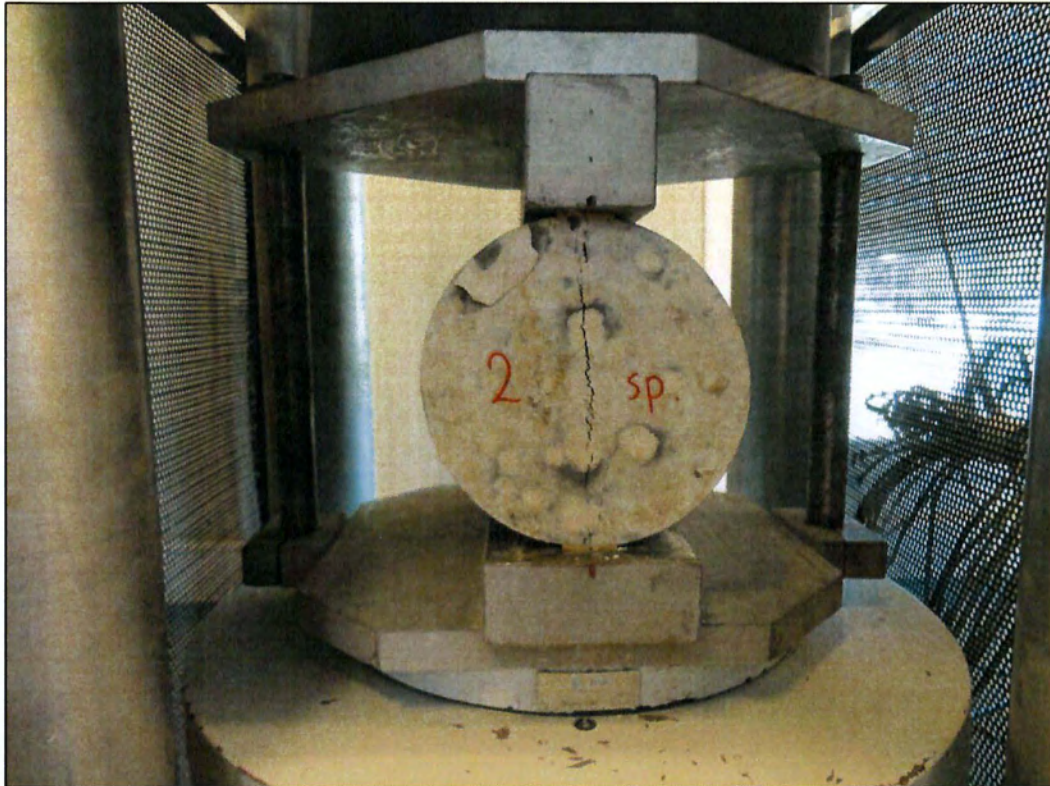
Σχήμα 4.11. Δημιουργία ρωγμής στο κυλινδρικό δοκίμιο FRC Cyl.1 κατά τη διάρκεια της δοκιμής



Σχήμα 4.12. Φωτογραφία κυλινδρικού δοκιμίου FRC Cyl.1 στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 4.13. Κυλινδρικό δοκίμιο FRC Cyl.2 πριν τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού



Σχήμα 4.14. Δημιουργία ρωγμής στο κυλινδρικό δοκίμιο FRC Cyl.2 κατά τη διάρκεια της δοκιμής



Σχήμα 4.15. Φωτογραφία κυλινδρικού δοκιμίου FRC Cyl.2 στο τέλος της φόρτισης

4.1.3. Δοκίμια σκυροδέματος μανδύων κανονικής και υψηλής αντοχής

Στις 16 Απριλίου 2013, δύο δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος (χωρίς βλάβη) ενισχύθηκαν απευθείας με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος πάχους 3,5 cm, ο ένας από σκυρόδεμα κανονικής αντοχής και ο άλλος από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Οι αναλογίες των υλικών (ανά m³) για την παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής προέκυψαν μετά από δοκιμαστικές σκυροδετήσεις και δοκιμές θλίψης κυβικών δοκιμών ως εξής:

- 520 kg Τσιμέντο Portland αντοχής 42,5 MPa
- 1656 kg Αδρανή με κοκκομετρική διαβάθμιση:
 - 4 ÷ 8 mm : 22,42 kg (1,35%)
 - 4 ÷ 5 mm : 85,94 kg (5,2%)
 - 2 ÷ 4 mm : 683 kg (41,24%)
 - 1 ÷ 2 mm : 326,1 kg (19,69%)
 - 0,5 ÷ 1mm : 171,84 kg (10,38%)
 - < 0,5 mm : 366,7 kg (22,14%) των συνολικών αδρανών
- 218 kg Νερό (λόγος N/T = 0,42)
- 6 kg Ρευστοποιητής (1,15% του τσιμέντου)

Δηλαδή, το ειδικό βάρος του τελικού μίγματος ήταν: $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$

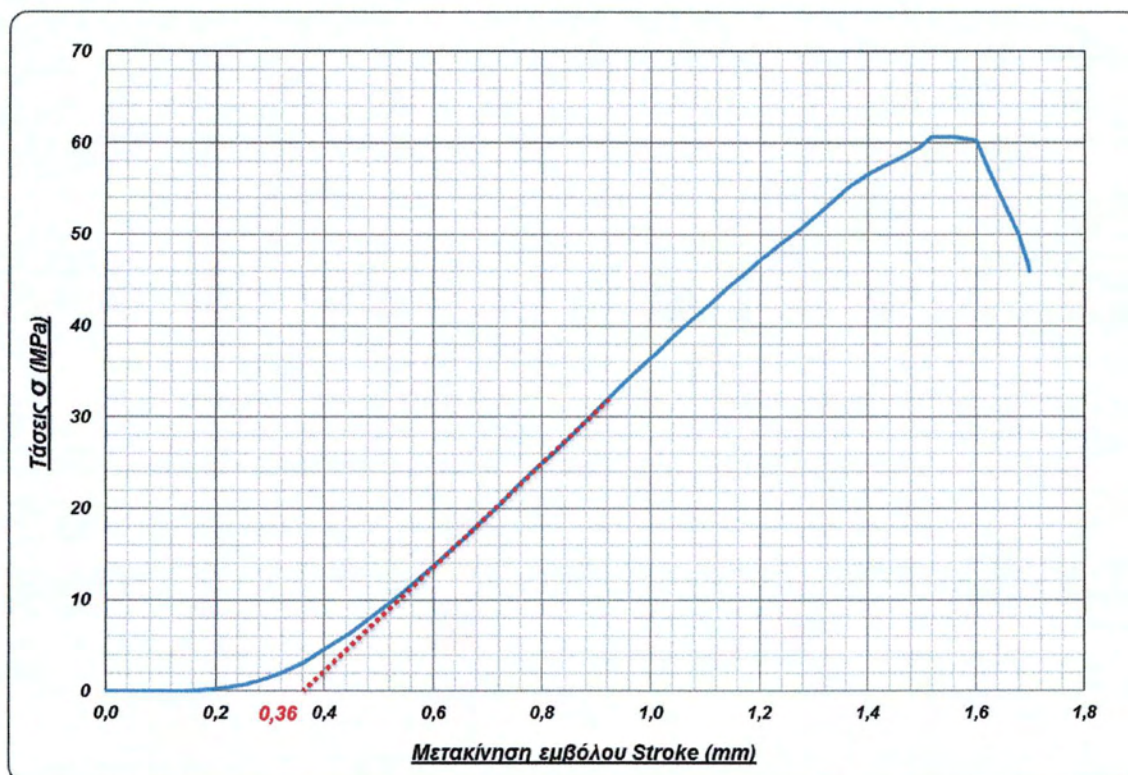
Κατά τη σκυροδέτηση του μανδύα ελήφθησαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και κυλινδρικά διαστάσεων 152,4 x 304,8 mm (διάμετρος x ύψος) για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του μίγματος. Οι ημερομηνίες δοκιμών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 4.5 και 4.6, ενώ διαγράμματα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου των δοκιμών στα Σχήματα 4.16, 4.17 και 4.18.

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κυβικών δοκιμών σκυροδέματος υψηλής αντοχής

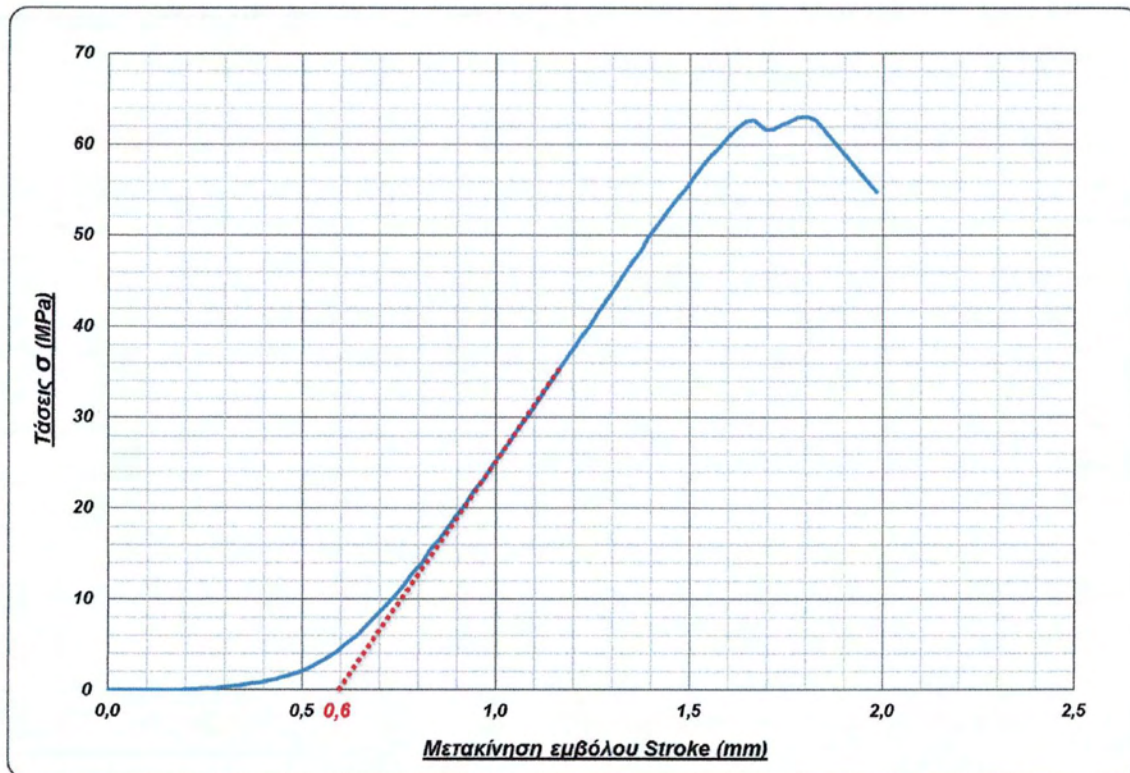
Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CRHT Cube 1	16/04/2013	14/05/2013	28	60,65	60,83
CRHT Cube 2				61	
CRHT Cube 3		04/06/2013	49	69,34	66,28
CRHT Cube 4				66,4	
CRHT Cube 5				63,1	

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος υψηλής αντοχής

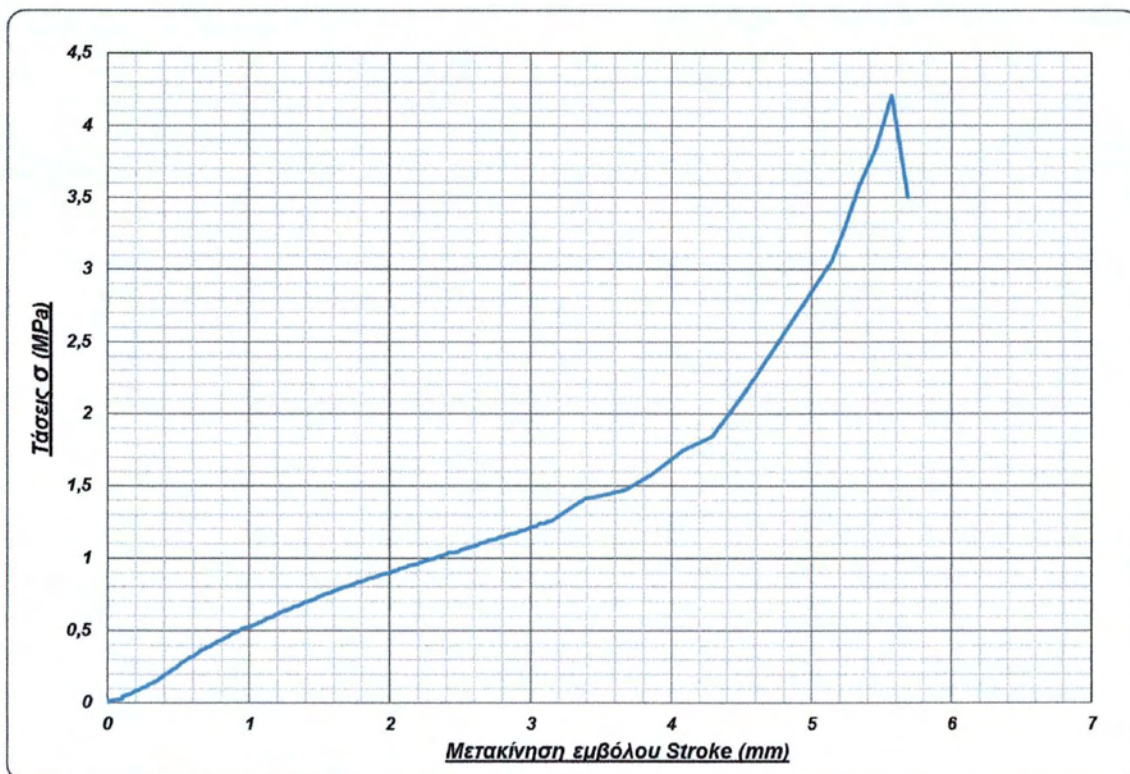
Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CRHT Cyl.1	16/04/2013	04/06/2013	49	3,61	3,79
CRHT Cyl.2				4,21	
CRHT Cyl.3				3,54	



Σχήμα 4.16. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής θλίψης κυβικού δοκιμίου CRHT Cube 1 μετά από ωρίμανση 28 ημερών



Σχήμα 4.17. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής θλίψης κυβικού δοκιμίου CRHT Cube 5 μετά από ωρίμανση 49 ημερών



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού δοκιμίου CRHT Cyl. 2 μετά από ωρίμανση 49 ημερών

Οι αναλογίες των υλικών (ανά m^3) για την παραγωγή σκυροδέματος κανονικής αντοχής ήταν:

- 300 kg Τσιμέντο Portland αντοχής 42,5 MPa
- 1754 kg Αδρανή με κοκκομετρική διαβάθμιση:
 - 4 ÷ 8 mm : 23,74 kg (1,35%)
 - 4 ÷ 5 mm : 91 kg (5,2%)
 - 2 ÷ 4 mm : 723,24 kg (41,23%)
 - 1 ÷ 2 mm : 345,8 kg (19,71%)
 - 0,5 ÷ 1mm : 181,96 kg (10,37%)
 - < 0,5 mm : 388,26 kg (22,14%) των συνολικών αδρανών
- 195 kg Νερό (λόγος N/T = 0,65)
- 1,5 kg Ρευστοποιητής (0,5% του τσιμέντου)

Δηλαδή, το ειδικό βάρος του τελικού μίγματος ήταν: $\gamma = 2251 \text{ kg/m}^3$

Κατά τη σκυροδέτηση του μανδύα ελήφθησαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και κυλινδρικά διαστάσεων 152,4 x 304,8 mm (διάμετρος x ύψος) για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του μίγματος. Οι ημερομηνίες δοκιμών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 4.7 και 4.8, ενώ διαγράμματα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου των δοκιμών στα Σχήματα 4.19, 4.20 και 4.21.

Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κυβικών δοκιμών σκυροδέματος χαμηλής αντοχής

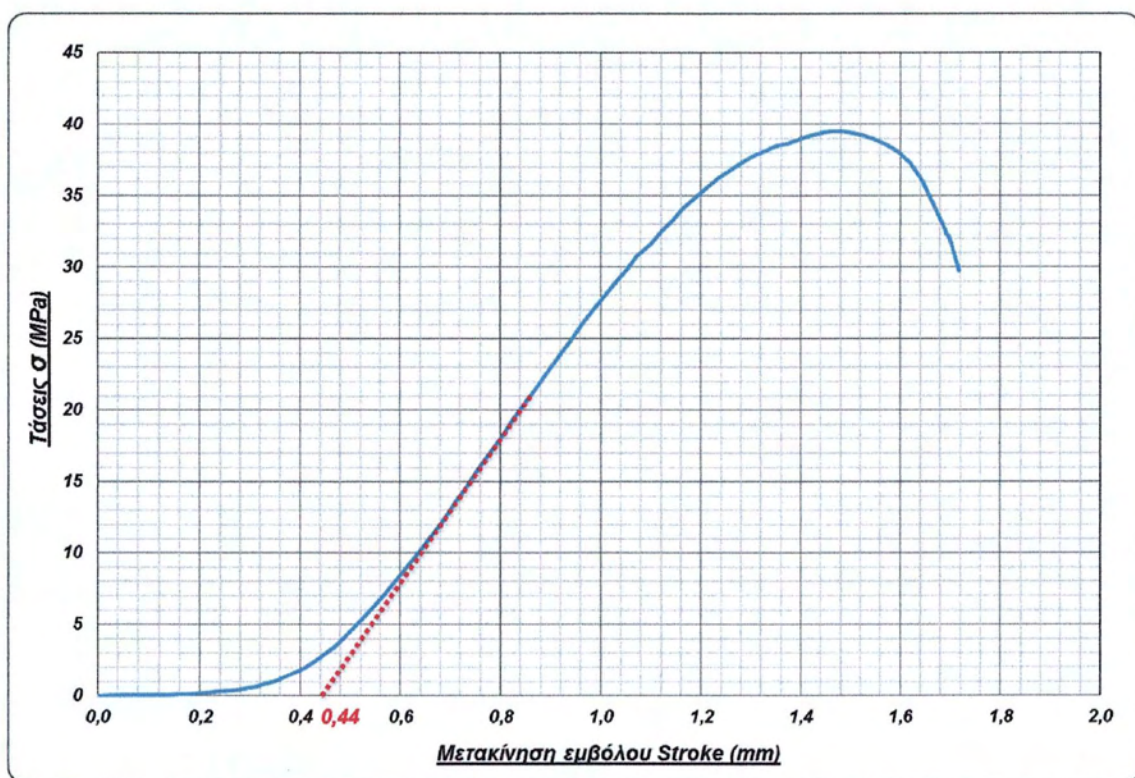
Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CRLT Cube 1	16/04/2013	14/05/2013	28	34,84	34,45
CRLT Cube 2				34,05	
CRLT Cube 3		31/05/2013	45	41,36	40,31
CRLT Cube 4				39,50	
CRLT Cube 5				40,08	

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος χαμηλής αντοχής

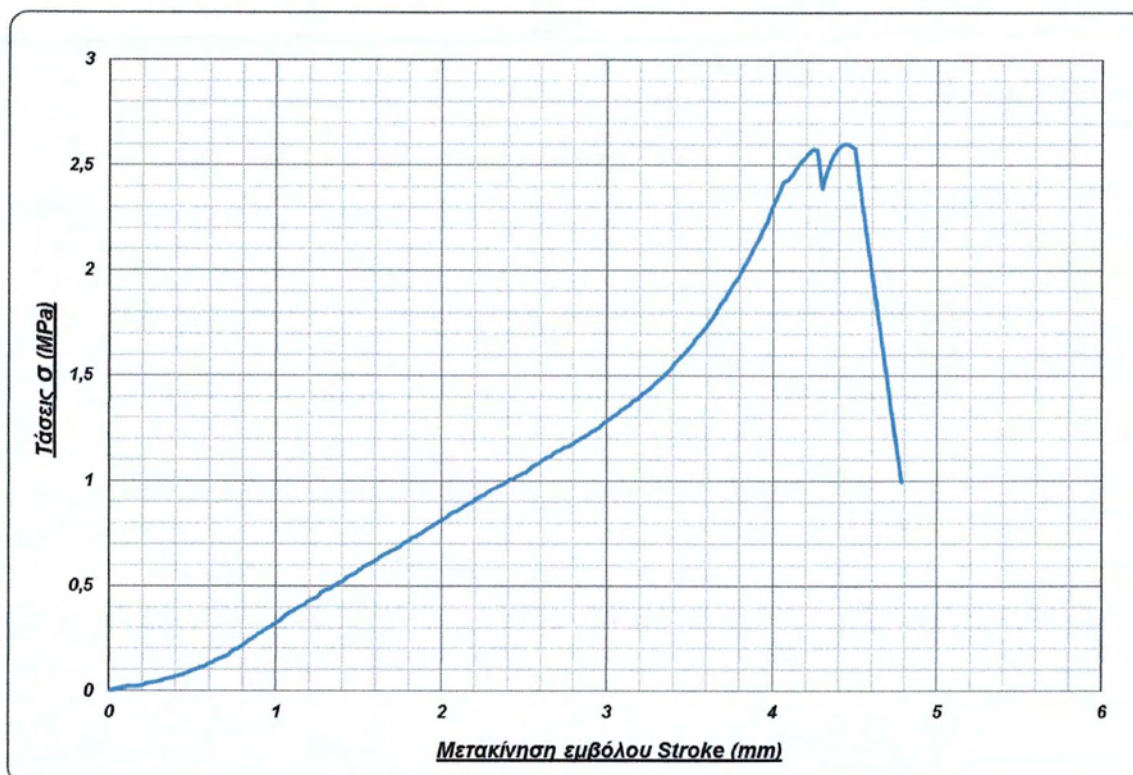
Δοκίμιο	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία δοκιμής	Μέρες ωρίμανσης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέσος όρος αντοχών (MPa)
CRLT Cyl.1	16/04/2013	03/06/2013	48	2,88	2,9
CRLT Cyl.2				3,22	
CRLT Cyl.3				2,60	



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής θλίψης κυβικού δοκιμίου CRLT Cube 2 μετά από ωρίμανση 28 ημερών



Σχήμα 4.20. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής θλίψης κυβικού δοκιμίου CRLT Cube 4 μετά από ωρίμανση 45 ημερών



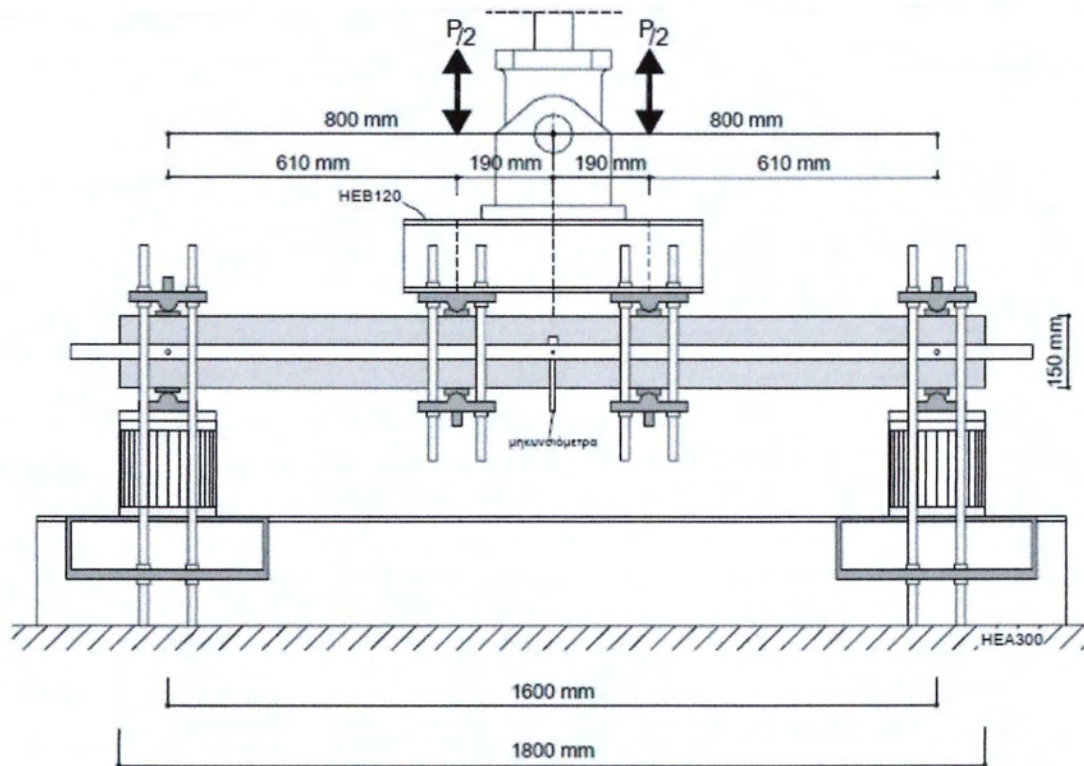
Σχήμα 4.21. Διάγραμμα τάσεων – μετακίνησης εμβόλου δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού δοκιμίου CRLT Cyl. 3 μετά από ωρίμανση 48 ημερών

4.2. Πειραματική διάταξη

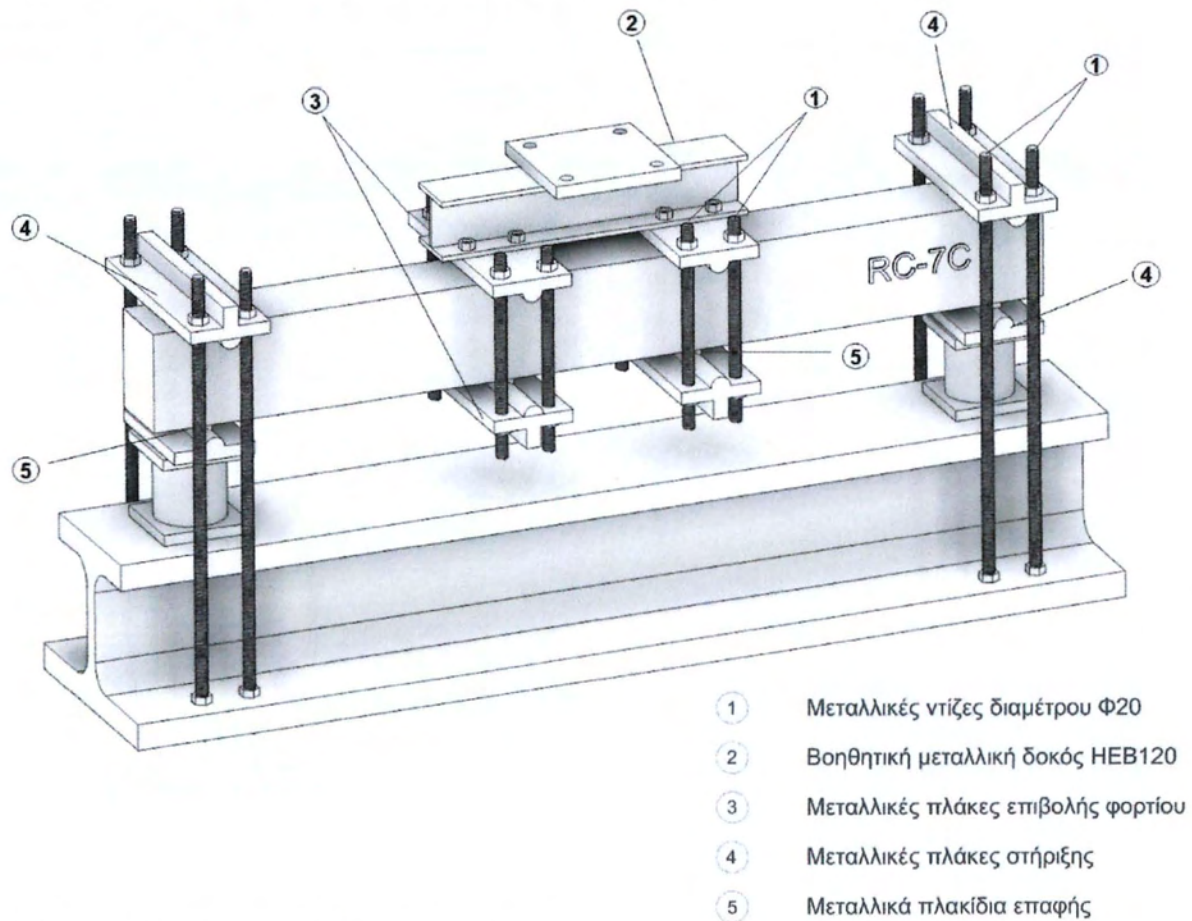
Όλες οι δοκοί που εξετάστηκαν υποβλήθηκαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων. Η στήριξη των δοκών ήταν αμφιέριστη, με καθαρό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων 1,60 m.

Η φόρτιση των δοκών έγινε με σερβουδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου MTS και με έλεγχο του βέλους κάμψης. Το φορτίο επιβαλλόταν σε δύο σημεία σε απόσταση 19 cm εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος των δοκών μέσω μιας βοηθητικής μεταλλικής δοκού HEB 120 και δύο μεταλλικών πλακών στο κάτω μέρος της. Η βοηθητική μεταλλική δοκός ενώθηκε με το έμβολο επιβολής φορτίου με τέσσερις ντίζες Ø24 σε μεταλλική πλάκα διαστάσεων 25,3 x 25,3 x 2,5 cm στο πάνω πέλμα της.

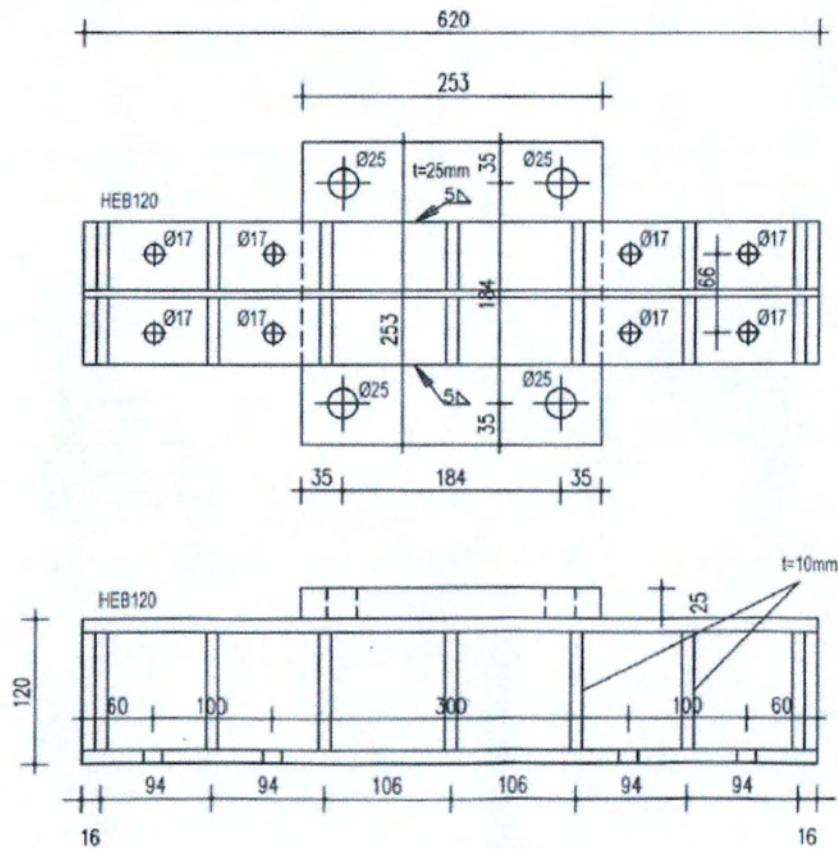
Για την ανακύκλωση της επιβαλλόμενης φόρτισης (αρνητική ροπή), τέσσερις ντίζες διαμέτρου Ø20 και μήκους 45 cm συγκρατούσαν την κάθε μία από τις δύο πλάκες με δύο άλλες ίδιου σχήματος και διαστάσεων, οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στις ίδιες θέσεις αλλά στο κάτω μέρος της δοκού και έρχονταν σε επαφή μαζί της μέσω δύο πλακιδίων ίδιων με αυτά που είχαν τοποθετηθεί στα αντίστοιχα σημεία στο πάνω τμήμα της δοκού. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στα σχήματα που ακολουθούν.



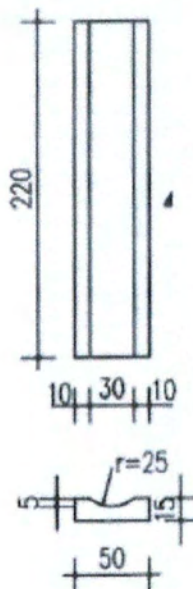
Σχήμα 4.22. Πειραματική διάταξη (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



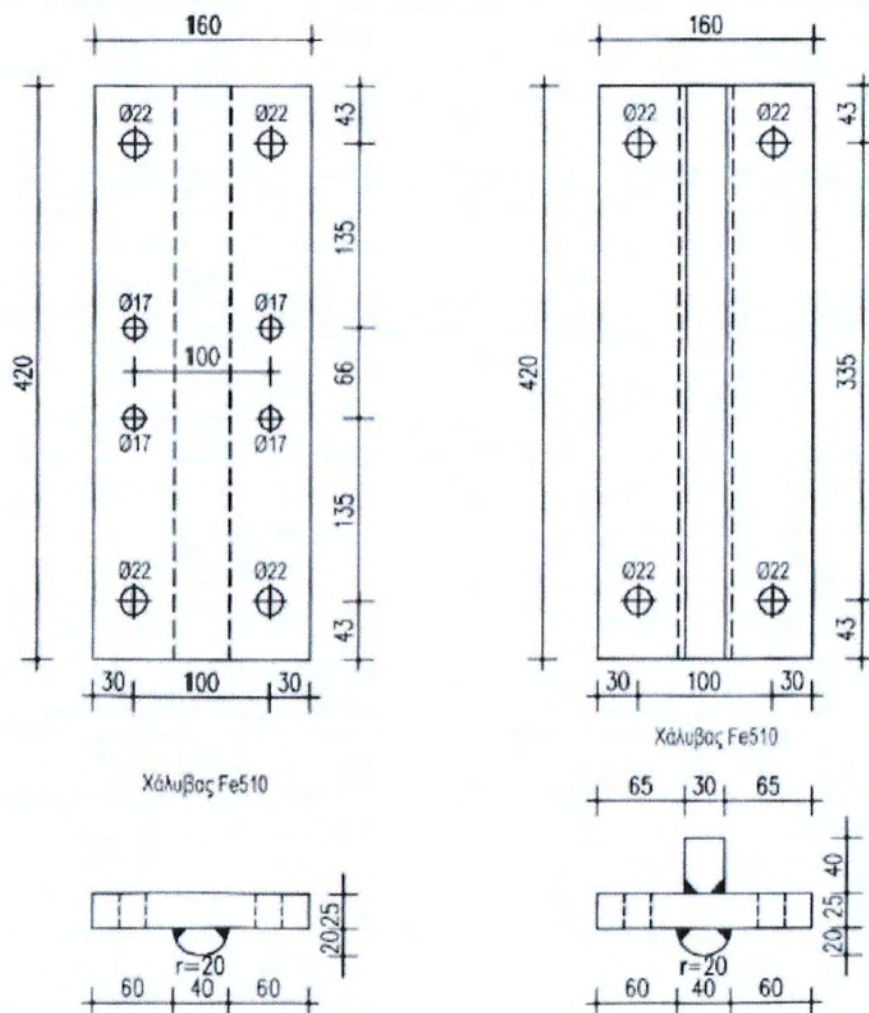
Σχήμα 4.23. Τα επιμέρους τμήματα της διάταξης



Σχήμα 4.24. Βοηθητική μεταλλική δοκός HEB 120 (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



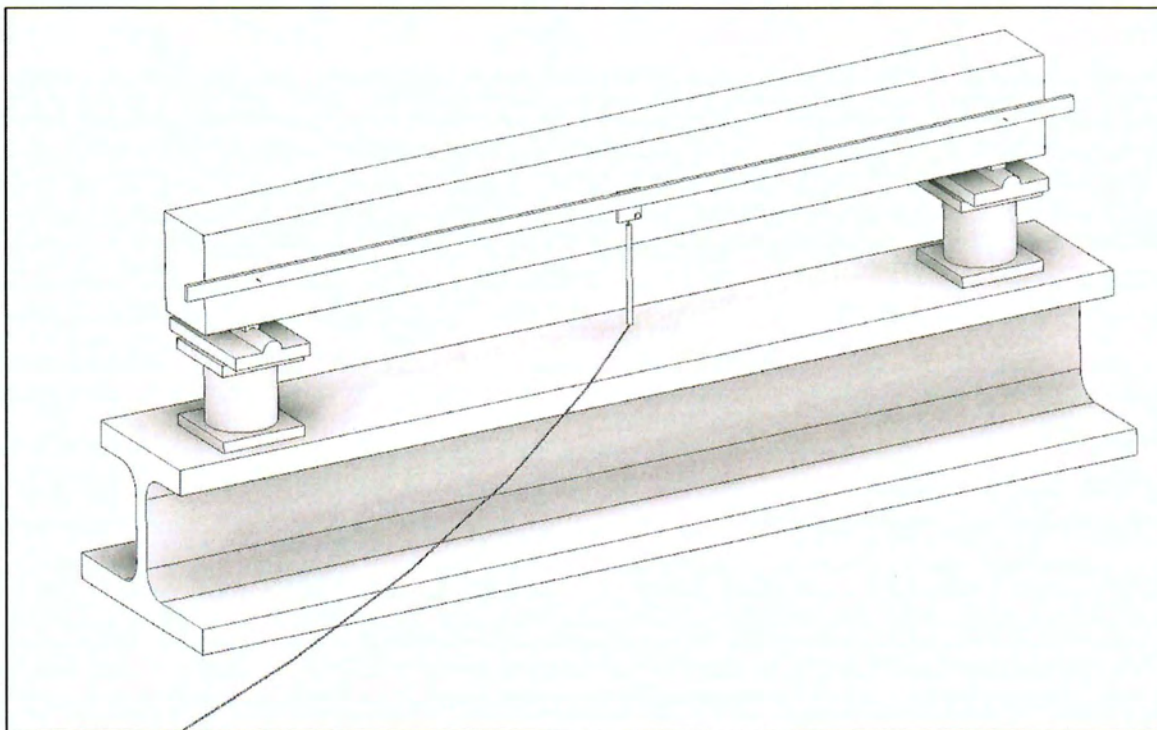
Σχήμα 4.25. Μεταλλικά πλακίδια επαφής (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)



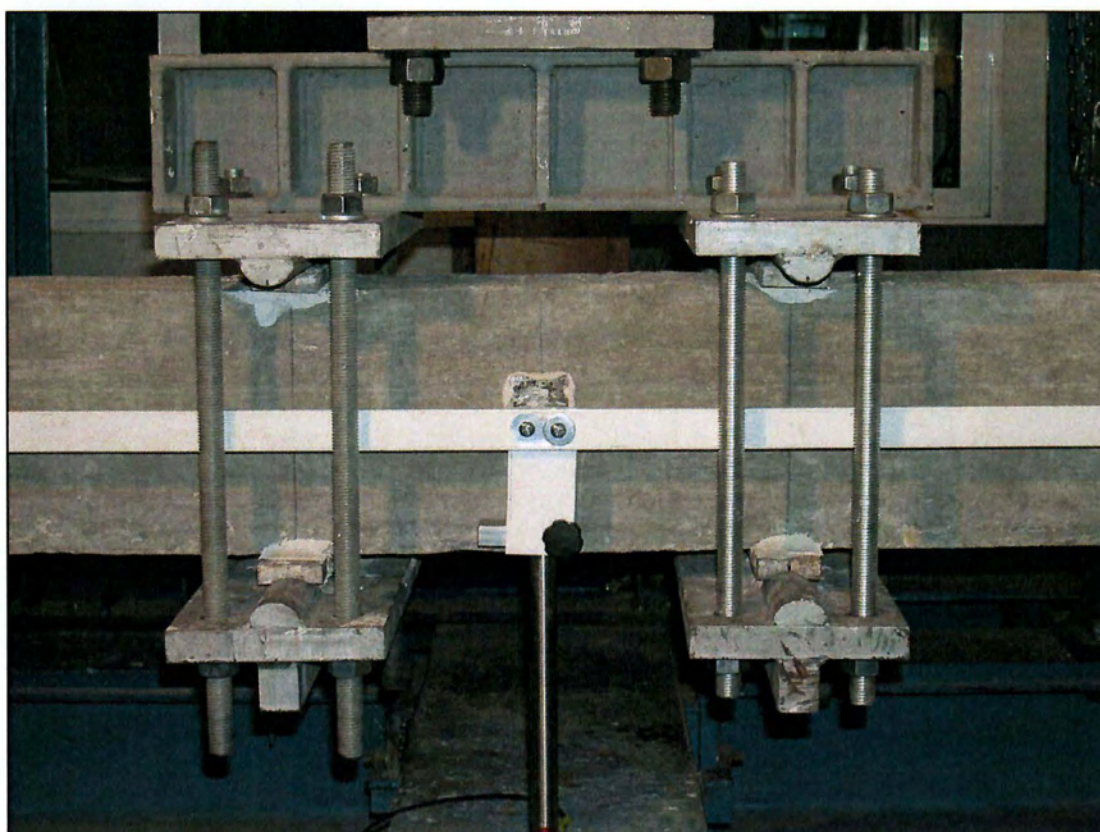
Σχήμα 4.26. Μεταλλικές πλάκες επιβολής φορτίου (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Για την καταγραφή του βέλους κάμψης, τοποθετήθηκαν δύο μηχανισιόμετρα DCDT στο μέσο του ανοίγματος με τη βοήθεια δύο αμφίρειστων δοκών αλουμινίου διαστάσεων 200 x 1,5 x 3 cm, οι οποίες στηρίχθηκαν σε μεταλλικές ράβδους Ø8 εγκάρσια τοποθετημένες σε ειδικές σπές στη θέση στηρίξεων των δοκών, στο μέσο του ύψους της διατομής (Σχήμα 4.27). Οι κεφαλές των μηχανισιόμετρων στηρίζονταν σε μεταλλικές γωνίες που τοποθετήθηκαν στο μέσο του ύψους των δοκιμών στο μέσον του ανοίγματος του δοκιμίου με ειδικό στόκο.

Για τις δοκιμές της μονο-αξονικής θλίψης και του έμμεσου εφελκυσμού των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε πρέσα μονο-αξονικής θλίψης DMG 3000 kN με αυτόματο σύστημα ελέγχου και καταγραφής των μετρήσεων (Σχήμα 4.30).



Σχήμα 4.27. Τοποθέτηση των μηχανοσκόπευτων



Σχήμα 4.28. Φωτογραφία της διάταξης στο μέσο της δοκού



Σχήμα 4.29. Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης

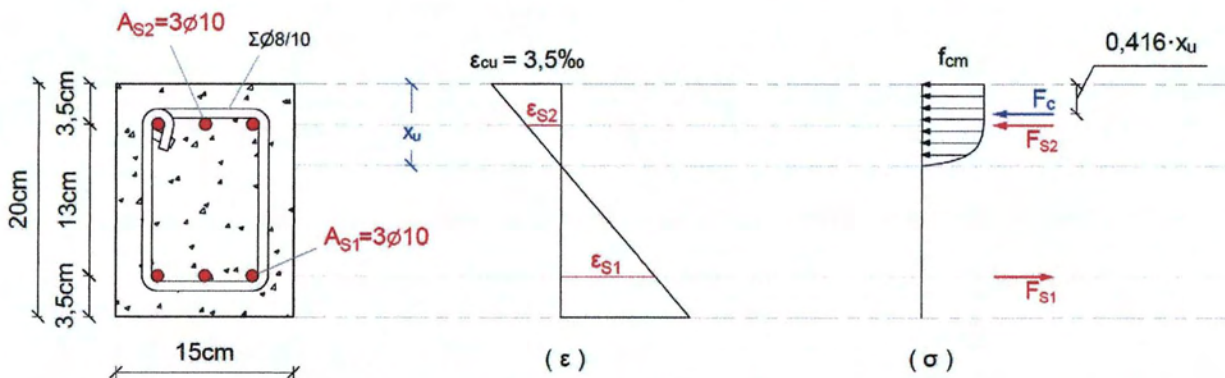


Σχήμα 4.30. Η πρέσα μονο-αξονικής θλίψης DMG (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012)

Κεφάλαιο 5 : Θεωρητική ανάλυση δοκών

5.1 Ανάλυση αρχικών δοκών Ο/Σ (RC)

5.1.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού



Σχήμα 5.1. Διαγράμματα παραμορφώσεων (ϵ) και τάσεων (σ) στην οριακή κατάσταση αστοχίας της κρίσιμης διατομής στο μέσο της δοκού

Την ημέρα της δοκιμής, η θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος ακμής 150 mm μετρήθηκε κατά μέσο όρο $f_{cm, cube} = 39,16$ MPa. Με γραμμική παρεμβολή από τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος (Ευρωκώδικας 2), υπολογίζεται ότι η αντίστοιχη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου είναι $f_{cm} = 31,35$ MPa.

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\epsilon_{S1} = \frac{0,0035 \cdot (d - x_u)}{x_u} \quad (1)$$

$$\epsilon_{S2} = \frac{0,0035 \cdot (x_u - d_2)}{x_u} \quad (2)$$

Η ισορροπία εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων, υποθέτοντας ότι διαρρέει ο εφελκυσμένος οπλισμός της δοκού ενώ ο θλιβόμενος δεν διαρρέει, γράφεται ως εξής:

$$F_{S1} = F_c + F_{S2} \Rightarrow A_{S1} \cdot f_{yk} = 0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{S2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{S2} \Rightarrow$$

$$2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^3 = 0,81 \cdot 31,35 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot x_u + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,0035 \cdot (x_u - 0,035)}{x_u} \Rightarrow$$

$$3809,03 \cdot x_u^2 + 47,2 \cdot x_u - 5,78 = 0$$

Από την επίλυση της δευτεροβάθμιας εξίσωσης προκύπτει: $x_u = 0,0333$ m

$$(1) \Rightarrow \varepsilon_{S1} = 13,84 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(2) \Rightarrow \varepsilon_{S2} = -0,18 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \quad \text{οπότε η υπόθεση ισχύει}$$

Η καμπτική ροπή αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$M_u = F_c \cdot (d - 0,416 \cdot x_u) + F_{S2} \cdot (d - d_2) \Rightarrow M_u = 18,08 \text{ kNm}$$

Όπου: f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος την ημέρα της δοκιμής

f_{yk} η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

F_c η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

F_{S1} η δύναμη του εφελκυσμένου οπλισμού στην αστοχία

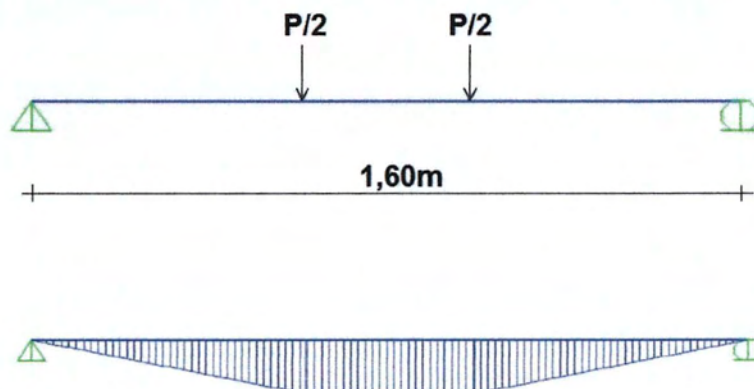
F_{S2} η δύναμη του θλιβόμενου οπλισμού στην αστοχία

A_{S1} το εμβαδό του εφελκυσμένου οπλισμού (3Ø10)

A_{S2} το εμβαδό του θλιβόμενου οπλισμού (3Ø10)

d το στατικό ύψος δοκού

d_1, d_2 η απόσταση του κέντρου των ράβδων από την παρειά της δοκού



Σχήμα 5.2. Διάγραμμα καμπτικών ροπών [M] από τη στατική επίλυση της αμφιέριστης δοκού

Από τη στατική επίλυση της δοκού για τα συγκεντρωμένα φορτία εκατέρωθεν του μέσου και αμελώντας το ίδιο βάρος της δοκού λόγω της μικρής του επιρροής, προκύπτει η μέγιστη ροπή σε συνάρτηση με το φορτίο P . Συνεπώς, το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι: $M_u = 0,61 \cdot \frac{P_u}{2} \Rightarrow P_u = 59,28 \text{ kN}$

5.1.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό των φορτίων ρηγμάτωσης, υπολογίζεται πρώτα η ισοδύναμη διατομή της δοκού. Λόγω της συμμετρίας της διατομής αλλά και των οπλισμών της δοκού, το κέντρο βάρους της διατομής βρίσκεται στο μέσο του ύψους της ($x_1 = h/2$).

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{RC} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 32,31 \text{ GPa}$$

$$\text{Οπότε ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι: } n = \frac{E_s}{E_{RC}} = \frac{200}{32,31} \Rightarrow n = 6,19$$

Η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης διατομής της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n - 1) \cdot A_{S1} \cdot (d - x_1)^2 + (n - 1) \cdot A_{S2} \cdot (x_1 - d_2)^2 \Rightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + (6,19 - 1) \cdot 2,36 \cdot (16,5 - 10)^2 + (6,19 - 1) \cdot 2,36 \cdot (10 - 3,5)^2 \Rightarrow$$

$$I_I = 10000 + 517,5 + 517,5 \Rightarrow I_I = 11035 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης είναι:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_1} = \frac{2,98 \cdot 10^3 \cdot 11035 \cdot 10^{-8}}{0,2 - 0,1} = 3,29 \text{ kNm}$$

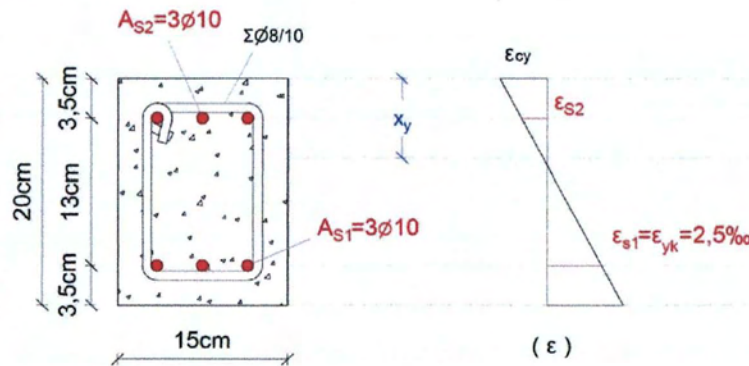
Όπου η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για θλιπτική αντοχή 31,35 MPa είναι:

$$f_{ctm} = 2,98 \text{ MPa}$$

Οπότε το φορτίο ρηγμάτωσης P_{cr} υπολογίζεται:

$$M_{cr} = 0,61 \cdot \frac{P_{cr}}{2} \Rightarrow P_{cr} = 10,79 \text{ kN}$$

5.1.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα



Σχήμα 5.3. Διάγραμμα παραμορφώσεων (ϵ) της κρίσιμης διατομής στο μέσο της δοκού τη στιγμή της πρώτης διαρροής του χάλυβα

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{2,5\text{‰}}{(d - x_y)} \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s2}}{(x_y - d_2)} \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή διαρροής του χάλυβα M_y :

$$F_{S1} = F_C + F_{S2} \Rightarrow A_{S1} \cdot f_{yk} = \alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_y + A_{S2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} \Rightarrow$$

$$2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^3 = \alpha \cdot 31,35 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot x_y + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (x_y - 0,035)}{x_y} \Rightarrow$$

$$4702,5 \cdot \alpha \cdot x_y^2 + 47200 \cdot \epsilon_{cy} \cdot x_y - 1652 \cdot \epsilon_{cy} - 118 \cdot x_y = 0 \quad (5)$$

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

$$k_a = \frac{8 - \epsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \epsilon_{cy})} \quad (7)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (3), (4), (5), (6) και (7) προκύπτει:

$\epsilon_{cy} = 1,08 \text{ ‰}$	$\alpha = 0,4412$	Άρα : $\epsilon_{s1} = 2,5 \text{ ‰}$
$x_y = 0,0496 \text{ m}$	$k_a = 0,3515$	$\epsilon_{s2} = 0,318 \text{ ‰}$

Η καμπτική ροπή διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού χάλυβα είναι:

$$M_y = F_c \cdot (d - k_a \cdot x_y) + F_{s2} \cdot (d - d_2) \Rightarrow M_y = 17,14 \text{ kNm}$$

Οπότε το φορτίο διαρροής P_y υπολογίζεται:

$$M_y = 0,61 \cdot \frac{P_y}{2} \Rightarrow P_y = 56,2 \text{ kN}$$

Πίνακας 5.1. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης της δοκού Ο/Σ

Στάδιο Φόρτισης	Ροπή (kN·m)	Φορτίο (kN)
Ρηγμάτωση	3,29	10,79
Διαρροή	17,14	56,20
Αστοχία	18,08	59,28

5.1.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας

Έλεγχος διατομής έναντι λοξής θλίψης κορμού

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cm} \cdot b_w \cdot z = 0,5 \cdot 0,506 \cdot 31,35 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,9 \cdot 0,165 \Rightarrow V_{Rd,max} = 176,7 \text{ kN}$$

$$\text{Όπου: } v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{cm}}{200}\right) = 0,506$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,max} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 353,35 \text{ kN}$$

Αντοχή δοκού σε τέμνουσα χωρίς οπλισμό διάτμησης

$$V_{Rd,c} = c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_w \cdot d = 0,18 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 9,54 \cdot 10^{-3} \cdot 31,35)^{1/3} \cdot 150 \cdot 165$$

$$\Rightarrow V_{Rd,c} = 27657 \text{ N} \Rightarrow V_{Rd,c} = 27,66 \text{ kN}$$

Όπου: $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 2,1 \leq 2$ και $\rho_{\ell} = \frac{A_{s\ell}}{b \cdot d} = 9,54 \cdot 10^{-3}$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,c} = \frac{P_{\max}}{2} \Rightarrow P_{\max} = 55,32 \text{ kN}$$

Το φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός χωρίς οπλισμό διάτμησης είναι μικρότερο από το φορτίο καμπτικής αστοχίας, το οποίο αποδεικνύει ότι δικαιολογημένα τοποθετήθηκαν συνδετήρες στη δοκό.

Συνεισφορά του οπλισμού διάτμησης στην αντοχή έναντι τέμνουσας

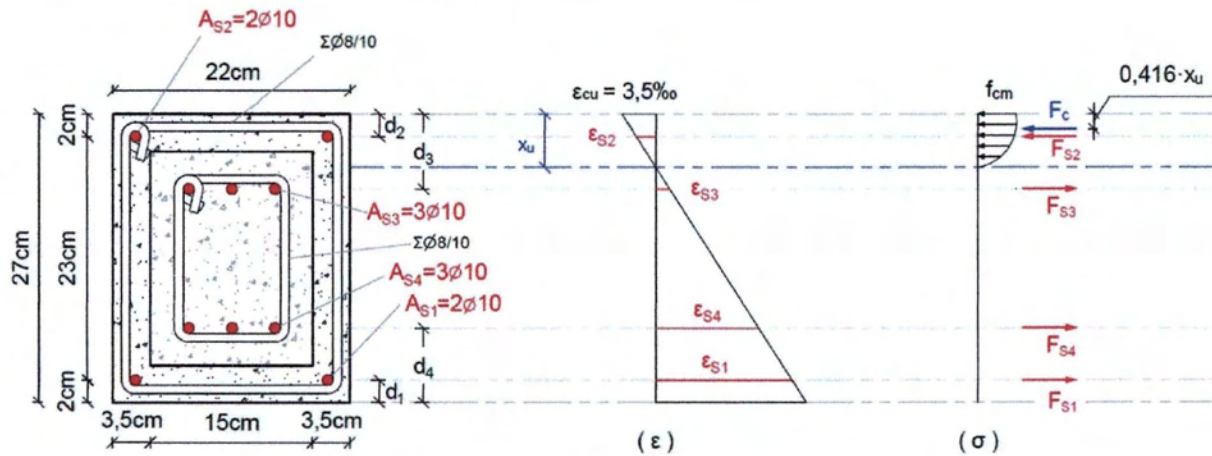
$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yw} \cdot 0,9 \cdot d = \frac{10^{-4}}{0,1} \cdot 0,9 \cdot 0,165 \cdot 500 \cdot 10^3 \Rightarrow V_{Rd,s} = 74,25 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,s} = \frac{P_{\max}}{2} \Rightarrow P_{\max} = 148,5 \text{ kN}$$

5.2 Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος κανονικής αντοχής (CRLT)

5.2.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού



Σχήμα 5.4. Διαγράμματα παραμορφώσεων (ϵ) και τάσεων (σ) στην οριακή κατάσταση αστοχίας της κρίσιμης διατομής στο μέσο της ενισχυμένης δοκού

Γίνεται η υπόθεση (κατά προσέγγιση) ότι η ενισχυμένη δοκός συνδέεται μονολιθικά με την αρχική δοκό (εσωτερική). Την ημέρα της δοκιμής, η θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος ακμής 150 mm μετρήθηκε κατά μέσο όρο $f_{cm, cube} = 40,31$ MPa. Με γραμμική παρεμβολή από τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος (Ευρωκώδικας 2), υπολογίζεται ότι η αντίστοιχη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου είναι $f_{cm} = 32,07$ MPa.

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\epsilon_{S1} = \frac{0,0035 \cdot (d - x_u)}{x_u} \quad (1)$$

$$\epsilon_{S2} = \frac{0,0035 \cdot (x_u - d_2)}{x_u} \quad (2)$$

$$\epsilon_{S3} = \frac{0,0035 \cdot (d_3 - x_u)}{x_u} \quad (3)$$

$$\epsilon_{S4} = \frac{0,0035 \cdot (h - d_4 - x_u)}{x_u} \quad (4)$$

Η ισορροπία εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων, λόγω της μικρής διαφοράς στις θλιπτικές αντοχές των δύο σκυροδεμάτων και υποθέτοντας ότι διαρρέει ο εφελκυσμένος οπλισμός της δοκού (A_{S1} , A_{S4}) ενώ οι υπόλοιποι οπλισμοί (A_{S2} , A_{S3}) δεν διαρρέουν, γράφεται ως εξής:

$$F_c + F_{S2} = F_{S1} + F_{S3} + F_{S4} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
 0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} &= A_{s1} \cdot f_{yk} + A_{s3} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s3} + A_{s4} \cdot f_{yk} \Rightarrow \\
 0,81 \cdot 32,07 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u + 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,0035 \cdot (x_u - 0,02)}{x_u} &= 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^3 + \\
 + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,0035 \cdot (0,07 - x_u)}{x_u} + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^3 &\Rightarrow \\
 5714,87 \cdot x_u^2 + 78,6 \cdot x_u - 13,764 &= 0
 \end{aligned}$$

Από την επίλυση της δευτεροβάθμιας εξίσωσης προκύπτει: $x_u = 0,0427 \text{ m}$

Όπου: f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος την ημέρα της δοκιμής

f_{yk} η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

F_c η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

F_{si} οι δυνάμεις των οπλισμών στην αστοχία

A_{s1}, A_{s2} το εμβαδό των οπλισμών του μανδύα (2Ø10)

A_{s3}, A_{s4} το εμβαδό των οπλισμών της αρχικής δοκού (3Ø10)

d το στατικό ύψος δοκού

d_i η απόσταση του κέντρου των ράβδων από την παρειά της δοκού

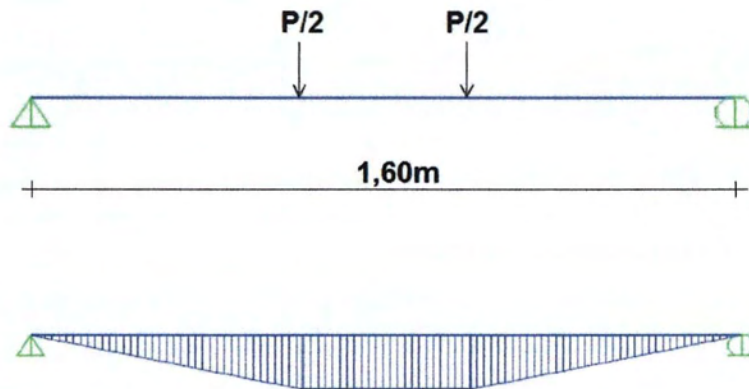
Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος F_c στην οριακή κατάσταση αστοχίας από κάμψη υπολογίστηκε υποθέτοντας ότι σε ολόκληρη τη θλιβόμενη ζώνη το σκυρόδεμα είναι θλιπτικής αντοχής 32,07MPa (θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μανδύα), καθώς το μεγαλύτερο μέρος της θα βρίσκεται εντός του πάχους του μανδύα (3,5cm). Σε κάθε περίπτωση, οι θλιπτικές αντοχές των δύο σκυροδεμάτων δεν διαφέρουν πολύ, οπότε το σφάλμα της υπόθεσης αυτής είναι πολύ μικρό.

$$\begin{aligned}
 (1) &\Rightarrow \varepsilon_{s1} = 16,99 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \\
 (2) &\Rightarrow \varepsilon_{s2} = 1,86 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \\
 (3) &\Rightarrow \varepsilon_{s3} = 2,24 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \\
 (4) &\Rightarrow \varepsilon_{s4} = 12,89 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \quad \text{οπότε η υπόθεση ισχύει}
 \end{aligned}$$

Η καμπτική ροπή αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$M_u = F_C \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,416 \cdot x_u\right) + F_{S1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{S2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) - F_{S3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) + F_{S4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) \Rightarrow$$

$$M_u = 45,15 \text{ kNm}$$



Σχήμα 5.5. Διάγραμμα καμπτικών ροπών [M] από τη στατική επίλυση της αμφιέριστης δοκού

Από τη στατική επίλυση της δοκού για τα συγκεντρωμένα φορτία εκατέρωθεν του μέσου και αμελώντας το ίδιο βάρος της δοκού λόγω της μικρής του επιρροής, προκύπτει η μέγιστη ροπή σε συνάρτηση με το φορτίο P. Συνεπώς, το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι: $M_{\max} = 0,61 \cdot \frac{P_{\max}}{2} \Rightarrow P_{\max} = 148,03 \text{ kN}$

5.2.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό των φορτίων ρηγμάτωσης, υπολογίζεται πρώτα η ισοδύναμη διατομή της δοκού. Λόγω της συμμετρίας της διατομής αλλά και των οπλισμών της δοκού, το κέντρο βάρους της διατομής βρίσκεται στο μέσο του ύψους της ($x_1 = h/2$).

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{CRLT} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 32,51 \text{ GPa}$$

$$E_{RC} = 32,31 \text{ GPa}$$

$$n = 6,19$$

Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι: $\eta_j = \frac{E_{CRLT}}{E_{RC}} = \frac{32,51}{32,31} \Rightarrow \eta_j = 1,006$

Η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης διατομής της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n-1) \cdot A_{S1} \cdot (x_I - d_1)^2 + (n-1) \cdot A_{S2} \cdot (x_I - d_2)^2 + (n-1) \cdot A_{S3} \cdot (x_I - d_3)^2 + (n-1) \cdot A_{S4} \cdot (x_I - d_4)^2 + n_j \cdot \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} \Rightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 2 \cdot 5,19 \cdot 1,57 \cdot (13,5 - 2)^2 + 2 \cdot 5,19 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 1,006 \cdot \frac{22 \cdot 27^3 - 15 \cdot 20^3}{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_I = 39432,22 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης είναι:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,98 \cdot 10^3 \cdot 39432,22 \cdot 10^{-8}}{0,27 - 0,135} = 8,7 \text{ kNm}$$

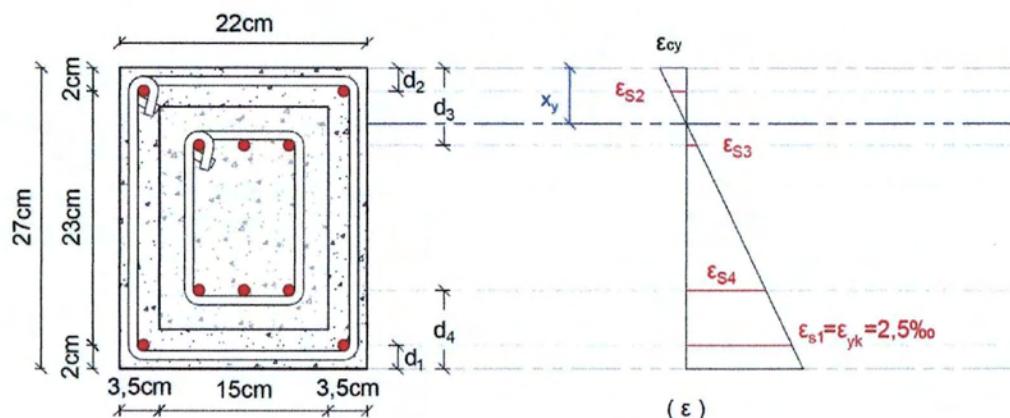
Όπου η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για θλιπτική αντοχή 31,35 MPa είναι:

$$f_{ctm} = 2,98 \text{ MPa}$$

Οπότε το φορτίο ρηγμάτωσης P_{cr} υπολογίζεται:

$$M_{cr} = 0,61 \cdot \frac{P_{cr}}{2} \Rightarrow P_{cr} = 28,52 \text{ kN}$$

5.2.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα



Σχήμα 5.6. Διάγραμμα παραμορφώσεων (ϵ) της κρίσιμης διατομής στο μέσο της δοκού τη στιγμή της πρώτης διαρροής του χάλυβα

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{\varepsilon_{cy}}{x_y} = \frac{2,5\text{‰}}{(d - x_y)} \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\varepsilon_{s3}}{(d_3 - x_y)} \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\varepsilon_{s2}}{(x_y - d_2)} \quad (6)$$

$$\frac{\varepsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\varepsilon_{s4}}{(h - d_4 - x_y)} \quad (8)$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή διαρροής του χάλυβα M_y :

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_{s3} + F_{s4} \Rightarrow \alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yk} + A_{s3} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s3} + A_{s4} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s4}$$

$$\Rightarrow \alpha \cdot 32,07 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_y + 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\varepsilon_{cy} \cdot (x_y - 0,02)}{x_y} = 78,5 +$$

$$+ 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\varepsilon_{cy} \cdot (0,07 - x_y)}{x_y} + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\varepsilon_{cy} \cdot (0,20 - x_y)}{x_y} \Rightarrow$$

$$7055,4 \cdot \alpha \cdot x_y^2 + 125800 \cdot \varepsilon_{cy} \cdot x_y - 13372 \cdot \varepsilon_{cy} - 78,5 \cdot x_y = 0 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \varepsilon_{cy} \cdot (6 - \varepsilon_{cy}) \quad (10)$$

$$k_a = \frac{8 - \varepsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \varepsilon_{cy})} \quad (11)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων προκύπτουν:

$$\varepsilon_{cy} = 0,82 \text{‰} \quad \alpha = 0,354 \quad \varepsilon_{s1} = 2,5 \text{‰} \quad \varepsilon_{s3} = 0,11 \text{‰}$$

$$x_y = 0,0617m \quad k_a = 0,3465 \quad \varepsilon_{s2} = 0,55 \text{‰} \quad \varepsilon_{s4} = 1,84 \text{‰}$$

Η καμπτική ροπή διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού χάλυβα είναι:

$$M_y = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - k_a \cdot x_y\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) \Rightarrow$$

$$M_y = 33,83 \text{ kNm}$$

Οπότε το φορτίο διαρροής P_y υπολογίζεται:

$$M_y = 0,61 \cdot \frac{P_y}{2} \Rightarrow P_y = 110,89 \text{ kN}$$

Πίνακας 5.2. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης της δοκού CRLT-13C

Στάδιο Φόρτισης	Ροπή (kN·m)	Φορτίο (kN)
Ρηγμάτωση	8,7	28,52
Διαρροή	33,83	110,89
Αστοχία	45,15	148,03

5.2.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας

Λόγω της κατανομής των διατμητικών τάσεων καθ' ύψος της διατομής της δοκού, το μεγαλύτερο μέρος τους παραλαμβάνεται από τον κορμό (εσωτερική δοκός) της, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση από την αρχική δοκό Ο/Σ. Συνεπώς, γίνεται η συντηρητική υπόθεση ότι όλη η δοκός αποτελείται από σκυρόδεμα ίδιας θλιπτικής αντοχής (31,35 MPa) και προκύπτει:

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cm} \cdot b_w \cdot z = 0,5 \cdot 0,506 \cdot 31,35 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \Rightarrow V_{Rd,max} = 392,61 \text{ kN}$$

$$\text{Όπου: } v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{cm}}{200}\right) = 0,506$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,max} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 785,22 \text{ kN}$$

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, η αντοχή δοκού σε τέμνουσα χωρίς οπλισμό διάτμησης δεν συνυπολογίζεται, οπότε η συνολική αντοχή έναντι τέμνουσας, λαμβάνοντας υπόψη και τον οπλισμό διάτμησης της αρχικής δοκού Ο/Σ, είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = V_{Rd,s}^{(RC)} + V_{Rd,s}^{(jacket)}$$

$$V_{Rd,s}^{(jacket)} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yw} \cdot 0,9 \cdot d = \frac{10^{-4}}{0,1} \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(jacket)} = 112,5 \text{ kN}$$

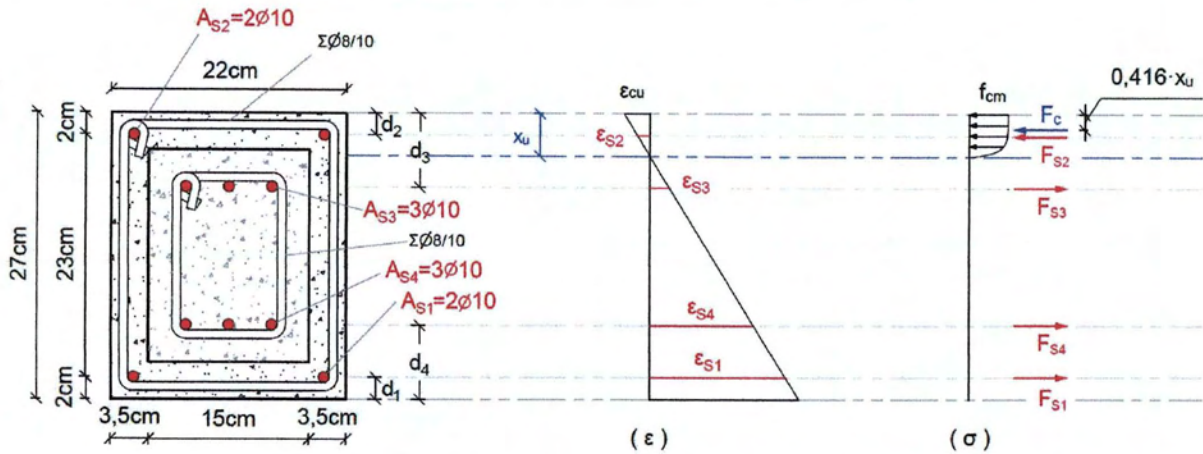
$$V_{Rd,s}^{(total)} = 74,25 + 186,75 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(total)} = 186,75 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 373,5 \text{ kN}$$

5.3 Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής (CRHT)

5.3.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού



Σχήμα 5.7. Διαγράμματα παραμορφώσεων (ϵ) και τάσεων (σ) στην οριακή κατάσταση αστοχίας της κρίσιμης διατομής στο μέσο της ενισχυμένης δοκού

Την ημέρα της δοκιμής, η θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος ακμής 150 mm μετρήθηκε κατά μέσο όρο $f_{cm, cube} = 66,28$ MPa. Με γραμμική παρεμβολή από τις κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος (Ευρωκώδικας 2), προκύπτει ότι η αντίστοιχη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου είναι $f_{cm} = 54,49$ MPa. Η παραμόρφωση σύνθλιψης του σκυροδέματος θλιπτικής αντοχής $f_{cm} \geq 50$ MPa υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\epsilon_{cu} (\text{‰}) = 2,6 + 35 \cdot \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \Rightarrow \epsilon_{cu} = 3,16 \text{ ‰}$$

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\epsilon_{s1} = \frac{0,00316 \cdot (d - x_u)}{x_u} \quad (1)$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,00316 \cdot (x_u - d_2)}{x_u} \quad (2)$$

$$\epsilon_{s3} = \frac{0,00316 \cdot (d_3 - x_u)}{x_u} \quad (3)$$

$$\epsilon_{s4} = \frac{0,00316 \cdot (h - d_4 - x_u)}{x_u} \quad (4)$$

Υποθέτοντας ότι διαρρέει ο εφελκόμενος οπλισμός (A_{s1} , A_{s3} , A_{s4}) ενώ ο θλιβόμενος (A_{s2}) δεν διαρρέει και το ύψος της θλιβόμενης ζώνης είναι $x_u \leq 3,5$ cm, η ισορροπία γράφεται ως εξής:

$$F_c + F_{S2} = F_{S1} + F_{S3} + F_{S4} \Rightarrow$$

$$0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{S2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{S2} = A_{S1} \cdot f_{yk} + A_{S3} \cdot f_{yk} + A_{S4} \cdot f_{yk} \Rightarrow$$

$$0,81 \cdot 54,49 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_u + 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,00316 \cdot (x_u - 0,02)}{x_u} = (1,57 + 2,36 + 2,36) \cdot 500 \cdot 10^{-1} \Rightarrow$$

$$9710,12 \cdot x_u^2 - 215,28 \cdot x_u - 1,984 = 0$$

Από την επίλυση της δευτεροβάθμιας προκύπτει: $x_u = 0,0292 \text{ m}$

Όπου: f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος την ημέρα της δοκιμής

f_{yk} η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

F_c η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος στην αστοχία

F_{Si} οι δυνάμεις των οπλισμών στην αστοχία

A_{S1}, A_{S2} το εμβαδό των οπλισμών του μανδύα (2Ø10)

A_{S3}, A_{S4} το εμβαδό των οπλισμών της αρχικής δοκού Ο/Σ (3Ø10)

d το στατικό ύψος δοκού

d_i η απόσταση του κέντρου των ράβδων από την παρειά της δοκού

$$(1) \Rightarrow \varepsilon_{S1} = 23,89 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(2) \Rightarrow \varepsilon_{S2} = 1 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(3) \Rightarrow \varepsilon_{S3} = 4,42 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(4) \Rightarrow \varepsilon_{S4} = 18,48 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \quad \text{οπότε η υπόθεση ισχύει}$$

Η καμπτική ροπή αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$M_u = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,416 \cdot x_u \right) + F_{S1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{S2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) - F_{S3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) + F_{S4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_u = 47,5 \text{ kNm}$$

Οπότε το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$M_{\max} = 0,61 \cdot \frac{P_{\max}}{2} \Rightarrow P_{\max} = 155,74 \text{ kN}$$

5.3.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό των φορτίων ρηγμάτωσης, υπολογίζεται πρώτα η ισοδύναμη διατομή της δοκού. Λόγω της συμμετρίας της διατομής αλλά και των οπλισμών της δοκού, το κέντρο βάρους της διατομής βρίσκεται στο μέσο του ύψους της ($x_1 = h/2$).

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{CRHT} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 37,7 \text{ GPa}$$

$$E_{RC} = 32,31 \text{ GPa}$$

$$n = 6,19$$

$$\text{Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι: } \eta_j = \frac{E_{CRHT}}{E_{RC}} = \frac{37,7}{32,31} \Rightarrow \eta_j = 1,17$$

Η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης διατομής της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n-1) \cdot A_{S1} \cdot (x_I - d_1)^2 + (n-1) \cdot A_{S2} \cdot (x_I - d_2)^2 + (n-1) \cdot A_{S3} \cdot (x_I - d_3)^2 + (n-1) \cdot A_{S4} \cdot (x_I - d_4)^2 + \eta_j \cdot \frac{b \cdot h^3 - b_c \cdot h_c^3}{12} \Rightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 2 \cdot 5,19 \cdot 1,57 \cdot (13,5 - 2)^2 + 2 \cdot 5,19 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 1,17 \cdot \frac{22 \cdot 27^3 - 15 \cdot 20^3}{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_I = 43710,3 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης είναι:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,98 \cdot 10^3 \cdot 43710,3 \cdot 10^{-8}}{0,27 - 0,135} = 9,65 \text{ kNm}$$

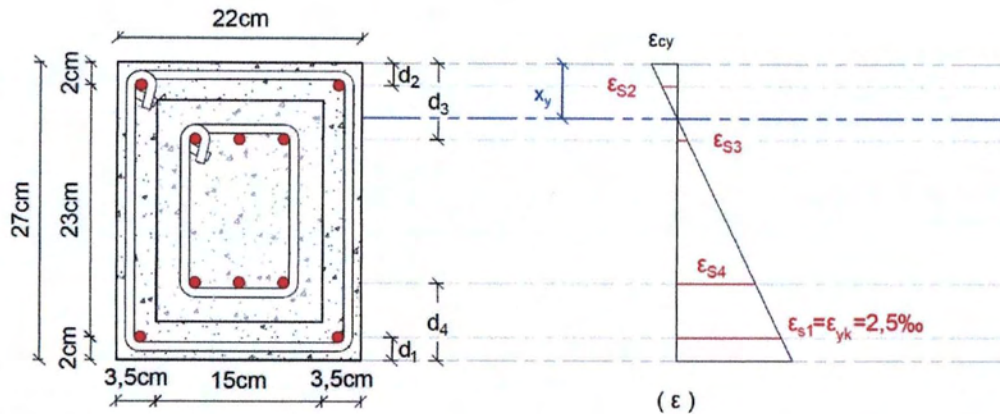
Όπου η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για θλιπτική αντοχή 31,35 MPa είναι:

$$f_{ctm} = 2,98 \text{ MPa}$$

Οπότε το φορτίο ρηγμάτωσης P_{cr} υπολογίζεται:

$$M_{cr} = 0,61 \cdot \frac{P_{cr}}{2} \Rightarrow P_{cr} = 31,64 \text{ kN}$$

5.3.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα



Σχήμα 5.8. Διάγραμμα παραμορφώσεων (ε) της κρίσιμης διατομής στο μέσο της δοκού τη στιγμή της πρώτης διαρροής του χάλυβα

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{2,5\text{‰}}{(d - x_y)} \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s3}}{(d_3 - x_y)} \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s2}}{(x_y - d_2)} \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s4}}{(h - d_4 - x_y)} \quad (8)$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή διαρροής του χάλυβα M_y :

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_{s3} + F_{s4} \Rightarrow \alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yk} + A_{s3} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s3} + A_{s4} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s4}$$

$$\Rightarrow \alpha \cdot 54,49 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_y + 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (x_y - 0,02)}{x_y} = 78,5 +$$

$$+ 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (0,07 - x_y)}{x_y} + 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (0,20 - x_y)}{x_y} \Rightarrow$$

$$11987,8 \cdot \alpha \cdot x_y^2 + 125800 \cdot \epsilon_{cy} \cdot x_y - 13372 \cdot \epsilon_{cy} - 78,5 \cdot x_y = 0 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \epsilon_{cy} \cdot (6 - \epsilon_{cy}) \quad (10)$$

$$k_a = \frac{8 - \epsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \epsilon_{cy})} \quad (11)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων προκύπτουν:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cy} &= 0,62 \text{ ‰} & \alpha &= 0,278 & \varepsilon_{s1} &= 2,5 \text{ ‰} & \varepsilon_{s3} &= 0,25 \text{ ‰} \\ x_y &= 0,0497 \text{ m} & k_a &= 0,3429 & \varepsilon_{s2} &= 0,37 \text{ ‰} & \varepsilon_{s4} &= 1,88 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Η καμπτική ροπή διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού χάλυβα είναι:

$$M_y = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - k_a \cdot x_y \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) \Rightarrow$$

$$M_y = 34,91 \text{ kNm}$$

Οπότε το φορτίο διαρροής P_y υπολογίζεται:

$$M_y = 0,61 \cdot \frac{P_y}{2} \Rightarrow P_y = 114,46 \text{ kN}$$

Πίνακας 5.3. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης της δοκού CRHT-14C

Στάδιο Φόρτισης	Ροπή (kN·m)	Φορτίο (kN)
Ρηγμάτωση	9,65	31,64
Διαρροή	34,91	114,46
Αστοχία	47,50	155,74

5.3.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσας

Όπως και στην προηγούμενη δοκό (Παρ. 5.2.4.), γίνεται η συντηρητική υπόθεση ότι όλη η δοκός αποτελείται από σκυρόδεμα ίδιας θλιπτικής αντοχής (31,35 MPa) και προκύπτει:

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cm} \cdot b_w \cdot z \Rightarrow V_{Rd,max} = 392,61 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,max} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 785,22 \text{ kN}$$

Η συνολική αντοχή έναντι τέμνουσας, λαμβάνοντας υπόψη και τον σπλισμό διάτμησης της αρχικής δοκού Ο/Σ, είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = V_{Rd,s}^{(RC)} + V_{Rd,s}^{(jacket)}$$

$$V_{Rd,s}^{(jacket)} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yw} \cdot 0,9 \cdot d = \frac{10^{-4}}{0,1} \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(jacket)} = 112,5 \text{ kN}$$

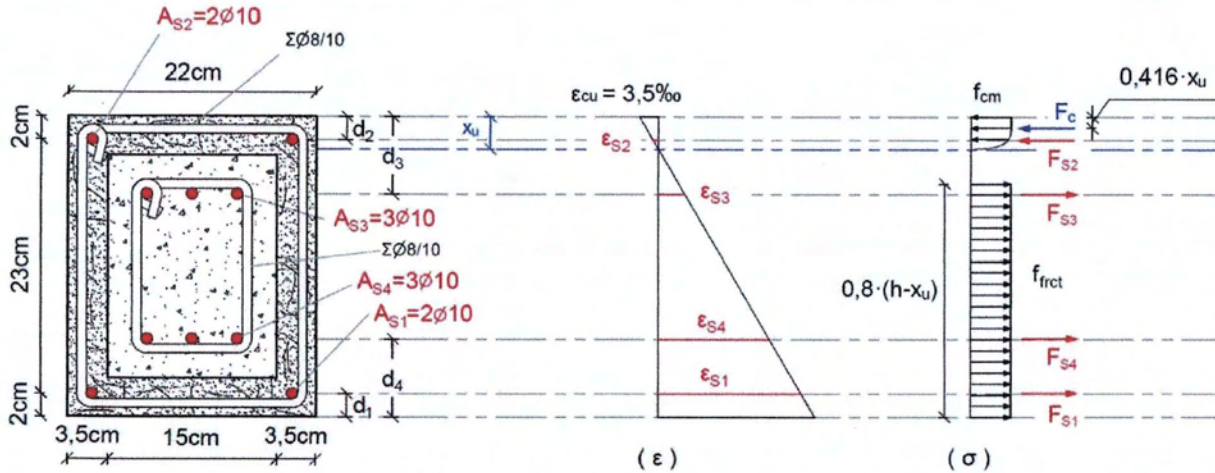
$$V_{Rd,s}^{(total)} = 74,25 + 186,75 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(total)} = 186,75 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 373,5 \text{ kN}$$

5.4 Ανάλυση ενισχυμένης δοκού Ο/Σ με μανδύα από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής (CFRT)

5.4.1. Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού



Σχήμα 5.9. Διαγράμματα παραμορφώσεων (ϵ) και τάσεων (σ) στην οριακή κατάσταση αστοχίας της κρίσιμης διατομής στο μέσο της ενισχυμένης δοκού

Η θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος ακμής 150 mm μετρήθηκε στις 28 ημέρες κατά μέσο όρο $f_{cm, cube} = 74,49$ MPa. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα δοκιμών κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα παρόμοιας σύστασης (Θ. Παπαθεοχάρης, 2007, 2012), η αναγωγή της αντοχής κυβικού δοκιμίου σε αντοχή κυλινδρικού εκτιμάται με βάση τη σχέση: $f_{cm, cyl.} = 0,936 \cdot f_{cm, cube}$. Συνεπώς, η αντίστοιχη αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου είναι $f_{cm} = 69,7$ MPa.

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\epsilon_{S1} = \frac{0,0035 \cdot (d - x_u)}{x_u} \quad (1)$$

$$\epsilon_{S2} = \frac{0,0035 \cdot (x_u - d_2)}{x_u} \quad (2)$$

$$\epsilon_{S3} = \frac{0,0035 \cdot (d_3 - x_u)}{x_u} \quad (3)$$

$$\epsilon_{S4} = \frac{0,0035 \cdot (h - d_4 - x_u)}{x_u} \quad (4)$$

Η εφελκυστική τάση του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος του μανδύα λαμβάνεται ομοιόμορφη (ορθογωνική κατανομή) στο 80% του ύψους της εφελκυσμένης περιοχής και μειωμένη επί ένα συντελεστή $\alpha < 1$. Από πειράματα έμμεσου εφελκυσμού (Splitting Tests) σε κυλινδρικά δοκίμια, αποδεικνύεται ότι η απομένουσα (post-peak) αντοχή ανέρχεται κατά

μέσο όρο στο 60% της μέγιστης τιμής. Δηλαδή η εφελκυστική τάση του ινοπλισμένου μανδύα λαμβάνεται ως:

$$f_{frct} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot f_{frct,split} = 0,6 \cdot 0,9 \cdot 6,87 \Rightarrow f_{frct} = 3,71 \text{ MPa}$$

Για την απλοποίηση των υπολογισμών, θεωρείται ότι οι εφελκυστικές τάσεις του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ασκούνται στο 80% του ύψους του κάθε τμήματος της εφελκυσμένης περιοχής του μανδύα ξεχωριστά. Με την υπόθεση ότι διαρρέουν οι οπλισμοί (A_{s1} , A_{s3} , A_{s4}) και ότι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης είναι $x_u \leq 3,5 \text{ cm}$, η ισορροπία γράφεται ως εξής:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_{s3} + F_{s4} + F_{frct}^{(1)} + F_{frct}^{(2)} + F_{frct}^{(3)} + F_{frct}^{(4)} \Rightarrow$$

$$0,81 \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_u + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yk} + A_{s3} \cdot f_{yk} + A_{s4} \cdot f_{yk} + 0,8 \cdot (h - x_u) \cdot t_j \cdot f_{frct} + 0,8 \cdot (h - x_u) \cdot t_j \cdot f_{frct} + 0,8 \cdot b_c \cdot t_j \cdot f_{frct} + 0,8 \cdot (t_j - x_u) \cdot b_c \cdot f_{frct} \Rightarrow$$

$$12420,54 \cdot x_u + \frac{109,9 \cdot (x_u - 0,02)}{x_u} = 314,5 + 2 \cdot 103,88 \cdot (0,27 - x_u) + 15,582 + 445,2 \cdot (0,035 - x_u) \Rightarrow$$

$$13073,5 \cdot x_u^2 - 291,864 \cdot x_u - 2,2 = 0$$

Από την επίλυση της δευτεροβάθμιας προκύπτει: $x_u = 0,0283 \text{ m}$

Όπου: f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου τσιμεντοκονιάματος 28 ημερών

f_{yk} η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του χάλυβα

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

F_c η θλιπτική δύναμη του τσιμεντοκονιάματος στην αστοχία

F_{si} οι δυνάμεις των οπλισμών στην αστοχία

$F_{frct}^{(i)}$ οι εφελκυστικές δυνάμεις του ινοπλισμένου μανδύα τμηματικά

A_{s1} , A_{s2} το εμβαδό των οπλισμών του μανδύα (2Ø10)

A_{s3} , A_{s4} το εμβαδό των οπλισμών της αρχικής δοκού Ο/Σ (3Ø10)

d το στατικό ύψος δοκού

d_i η απόσταση του κέντρου των ράβδων από την παρειά της δοκού

$$(1) \Rightarrow \varepsilon_{s1} = 27,42 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(2) \Rightarrow \varepsilon_{s2} = 1,03 \text{ ‰} < \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(3) \Rightarrow \varepsilon_{s3} = 5,16 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰}$$

$$(4) \Rightarrow \varepsilon_{s4} = 21,23 \text{ ‰} > \varepsilon_{yk} = 2,5 \text{ ‰} \quad \text{οπότε η υπόθεση ισχύει}$$

Η καμπτική ροπή αστοχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$M_u = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,416 \cdot x_u\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2\right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3\right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4\right) +$$

$$+ 2 \cdot F_{frct}^{(1)} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_u)\right] + F_{frct}^{(3)} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot t_j\right) - F_{frct}^{(4)} \cdot \left[\frac{h}{2} - t_j + 0,4 \cdot (t_j - x_u)\right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_u = 59,54 \text{ kNm}$$

Οπότε το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$M_{max} = 0,61 \cdot \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 195,21 \text{ kN}$$

5.4.2. Πρώτη ρηγμάτωση σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό των φορτίων ρηγμάτωσης, υπολογίζεται πρώτα η ισοδύναμη διατομή της δοκού. Λόγω της συμμετρίας της διατομής αλλά και των σπλισμών της δοκού, το κέντρο βάρους της διατομής βρίσκεται στο μέσο του ύψους της ($x_I = h/2$).

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{FRC} = 9,5 \cdot (f_{cm} + 8)^{1/3} = 40,54 \text{ GPa}$$

$$E_{RC} = 32,31 \text{ GPa}$$

$$n = 6,19$$

$$\text{Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι: } \eta_j = \frac{E_{FRC}}{E_{RC}} = \frac{40,54}{32,31} \Rightarrow \eta_j = 1,255$$

Η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης διατομής της δοκού είναι:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + (n-1) \cdot A_{s1} \cdot (x_I - d_1)^2 + (n-1) \cdot A_{s2} \cdot (x_I - d_2)^2 + (n-1) \cdot A_{s3} \cdot (x_I - d_3)^2 + (n-1) \cdot A_{s4} \cdot (x_I -$$

$$d_4)^2 + \eta_j \cdot \frac{b \cdot h^3 - b_c \cdot h_c^3}{12} \Rightarrow$$

$$I_I = \frac{15 \cdot 20^3}{12} + 2 \cdot 5,19 \cdot 1,57 \cdot (13,5 - 2)^2 + 2 \cdot 5,19 \cdot 2,36 \cdot (13,5 - 7)^2 + 1,255 \cdot \frac{22 \cdot 27^3 - 15 \cdot 20^3}{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_I = 45927,5 \text{ cm}^4$$

Η ροπή ρηγμάτωσης είναι:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_I}{h - x_I} = \frac{2,98 \cdot 10^3 \cdot 45927,5 \cdot 10^{-8}}{0,27 - 0,135} = 10,14 \text{ kNm}$$

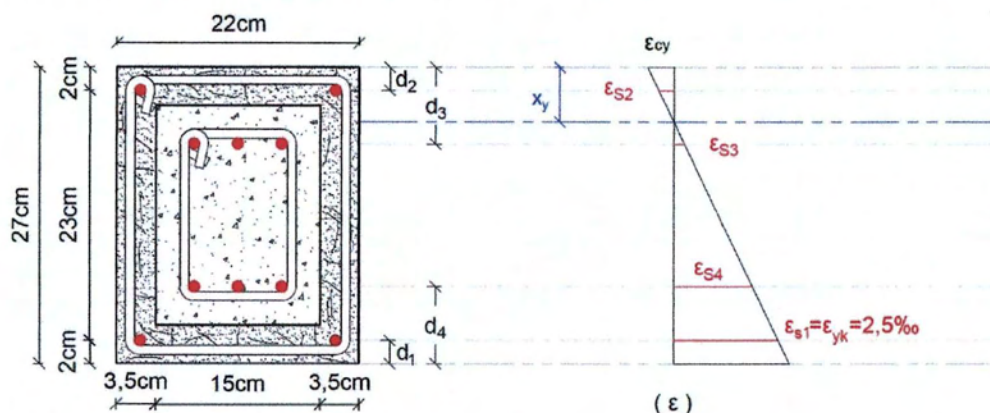
Όπου η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για θλιπτική αντοχή 31,35 MPa είναι:

$$f_{ctm} = 2,98 \text{ MPa}$$

Οπότε το φορτίο ρηγμάτωσης P_{cr} υπολογίζεται:

$$M_{cr} = 0,61 \cdot \frac{P_{cr}}{2} \Rightarrow P_{cr} = 33,25 \text{ kN}$$

5.4.3. Πρώτη διαρροή οπλισμού χάλυβα



Σχήμα 5.10. Διάγραμμα παραμορφώσεων (ϵ) της κρίσιμης διατομής στο μέσο της δοκού τη στιγμή της πρώτης διαρροής του χάλυβα

Από τα όμοια τρίγωνα του διαγράμματος παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{2,5\text{‰}}{(d - x_y)} \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s3}}{(d_3 - x_y)} \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s2}}{(x_y - d_2)} \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_{cy}}{x_y} = \frac{\epsilon_{s4}}{(h - d_4 - x_y)} \quad (8)$$

Από τις εξισώσεις ισορροπίας εσωτερικών – εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_y και η καμπτική ροπή διαρροής του χάλυβα M_y :

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_{s3} + F_{s4} + F_{frct}^{(1)} + F_{frct}^{(2)} + F_{frct}^{(3)} \Rightarrow$$

$$\alpha \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x_y + A_{s2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yk} + A_{s3} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s3} + A_{s4} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s4} + 0,8 \cdot (h - x_y) \cdot t_j \cdot f_{frct} +$$

$$+ 0,8 \cdot (h - x_y) \cdot t_j \cdot f_{frct} + 0,8 \cdot b_c \cdot t_j \cdot f_{frct} \Rightarrow$$

$$\alpha \cdot 69,7 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot x_y + 31400 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (x_y - 0,02)}{x_y} = 78,5 + 47200 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (0,07 - x_y)}{x_y} + 47200 \cdot \frac{\epsilon_{cy} \cdot (0,20 - x_y)}{x_y} + 2 \cdot 103,88 \cdot (0,27 - x_y) + 15,582 \Rightarrow$$

$$(15334 \cdot \alpha + 207,76) \cdot x_y^2 + 125800 \cdot \epsilon_{cy} \cdot x_y - 13372 \cdot \epsilon_{cy} - 150,182 \cdot x_y = 0 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{12} \cdot \epsilon_{cy} \cdot (6 - \epsilon_{cy}) \quad (10)$$

$$k_a = \frac{8 - \epsilon_{cy}}{4 \cdot (6 - \epsilon_{cy})} \quad (11)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων προκύπτουν:

$$\begin{array}{llll} \epsilon_{cy} = 0,645 \text{ ‰} & \alpha = 0,2878 & \epsilon_{s1} = 2,5 \text{ ‰} & \epsilon_{s3} = 0,235 \text{ ‰} \\ x_y = 0,0513\text{m} & k_a = 0,3434 & \epsilon_{s2} = 0,394 \text{ ‰} & \epsilon_{s4} = 1,87 \text{ ‰} \end{array}$$

Η καμπτική ροπή διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού χάλυβα είναι:

$$M_y = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - k_a \cdot x_y \right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) - F_{s3} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_3 \right) + F_{s4} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_4 \right) + 2 \cdot F_{frct}^{(1)} \cdot \left[\frac{h}{2} - 0,4 \cdot (h - x_y) \right] + F_{frct}^{(3)} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot t_j \right) \Rightarrow$$

$$M_y = 46,09 \text{ kNm}$$

Οπότε το φορτίο διαρροής P_y υπολογίζεται:

$$M_y = 0,61 \cdot \frac{P_y}{2} \Rightarrow P_y = 151,11 \text{ kN}$$

Πίνακας 5.4. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης της δοκού CFRT

Στάδιο Φόρτισης	Ροπή (kN·m)	Φορτίο (kN)
Ρηγμάτωση	10,14	33,25
Διαρροή	46,09	151,11
Αστοχία	59,54	195,21

5.4.4. Υπολογισμός αντοχής δοκού έναντι τέμνουσα

Όπως και για τις προηγούμενες δοκούς, γίνεται η συντηρητική υπόθεση για τη θλιπτική αντοχή του μανδύα λόγω της κατανομής των διατμητικών τάσεων:

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f_{cm} \cdot b_w \cdot z \Rightarrow V_{Rd,max} = 392,61 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,max} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 785,22 \text{ kN}$$

Η συνολική αντοχή έναντι τέμνουσας, λαμβάνοντας υπόψη και τον οπλισμό διάτμησης της αρχικής δοκού Ο/Σ, είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = V_{Rd,s}^{(RC)} + V_{Rd,s}^{(jacket)}$$

$$V_{Rd,s}^{(jacket)} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yw} \cdot 0,9 \cdot d = \frac{10^{-4}}{0,1} \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(jacket)} = 112,5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s}^{(total)} = 74,25 + 186,75 \Rightarrow V_{Rd,s}^{(total)} = 186,75 \text{ kN}$$

Άρα το μέγιστο φορτίο που δύναται να φέρει η δοκός είναι:

$$V_{Rd,s}^{(total)} = \frac{P_{max}}{2} \Rightarrow P_{max} = 373,5 \text{ kN}$$

Πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά συντηρητική στην περίπτωση της ενισχυμένης δοκού με ινοπλισμένο μανδύα υψηλής αντοχής, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους συνδετήρες του μανδύα ενίσχυσης. Η συνεισφορά του ινοπλισμένου μανδύα στην αντοχή έναντι τέμνουσας είναι πολύ σημαντική, καθώς λόγω της υψηλής εφελκυστικής αντοχής του τσιμεντοκονιάματος προς κάθε διεύθυνση (υπόθεση ομοιογένειας υλικού), παραλαμβάνεται ένα μεγάλο ποσοστό των λοξών εφελκυστικών τάσεων της δοκού από το μανδύα. Επειδή όμως το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αφορά την ενίσχυση δοκών σε κάμψη, δεν αναλύεται περαιτέρω η αντοχή της ενισχυμένης δοκού σε τέμνουσα και οι τρόποι υπολογισμού της. Αρκεί μόνο η απόδειξη ότι η δοκός δεν αστοχεί σε καμία περίπτωση λόγω τέμνουσας πριν επέλθει καμπτική αστοχία.

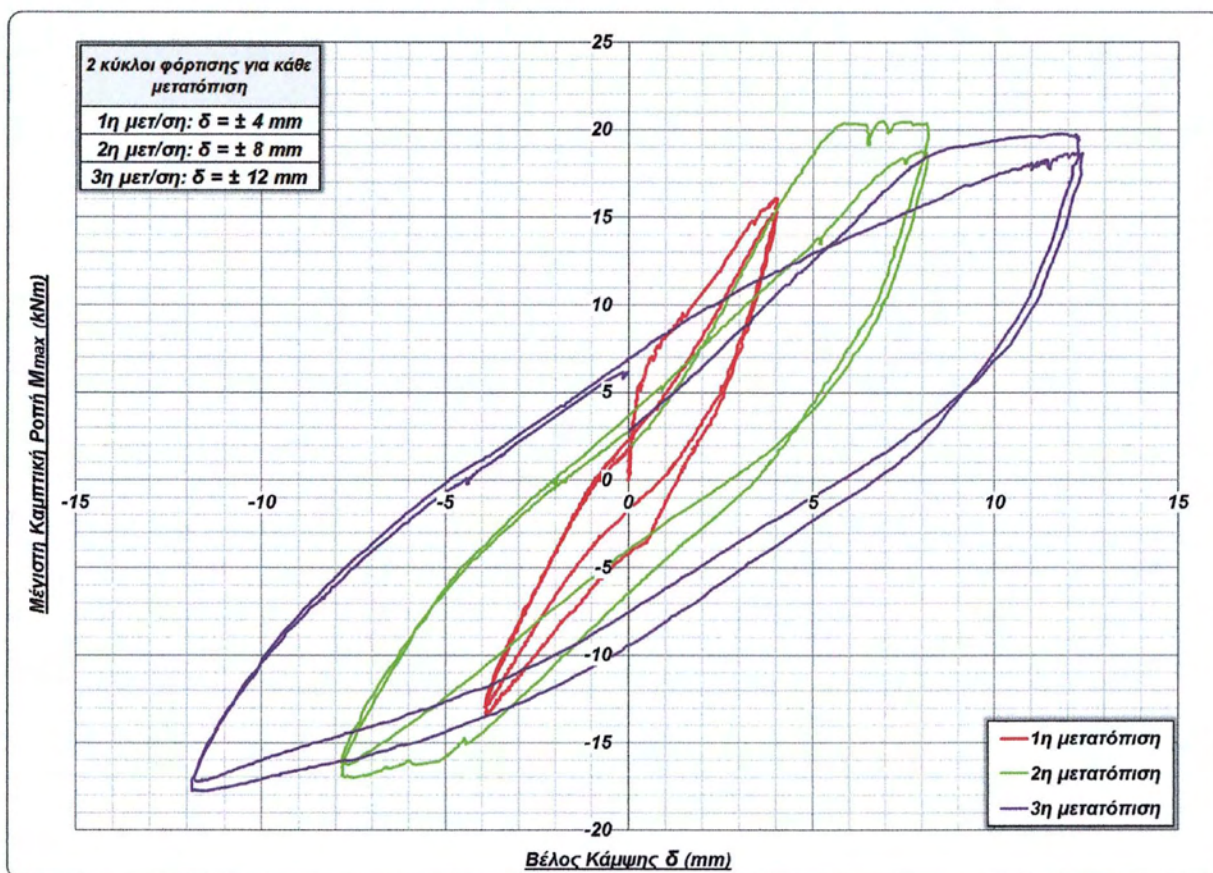
Κεφάλαιο 6 : Αποτελέσματα πειραμάτων

6.1. Αρχικές δοκοί Ο/Σ συμβατικά οπλισμένες

6.1.1. Δοκός RC-7C

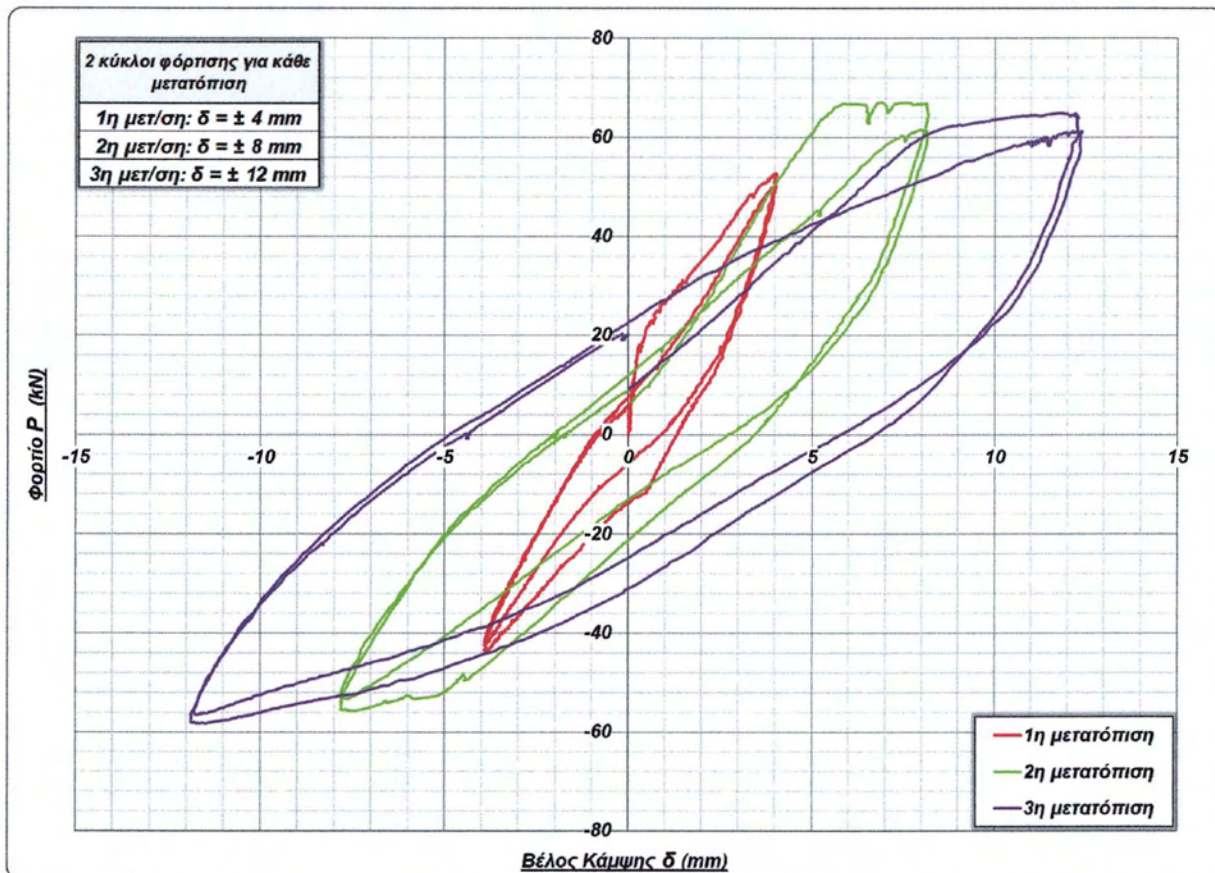
Πίνακας 6.1. Λεπτομέρειες δοκού RC-7C

Ονομασία Δοκού	RC - 7C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	15,2 x 20,1 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	26/02/2013



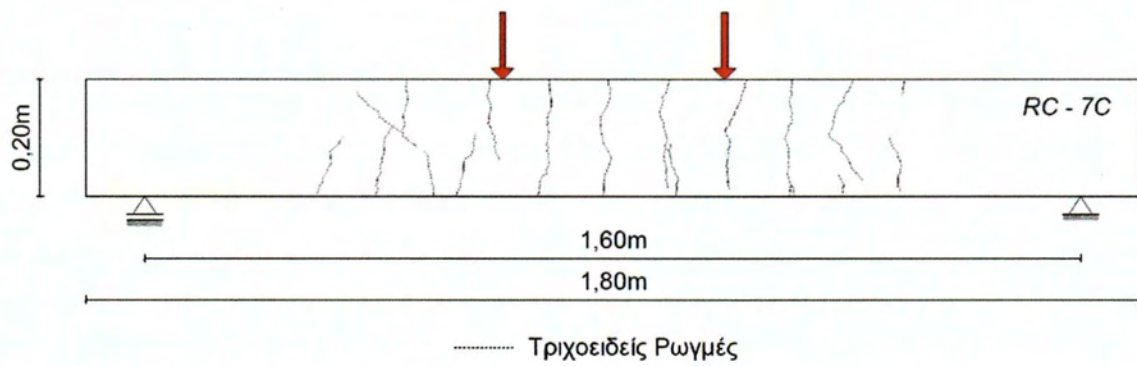
Σχήμα 6.1. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηκυνσιόμετρων) δοκού RC-7C

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης της δοκού RC-7C, ενώ στο Σχήμα 6.2 το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης. Και στις δύο περιπτώσεις, το βέλος κάμψης υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των καταγραφών των δύο μηκυνσιόμετρων, για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων.

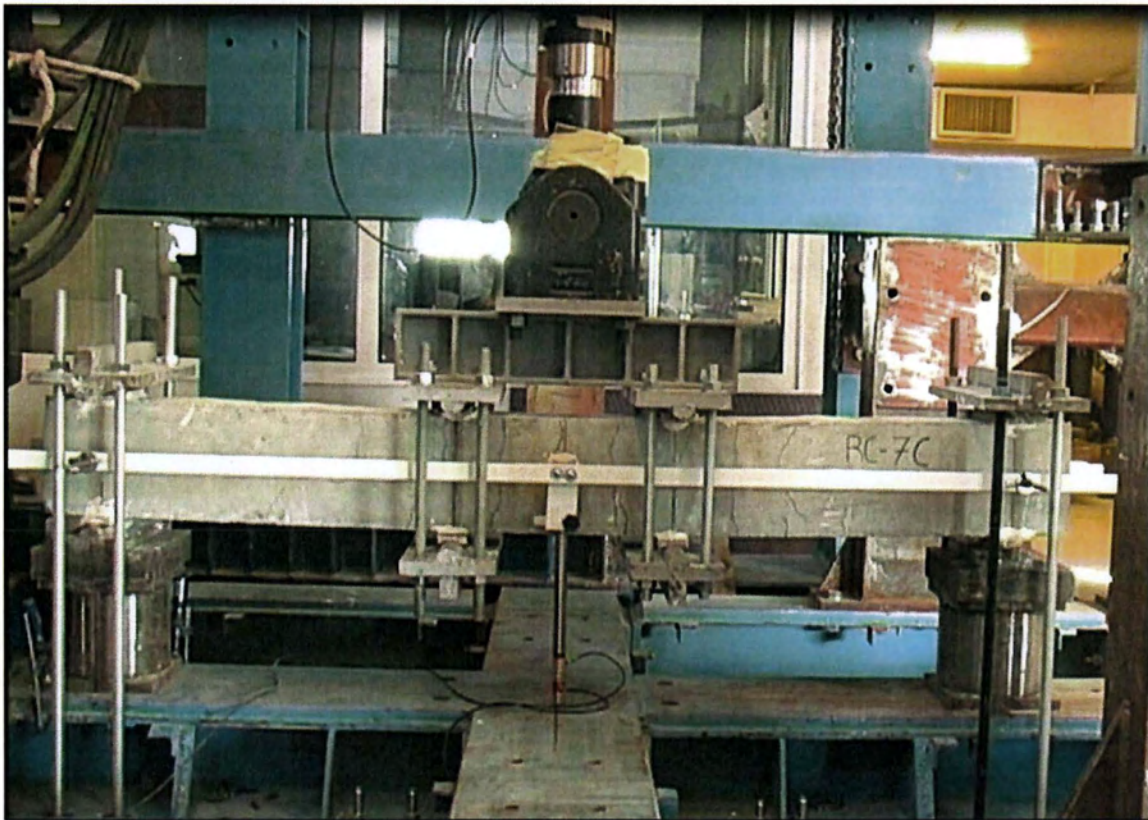


Σχήμα 6.2. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.δ. μηχανισιόμετρων) δοκού RC-7C σε φόρτιση κάμψης

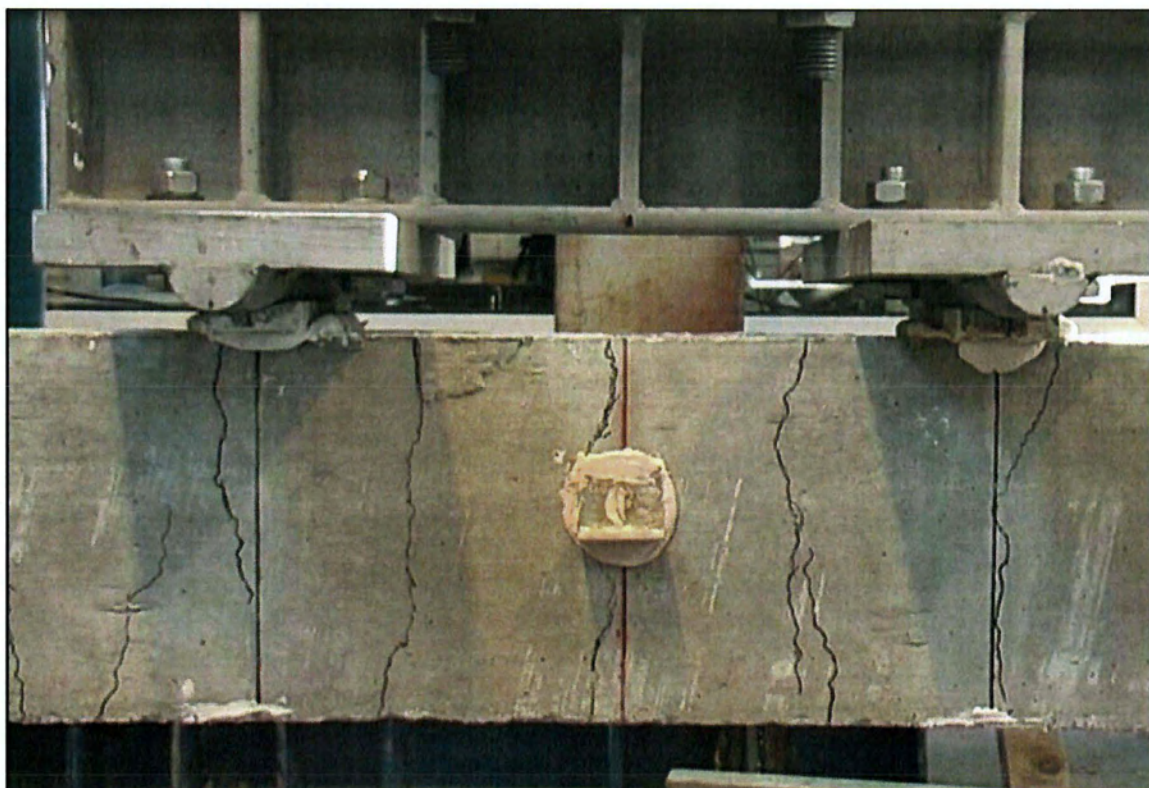
Παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του σκυροδέματος είναι $M_{cr} = 3,2 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 10,49 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,139 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκους οπλισμού στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 20,37 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 66,77 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 5,85 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της φόρτισης βλάβης της δοκού είναι $M_{max} = 20,48 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 67,14 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 6,93 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -17,77 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -11,65 \text{ mm}$. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης βλάβης. Εμφανίστηκαν μόνο τριχοειδείς ρωγμές, οι οποίες ήταν καμπτικές στο μέσο της δοκού μεταξύ των σημείων επιβολής φορτίου (περιοχή καθαρής κάμψης), ενώ οι υπόλοιπες ήταν καμπποδιαμητικές. Στα Σχήματα 6.4 και 6.5 παρουσιάζονται φωτογραφίες των ρωγμών της δοκού κατά τη διάρκεια και στο τέλος της φόρτισης.



Σχήμα 6.3. Αποτύπωση ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.4. Δημιουργία ρωγμών κατά τη διάρκεια της φόρτισης

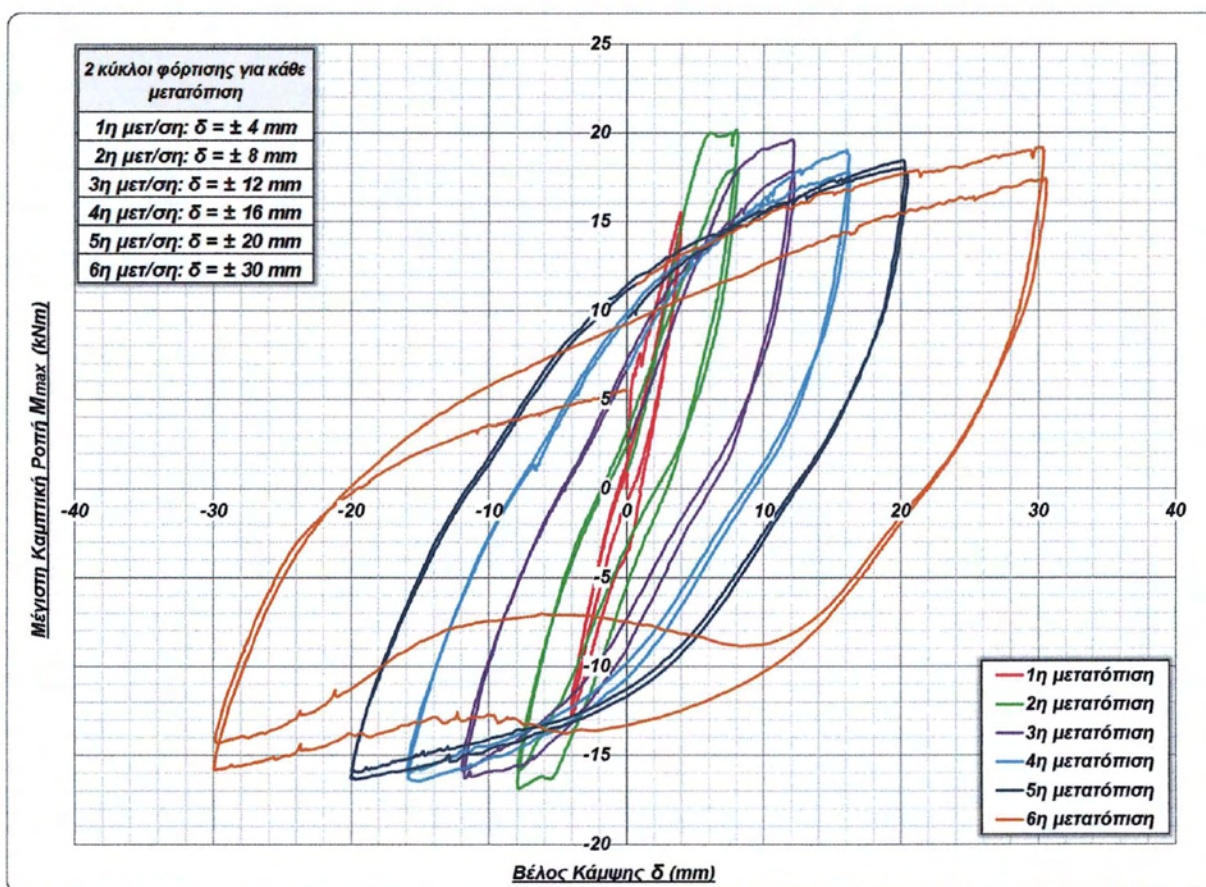


Σχήμα 6.5. Φωτογραφία ρωγμών στο μέσο της δοκού μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης βλάβης

6.1.2. Δοκός RC-8C

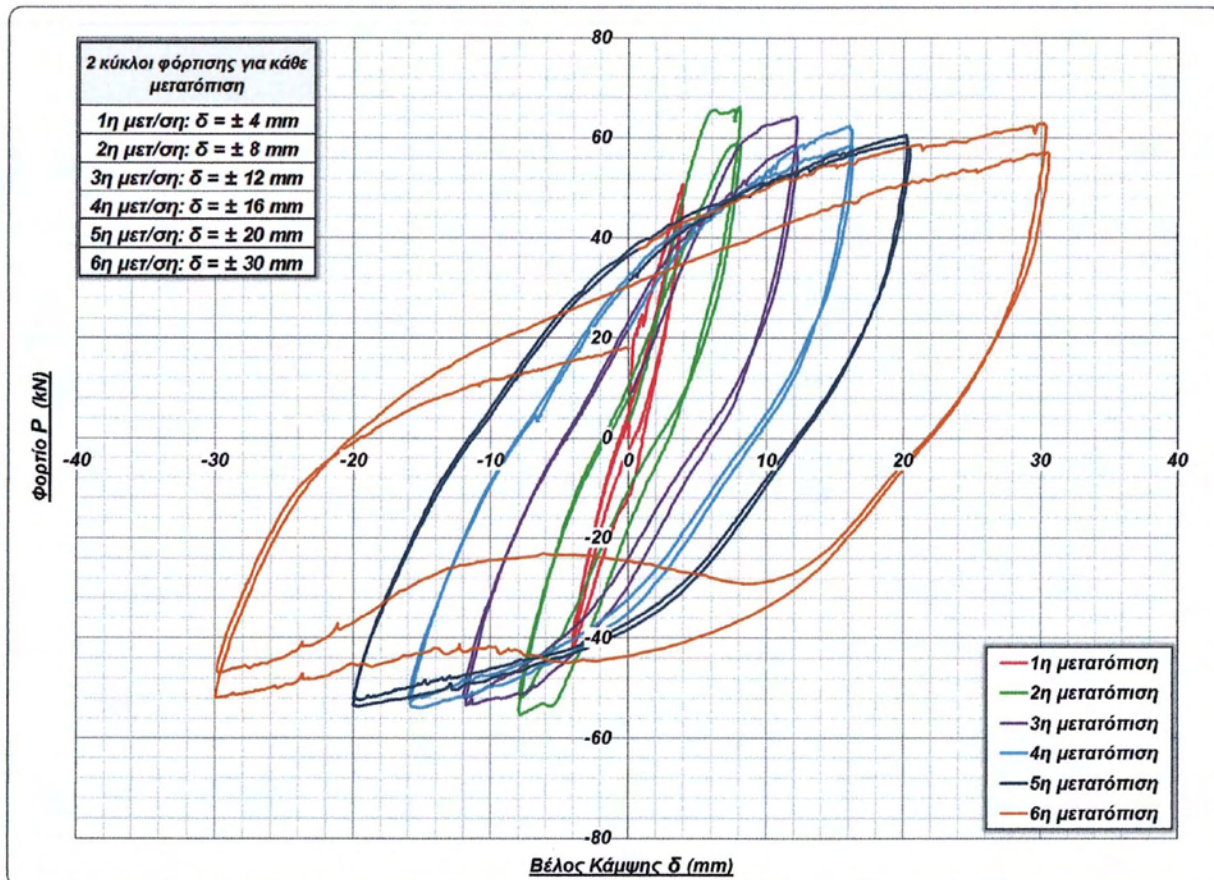
Πίνακας 6.2. Λεπτομέρειες δοκού RC-8C

Ονομασία Δοκού	RC - 8C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	15,1 x 20,1 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	27/02/2013



Σχήμα 6.6. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανισιόμετρων) δοκού RC-8C

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης της δοκού RC-8C, ενώ στο Σχήμα 6.7 το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης. Και στις δύο περιπτώσεις, το βέλος κάμψης υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των καταγραφών των δύο μηχανισιόμετρων, για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων.

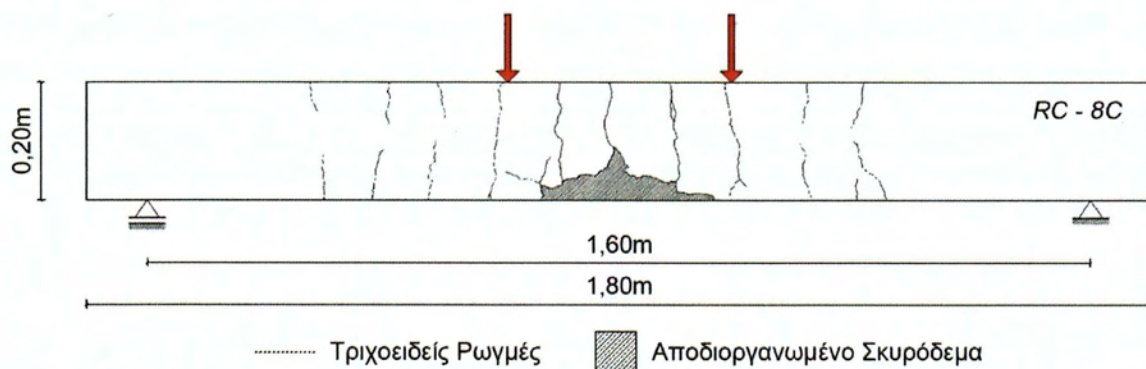


Σχήμα 6.7. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανισιόμετρων) δοκού RC-8C σε φόρτιση κάμψης

Η δοκός RC-8C συμπεριφέρθηκε παρόμοια με τη δοκό RC-7C μέχρι το ίδιο σημείο φόρτισης, καθώς μετά η δοκός RC-8C φορτίστηκε περαιτέρω σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του σκυροδέματος είναι $M_{cr} = 4,57 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 14,98 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,25 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκους οπλισμού στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 19,98 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 65,52 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 6,12 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της φόρτισης βλάβης της δοκού είναι $M_{max} = 20,16 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 66,11 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 8,04 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -16,88 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -7,86 \text{ mm}$.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης βλάβης. Εμφανίστηκαν καμπτικές ρωγμές στο μέσο της δοκού μεταξύ των σημείων επιβολής φορτίου (περιοχή καθαρής κάμψης), ενώ οι υπόλοιπες ήταν καμπποδιαμητικές και τριχοειδείς. Επίσης, στην κάτω παρειά στο μέσον της δοκού, το σκυρόδεμα αποδιοργανώθηκε και οι

ράβδοι οπλισμού λύγισαν χωρίς να αστοχήσει κάποια (Σχήμα 6.12). Στα Σχήματα 6.9, 6.10 και 6.11 παρουσιάζονται φωτογραφίες των ρωγμών από τη φόρτιση βλάβης.



Σχήμα 6.8. Αποτύπωση ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



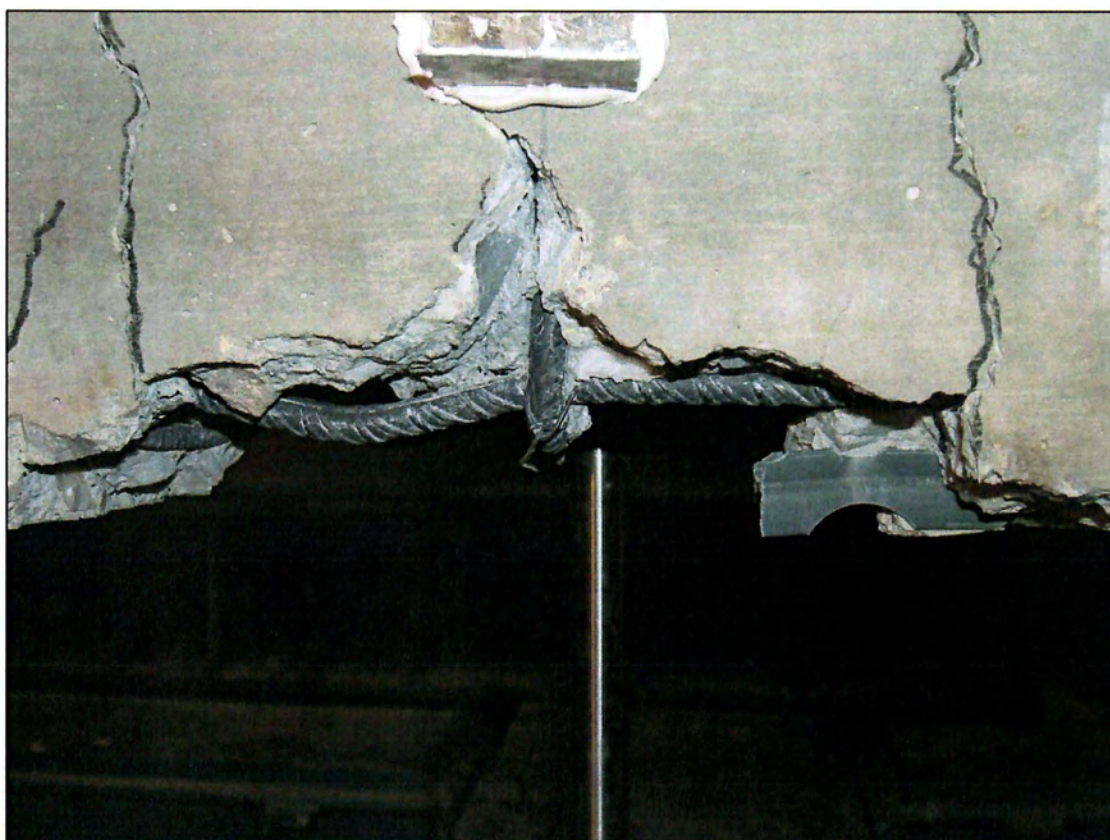
Σχήμα 6.9. Φωτογραφία δοκού RC-8C κατά τη διάρκεια της φόρτισης



Σχήμα 6.10. Φωτογραφία δοκού RC-8C στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.11. Φωτογραφία ρωγμών στο μέσο της δοκού RC-8C



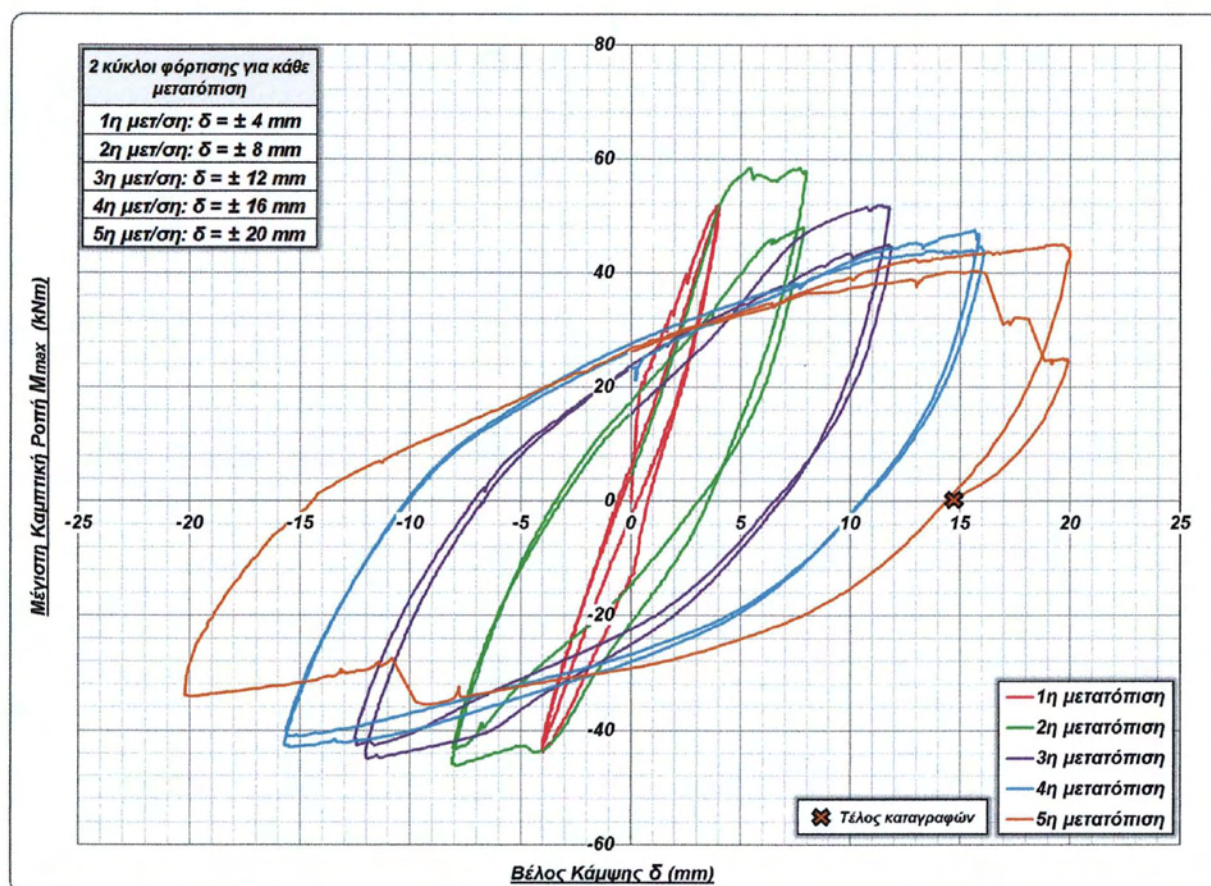
Σχήμα 6.12. Λυγισμός ράβδων οπλισμού στην κάτω παρειά της δοκού

6.2. Δοκοί Ο/Σ με βλάβη ενισχυμένες με μανδύα από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής

6.2.1. Δοκός CFRT-11C (Ενίσχυση της RC-8C)

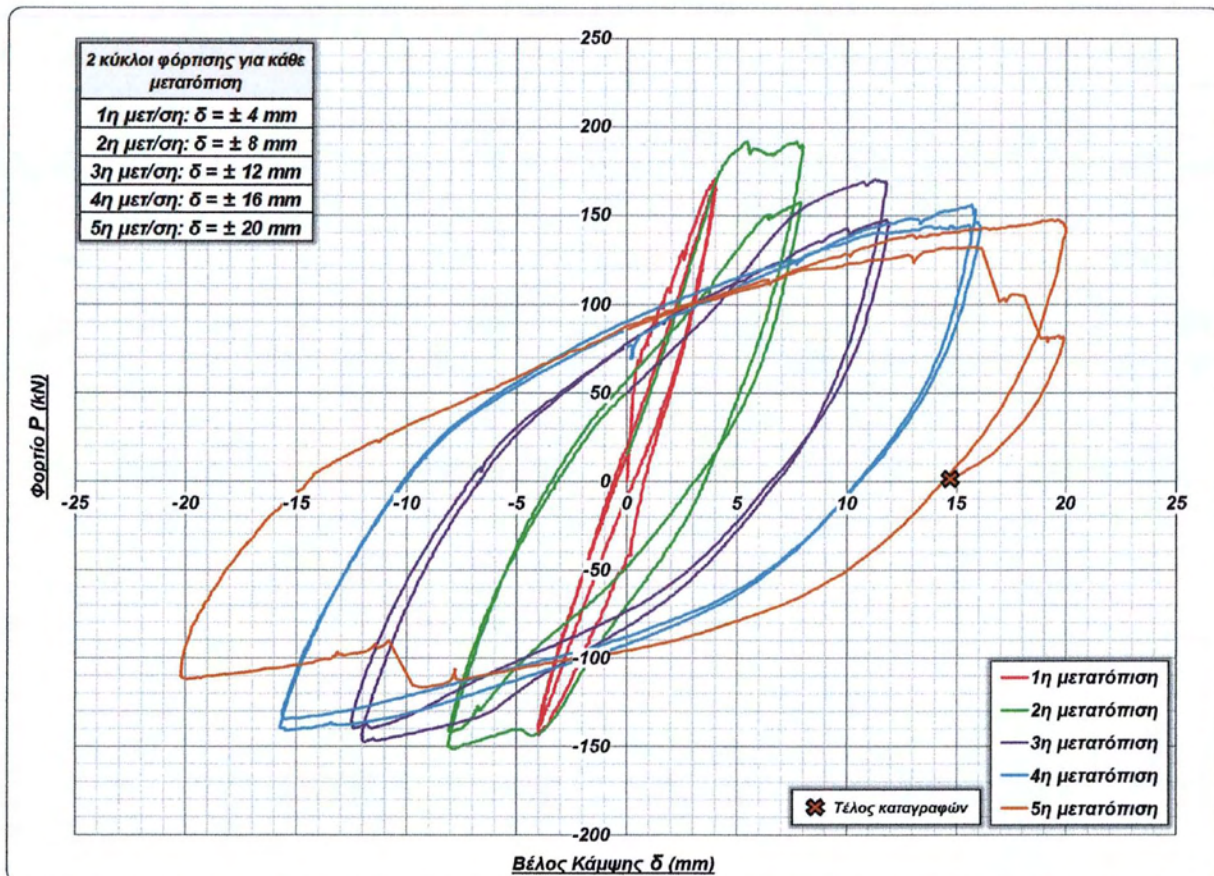
Πίνακας 6.3. Λεπτομέρειες δοκού CFRT-11C

Ονομασία Δοκού	CFRT - 11C
	Ενίσχυση της RC-8C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	21,9 x 27,3 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	28/05/2013



Σχήμα 6.13. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηκυνσιόμετρων) δοκού CFRT-11C

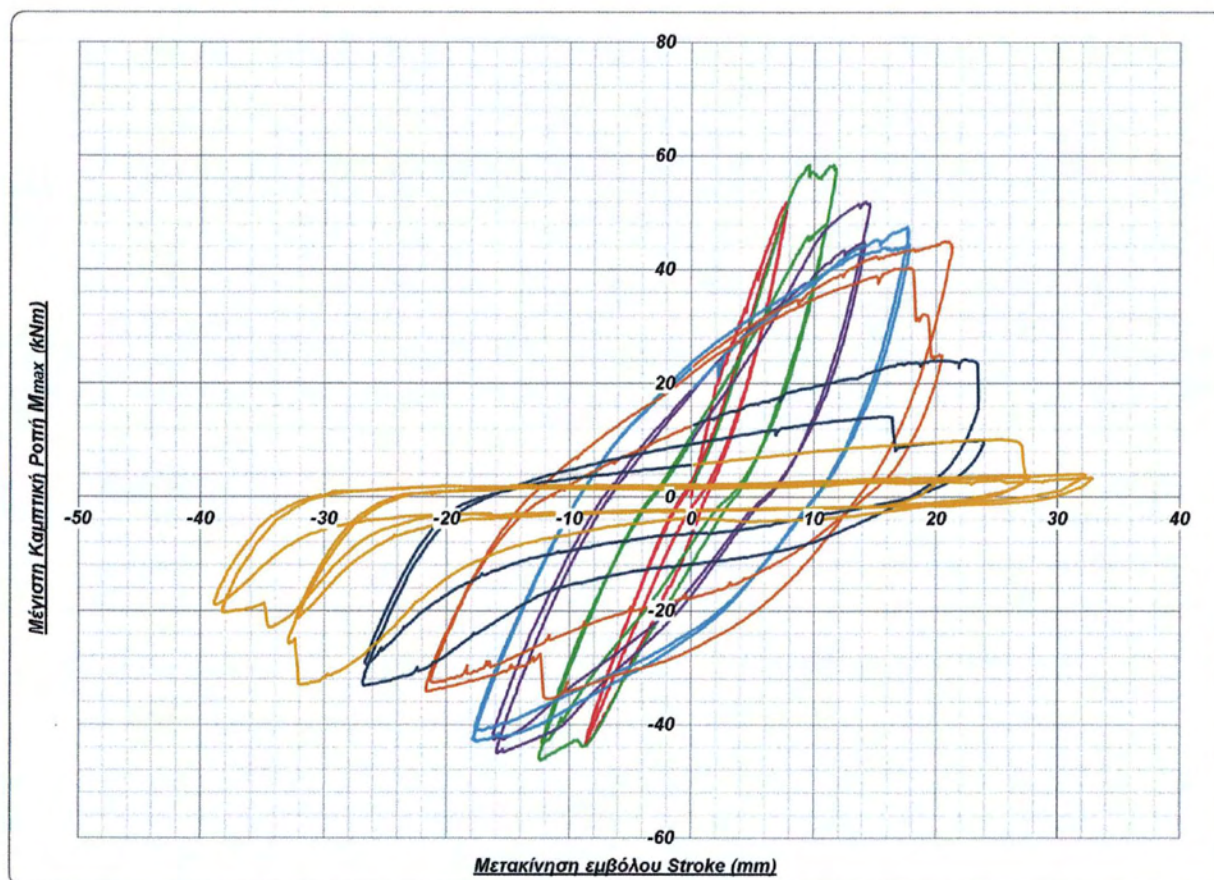
Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης της δοκού CFRT-11C, ενώ στο Σχήμα 6.14 το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης. Και στις δύο περιπτώσεις, το βέλος κάμψης υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των καταγραφών των δύο μηκυνσιόμετρων, για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων.



Σχήμα 6.14. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.δ. μηχανοσκόπων) δοκού CFRT-11C σε φόρτιση κάμψης

Παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του μανδύα είναι $M_{cr} = 16,67 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 54,65 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,318 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκους οπλισμού της ενίσχυσης στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 58,44 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 191,59 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 5,44 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max} = 58,45 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 191,64 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 7,69 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -46,19 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -7,93 \text{ mm}$.

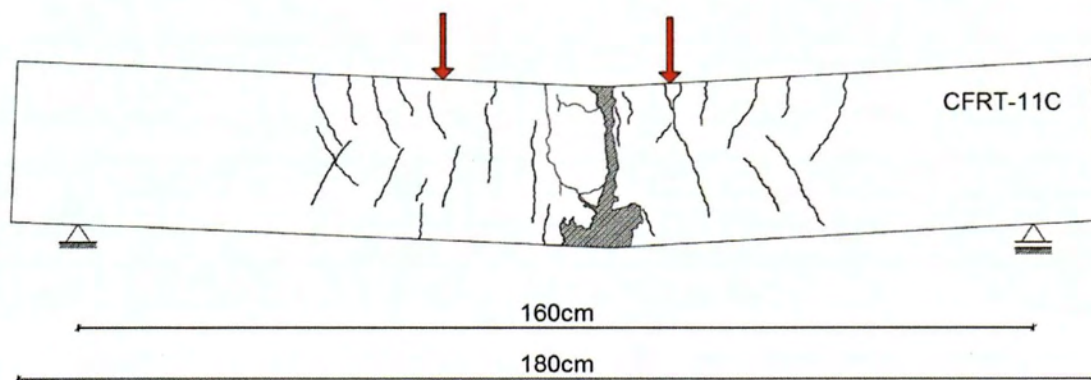
Μετά από κάποιο σημείο της φόρτισης, όπου οι παραμορφώσεις της δοκού ήταν σχετικά μεγάλες, αποκολλήθηκαν οι μεταλλικές γωνίες που χρησιμοποιούνταν για την καταγραφή των βελών κάμψης. Για την εξέταση της συμπεριφοράς της δοκού μετά από αυτό το σημείο, παρουσιάζεται και το διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με τη μετακίνηση του εμβόλου (Stroke) στο Σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.15. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke δοκού CFRT-11C

Σε κάποια σημεία των διαγραμμάτων παρατηρείται απότομη απομείωση της αντοχής της δοκού, η οποία οφείλεται στην αποκοπή των ράβδων σπλισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο τέλος της φόρτισης, μόνο δύο ράβδοι σπλισμού στην πάνω πλευρά της αρχικής δοκού (και όχι του μανδύα) δεν αποκόπηκαν. Αυτό σημαίνει ότι οι ράβδοι σπλισμού αναλαμβάνουν μεγάλες τιμές δυνάμεων και για αυτό αστοχούν, γεγονός το οποίο αποδεικνύει και την ικανοποιητική συμπεριφορά της δοκού.

Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης βλάβης, ενώ στα Σχήματα 6.17 - 6.21 φωτογραφίες της δοκού σε διάφορα στάδια της δοκιμής. Παρατηρείται συγκέντρωση των παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού, αφού εκεί εμφανίστηκε μια ρωγή μεγάλου ανοίγματος, ενώ στην υπόλοιπη δοκό πολλές τριχοειδείς ρωγμές.



Σχήμα 6.16. Αποτύπωση ρωγμών της δοκού CFRT-11C στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.17. Φωτογραφία δοκού CFRT-11C πριν την επιβολή της φόρτισης



Σχήμα 6.18. Δημιουργία πρώτων ρωγμών στη δοκό CFRT-11C



Σχήμα 6.19. Διεύρυνση ρωγμής στο μέσο της δοκού CFRT-11C



Σχήμα 6.20. Φωτογραφία των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



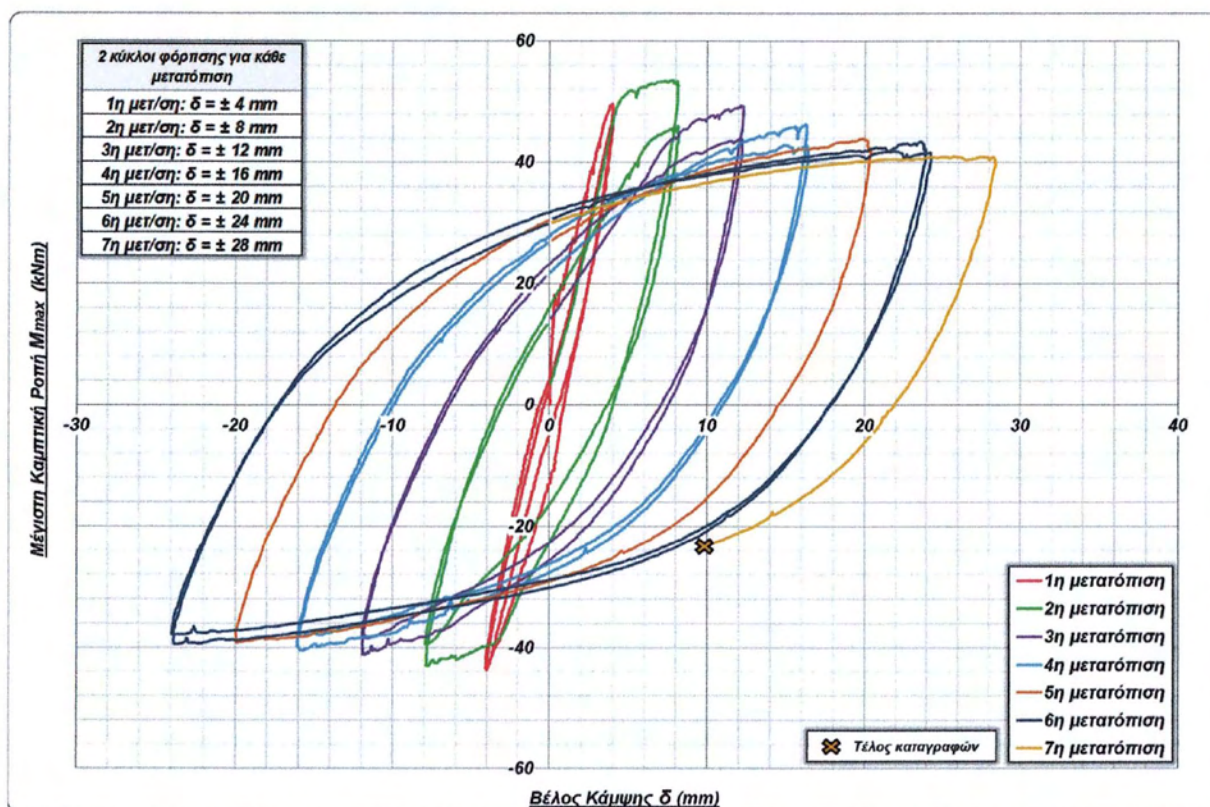
Σχήμα 6.21. Κοντινή φωτογραφία της περιοχής αστοχίας της δοκού CFRT-11C

6.2.2. Δοκός CFRT-12C (Ενίσχυση της RC-7C)

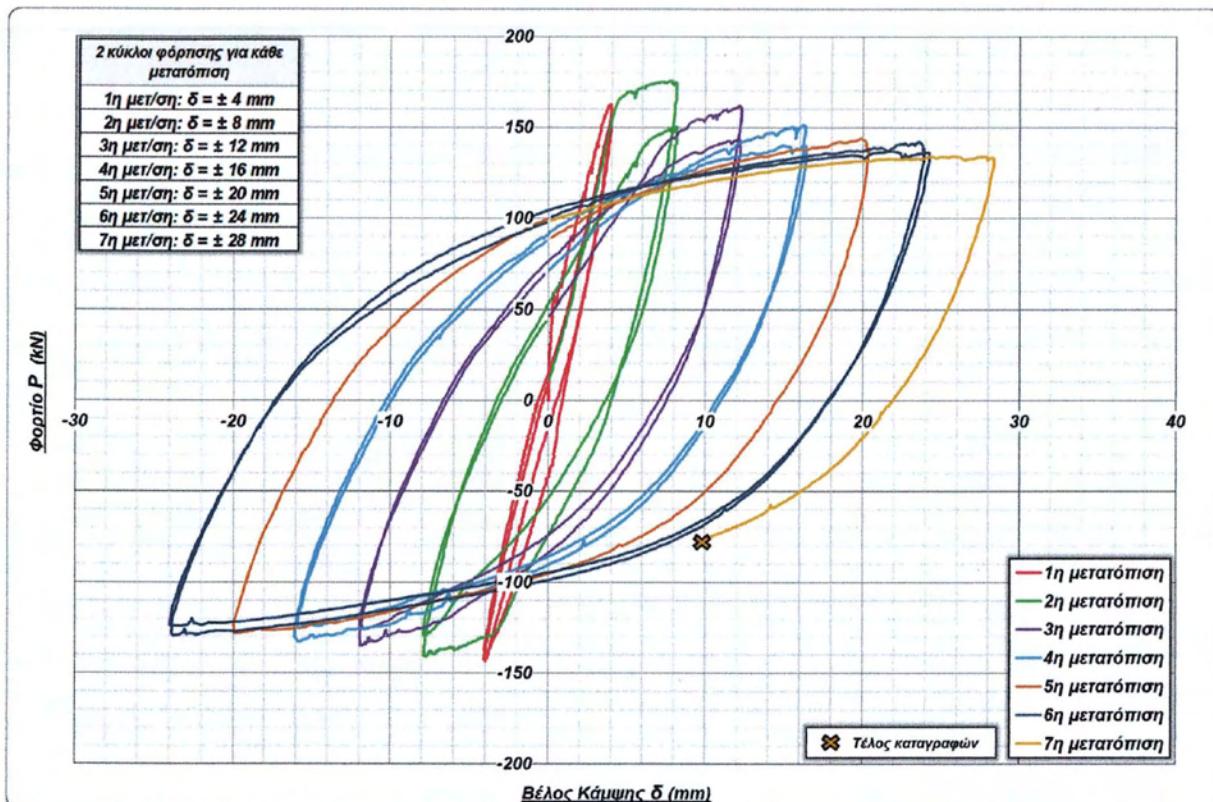
Πίνακας 6.4. Λεπτομέρειες δοκού CFRT-12C

Ονομασία Δοκού	CFRT - 12C
	Ενίσχυση της RC-7C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	22 x 27,2 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	29/05/2013

Όπως και για την προηγούμενη δοκό, εκτός από τα διαγράμματα φορτίου και μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης (Σχήμα 6.22 και 6.23) παρουσιάζεται και το διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke (Σχήμα 6.24).



Σχήμα 6.22. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανοσυστοιχιών) δοκού CFRT-12C



Σχήμα 6.23. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανισιόμετρων) δοκού CFRT-12C σε φόρτιση κάμψης

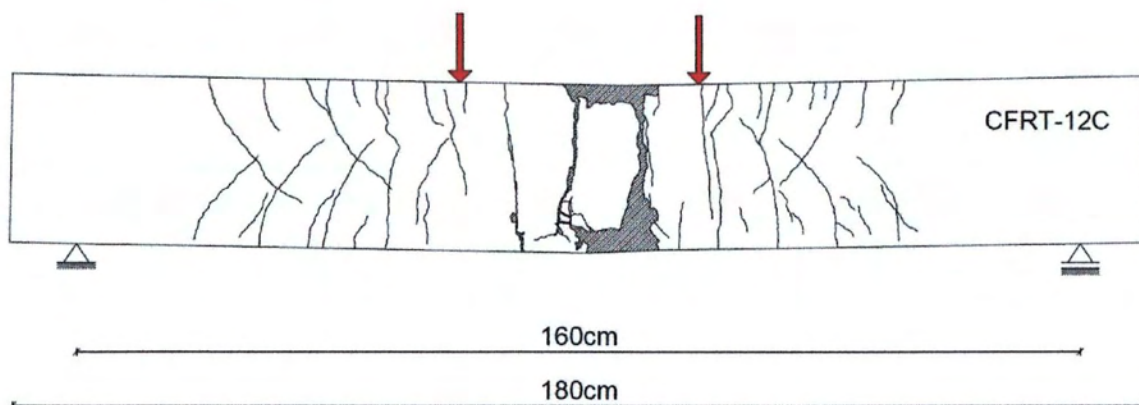
Παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του μανδύα είναι $M_{cr} = 4,93 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 16,18 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,046 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκους σπλισμού της ενίσχυσης στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 49,83 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 163,39 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 4,33 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max} = 53,53 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 175,5 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 7,85 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -43,61 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -3,97 \text{ mm}$.

Όπως και στην προηγούμενη δοκό CFRT-11C, σε μερικά σημεία των διαγραμμάτων, παρατηρείται απότομη απομείωση της αντοχής της δοκού που οφείλεται στην αποκοπή των ράβδων. Στη δοκό CFRT-12C, ωστόσο, αποκόπηκαν λιγότερες ράβδοι σπλισμού ενώ οι περισσότερες λύγισαν, η μία μάλιστα εκτός επιπέδου. Το σκυρόδεμα του μανδύα αστόχησε σε θλίψη, κάτι το οποίο γενικά δεν είναι επιθυμητό, όμως αυτό συνέβη για αυξημένες τιμές του βέλους κάμψης και αφού είχε επιτευχθεί η μέγιστη καμπτική αντοχή. Αυτό μπορεί και να οφείλεται στην πολύ μικρή παραπάνω ποσότητα νερού που προστέθηκε κατά τη σκυροδέτηση, λόγω της δυσκολίας ανάδευσης του μίγματος (Υποκεφάλαιο 4.1.2.). Η γενική συμπεριφορά της ενίσχυσης ήταν ικανοποιητική σε σύγκριση με την αρχική δοκό RC-7C, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.



Σχήμα 6.24. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke δοκού CFRT-12C

Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης, ενώ στα Σχήματα 6.26 – 6.29 φωτογραφίες της δοκού σε διάφορα στάδια της δοκιμής. Όπως και στη δοκό CFRT-11C, παρατηρείται συγκέντρωση των παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού, με την εμφάνιση δύο ρωγμών μεγάλου ανοίγματος, αλλά και πολλές τριχοειδείς ρωγμές στην υπόλοιπη δοκό.



Σχήμα 6.25. Αποτύπωση ρωγμών της δοκού CFRT-12C στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.26. Φωτογραφία δοκού CFRT-12C πριν την επιβολή της φόρτισης



Σχήμα 6.27. Δημιουργία πρώτων ρωγμών στη δοκό CFRT-12C



Σχήμα 6.28. Φωτογραφία των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.29. Κοντινή φωτογραφία της περιοχής αστοχίας της δοκού CFRT-12C

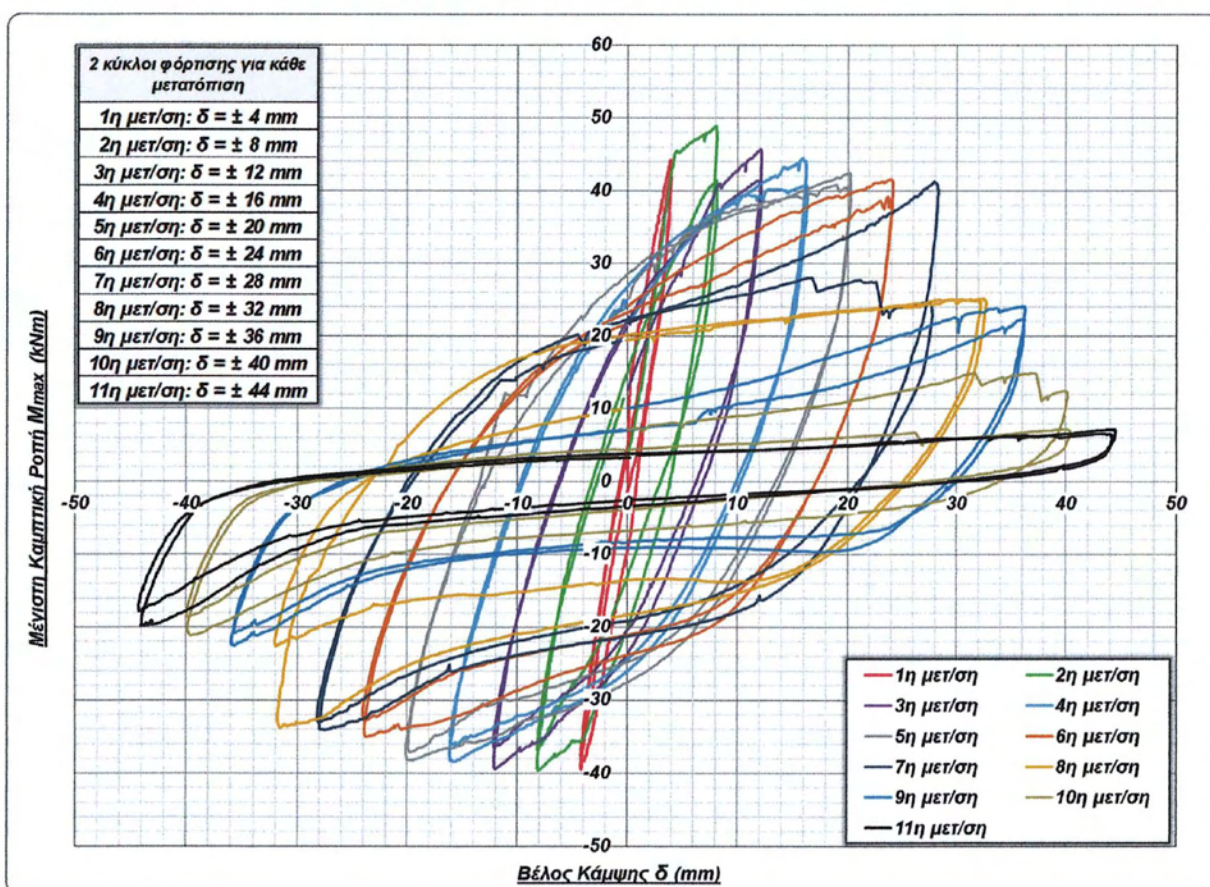
6.3. Δοκοί Ο/Σ ενισχυμένες με μανδύα από συμβατικό σκυρόδεμα

6.3.1. Δοκός CRLT-13C (Μανδύας κανονικής θλιπτικής αντοχής)

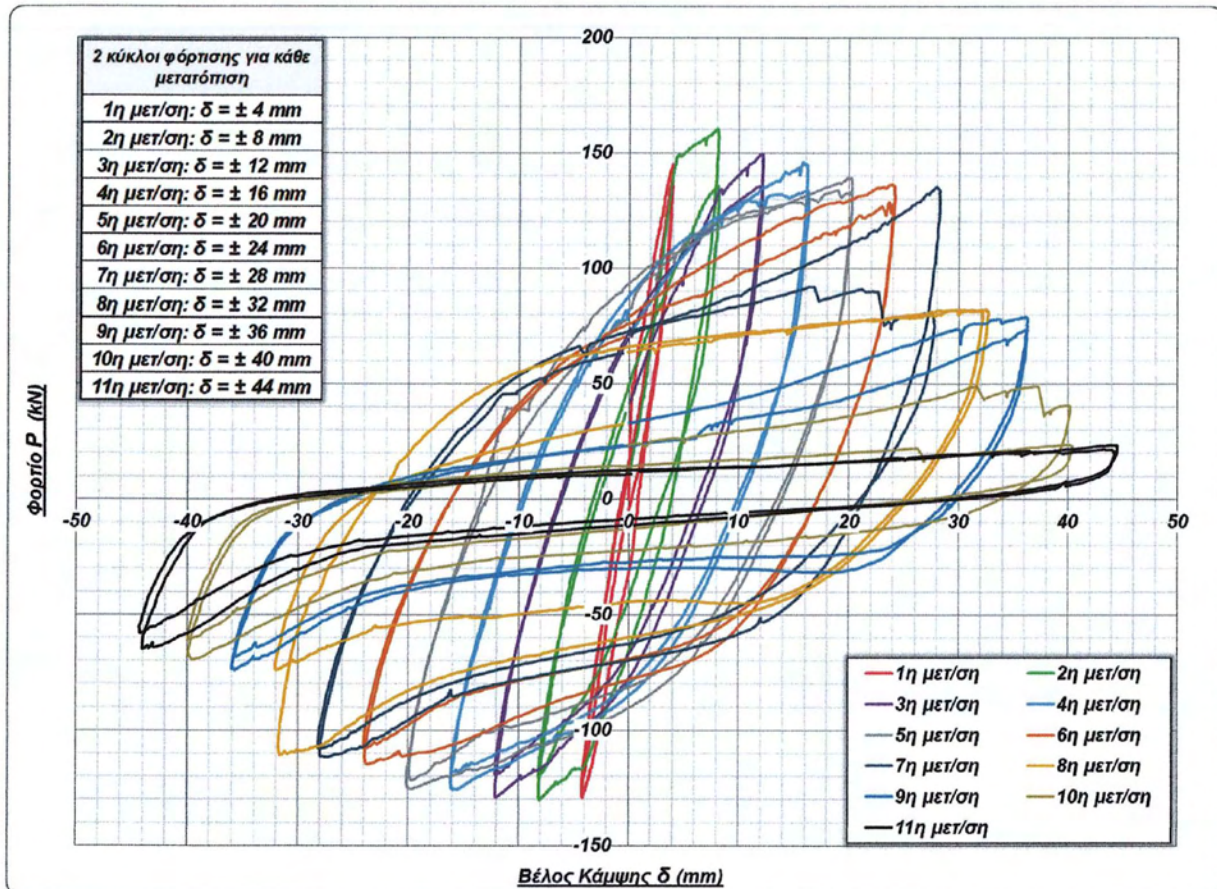
Πίνακας 6.5. Λεπτομέρειες δοκού CRLT-13C

Ονομασία Δοκού	CRLT - 13C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	22 x 27 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	31/05/2013

Εκτός από τα διαγράμματα φορτίου και μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης (Σχήμα 6.30 και 6.31) παρουσιάζεται και το διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke (Σχήμα 6.32).

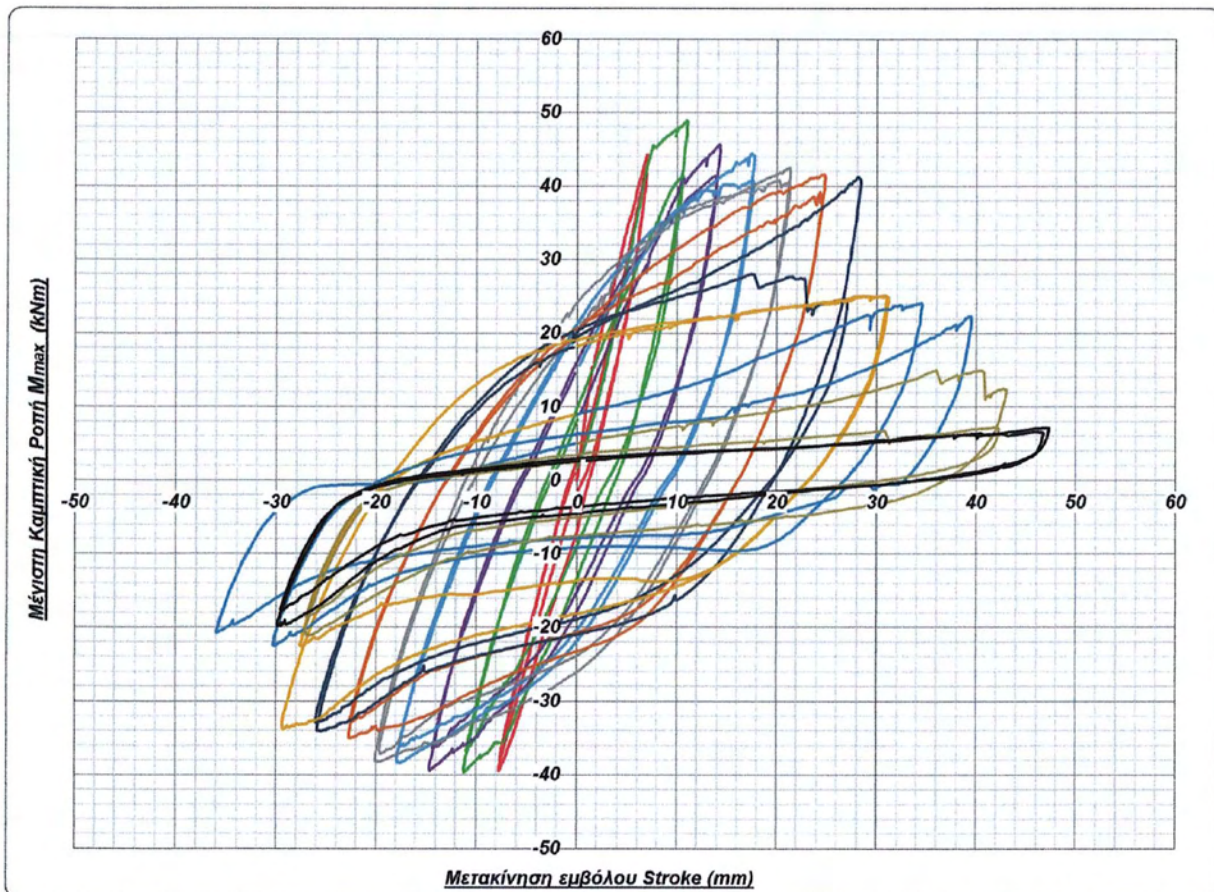


Σχήμα 6.30. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανισιόμετρων) δοκού CRLT-13C



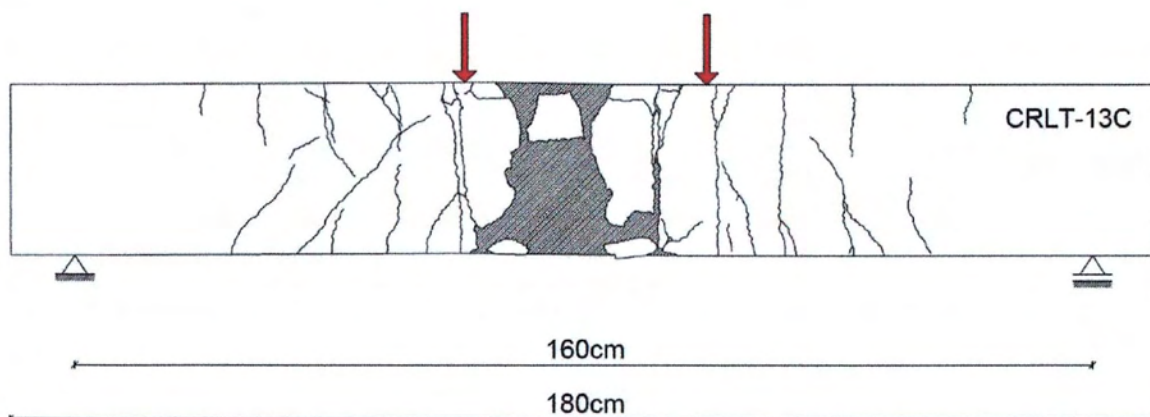
Σχήμα 6.31. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηχανισμικών) δοκού CRLT-13C σε φόρτιση κάμψης

Παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του μανδύα είναι $M_{cr} = 9,89 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 32,42 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,139 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκους οπλισμού της ενίσχυσης στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 45,49 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 149,14 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 4,5 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max} = 48,87 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 160,24 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 8,05 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -39,71 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -8,07 \text{ mm}$.



Σχήμα 6.32. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke δοκού CRLT-13C

Στο Σχήμα 6.33 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης, ενώ στα Σχήματα 6.34 – 6.37 φωτογραφίες της δοκού σε διάφορα στάδια της δοκιμής. Παρατηρείται έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος με αποκάλυψη των συνδετήρων καθ' ύψος στην περιοχή αστοχίας (στο μέσο της δοκού), μεταξύ των σημείων επιβολής φορτίου, ενώ εμφανίστηκαν τριχοειδείς ρωγμές στην υπόλοιπη δοκό.



Σχήμα 6.33. Αποτύπωση ρωγμών της δοκού CRLT-13C στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.34. Φωτογραφία δοκού CRLT-13C πριν την επιβολή της φόρτισης



Σχήμα 6.35. Δημιουργία πρώτων ρωγμών στη δοκό CRLT-13C



Σχήμα 6.36. Φωτογραφία των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



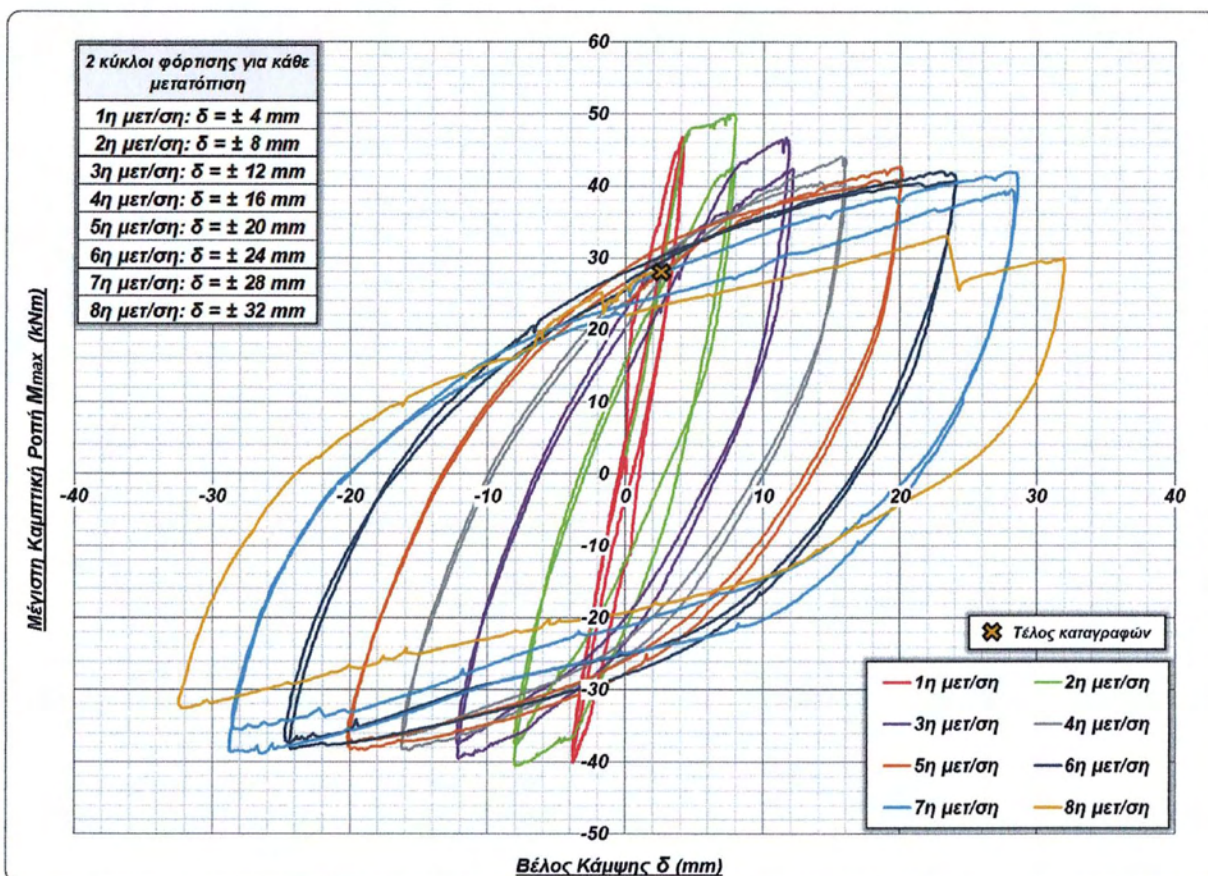
Σχήμα 6.37. Κοντινή φωτογραφία της περιοχής αστοχίας της δοκού CRLT-13C

6.3.2. Δοκός CRHT-14C (Μανδύας υψηλής θλιπτικής αντοχής)

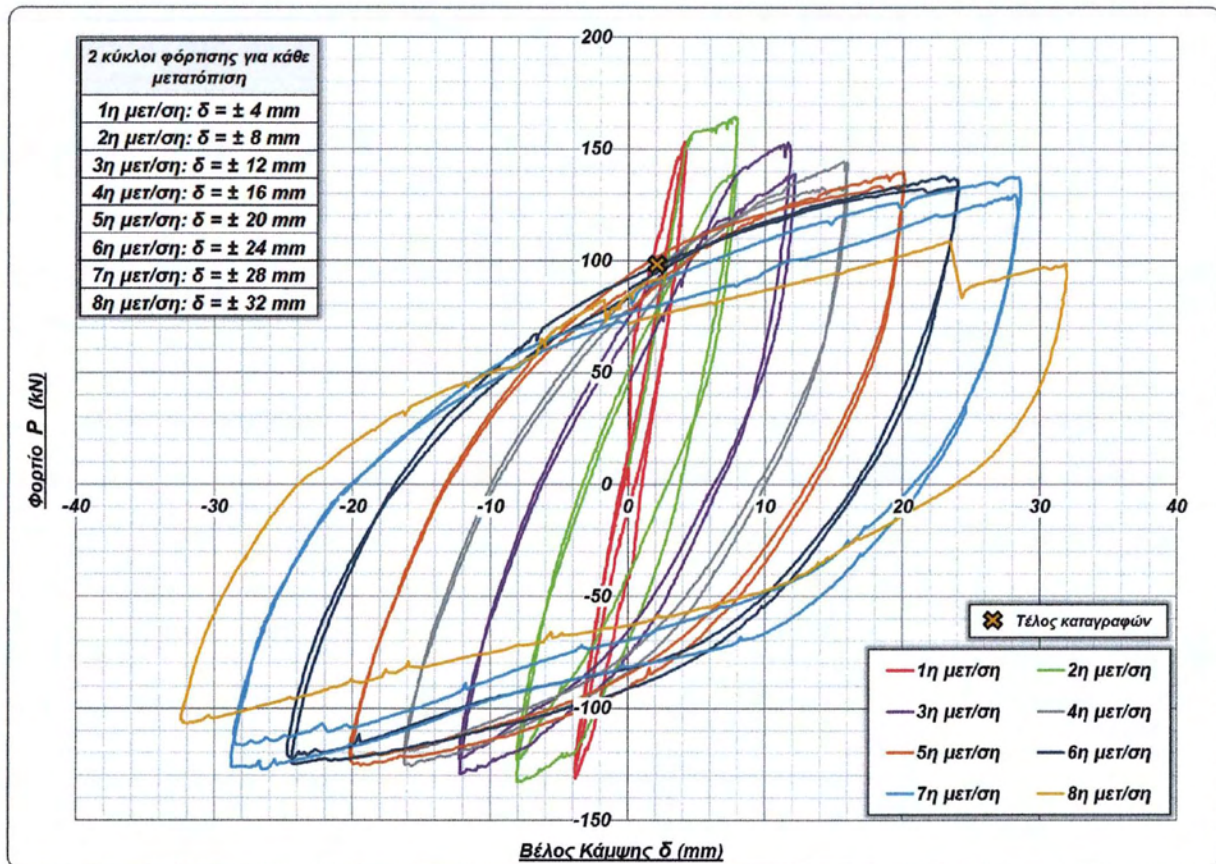
Πίνακας 6.6. Λεπτομέρειες δοκού CRHT-14C

Ονομασία Δοκού	CRHT - 14C
Δοκιμή - Είδος φόρτισης	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων
Διαστάσεις δοκιμίου (cm)	22 x 27,4 x 180
Ημερομηνία δοκιμής	04/06/2013

Εκτός από τα διαγράμματα φορτίου και μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης (Σχήμα 6.38 και 6.39) παρουσιάζεται και το διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke (Σχήμα 6.40).

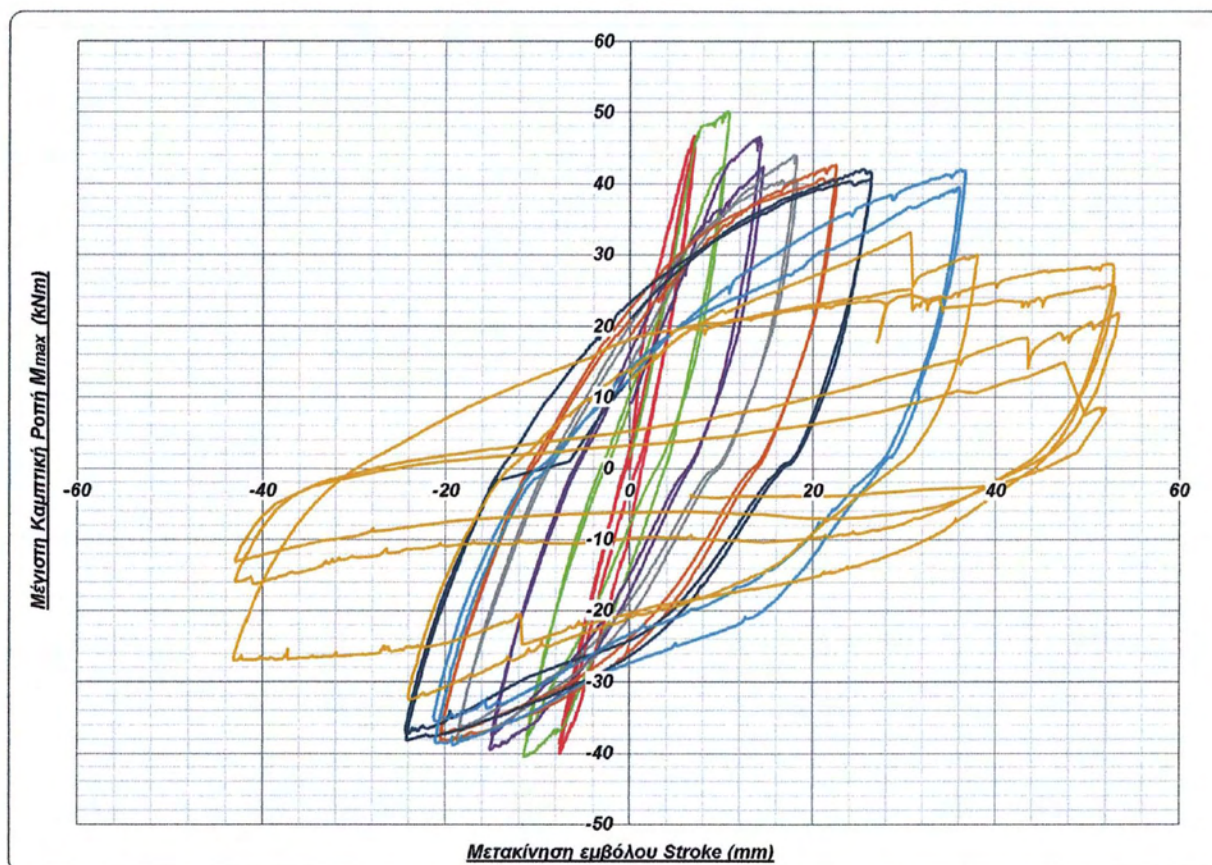


Σχήμα 6.38. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηκυνσιόμετρων) δοκού CRHT-14C



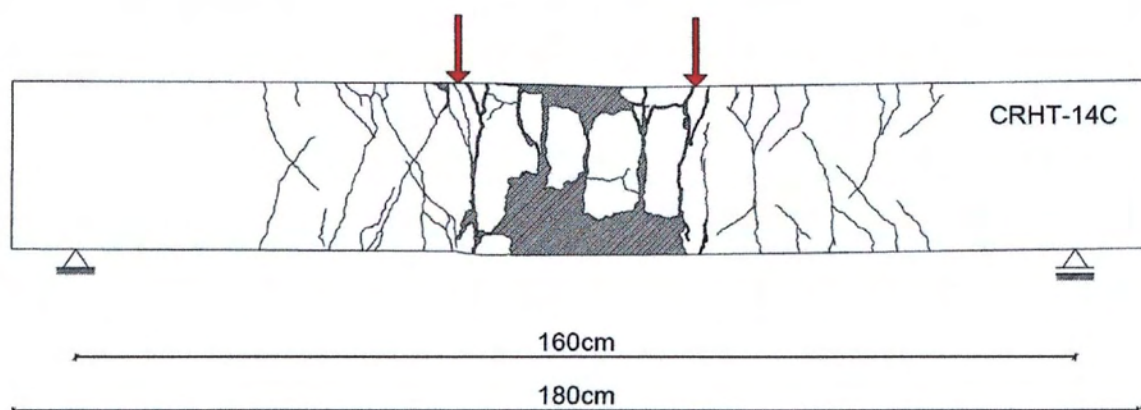
Σχήμα 6.39. Διάγραμμα φορτίου – επιβαλλόμενου βέλους κάμψης (μ.ό. μηκυσιόμετρων) δοκού CRHT-14C σε φόρτιση κάμψης

Παρατηρείται ότι η καμπτική ροπή ρηγμάτωσης του μανδύα είναι $M_{cr} = 9,53 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{cr} = 31,25 \text{ kN}$) και το βέλος κάμψης σε αυτή τη φάση της φόρτισης είναι $\delta_{cr} = 0,11 \text{ mm}$. Η καμπτική ροπή διαρροής του διαμήκουσ οπλισμού της ενίσχυσης στη κάτω παρειά της δοκού είναι $M_y = 48,19 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_y = 157,98 \text{ kN}$) και πραγματοποιείται για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_y = 5,01 \text{ mm}$. Η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max} = 50,13 \text{ kNm}$ (το αντίστοιχο φορτίο είναι $P_{max} = 164,35 \text{ kN}$) και για βέλος κάμψης ίσο με $\delta_{max} = 7,75 \text{ mm}$. Για την αντίθετη φορά της φόρτισης, η μέγιστη καμπτική ροπή που αναπτύχθηκε είναι $M_{max}^{(-)} = -40,55 \text{ kNm}$ για τιμή του βέλους κάμψης $\delta_{max}^{(-)} = -7,99 \text{ mm}$.



Σχήμα 6.40. Διάγραμμα μέγιστης καμπτικής ροπής – μετακίνησης εμβόλου Stroke δοκού CRHT-14C

Στο Σχήμα 6.41 παρουσιάζεται η αποτύπωση των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης, ενώ στα Σχήματα 6.42 – 6.45 φωτογραφίες της δοκού σε διάφορα στάδια της δοκιμής. Όπως και στη δοκό CRLT-13C, παρατηρείται έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος με αποκάλυψη των συνδετήρων καθ' ύψος στην περιοχή αστοχίας (στο μέσο της δοκού).



Σχήμα 6.41. Αποτύπωση ρωγμών της δοκού CRHT-14C στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.42. Φωτογραφία δοκού CRHT-14C πριν την επιβολή της φόρτισης



Σχήμα 6.43. Φωτογραφία δοκού CRHT-14C κατά τη διάρκεια της φόρτισης



Σχήμα 6.44. Φωτογραφία των ρωγμών στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.45. Φωτογραφία της περιοχής αστοχίας της δοκού CRHT-14C από την άλλη πλευρά της

Κεφάλαιο 7 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων

7.1. Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με τις δοκούς Ο/Σ

7.1.1 Δοκός CFRT-11C

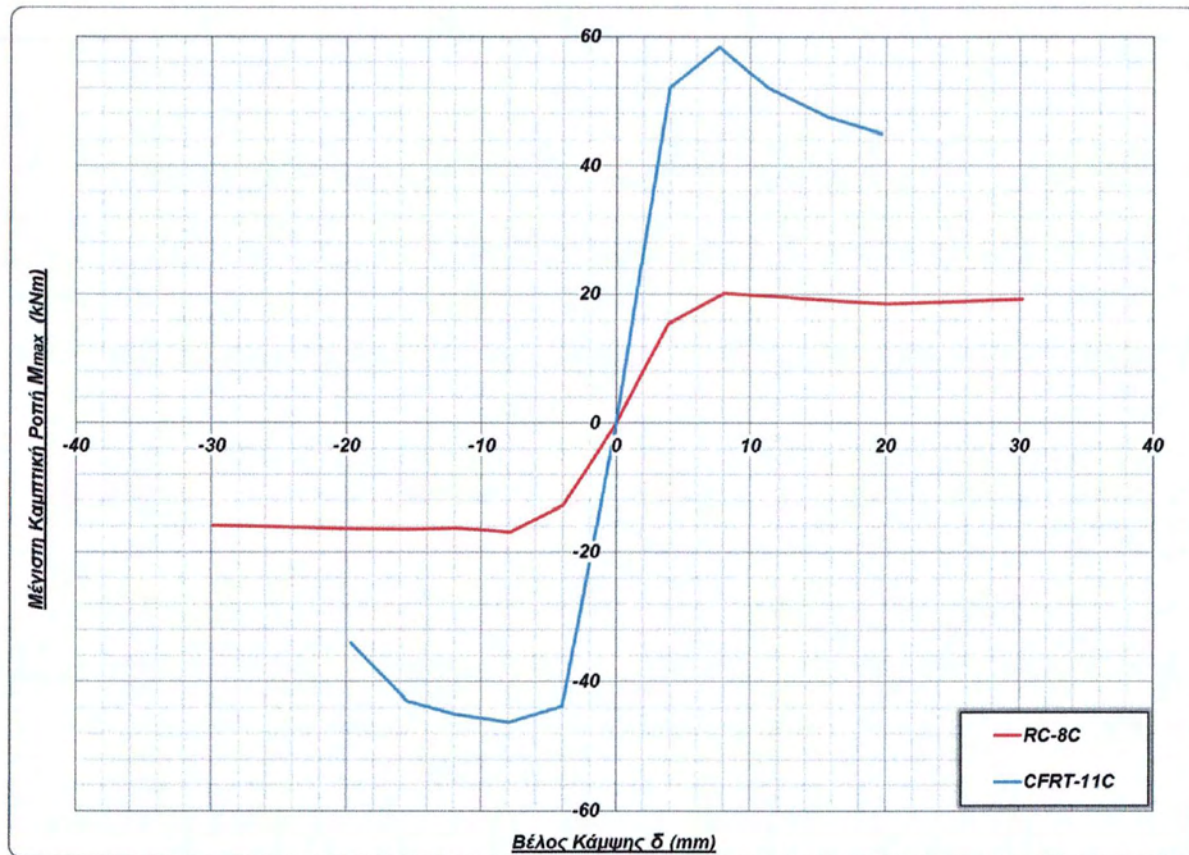
Όπως έχει προαναφερθεί, η δοκός RC-8C ενισχύθηκε με μανδύα από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και η ενισχυμένη δοκός ονομάστηκε CFRT-11C. Η σύγκριση της συμπεριφοράς τους παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα.



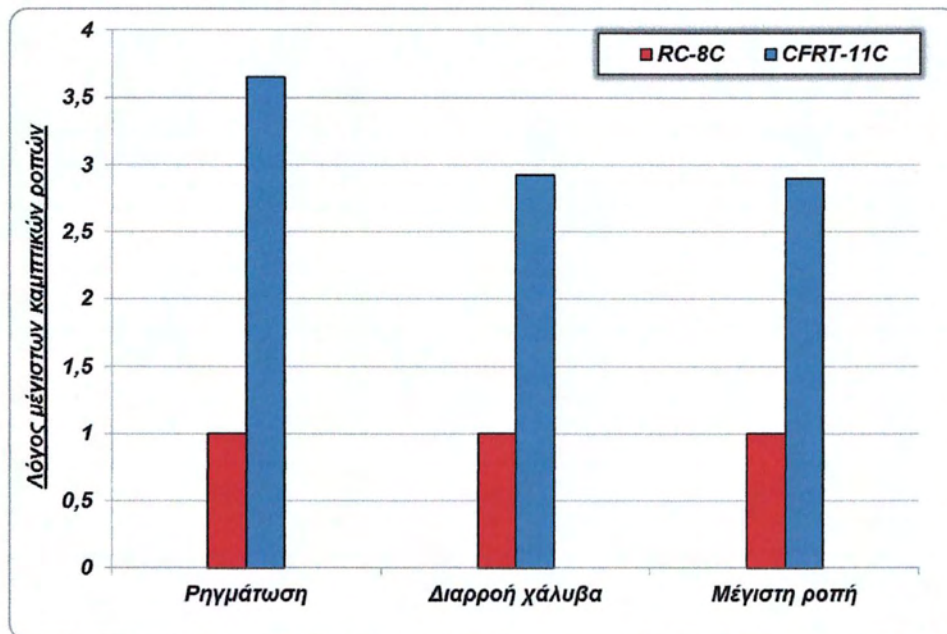
Σχήμα 7.1. Σύγκριση διαγραμμάτων μέγιστης καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης των δοκών RC-8C και CFRT-11C

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο βέλος κάμψης των δοκών RC-8C και CFRT-11C, δηλαδή της αρχικής δοκού και της ενίσχυσής της, ενώ στο Σχήμα 7.2 οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δύο δοκών.

Η ενισχυμένη δοκός CFRT-11C παρουσίασε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, η οποία ήταν 3,65 φορές στη ρηγμάτωση του μανδύα, 2,92 φορές στη διαρροή του διαμήκου σπλισμού της ενίσχυσης και 2,9 φορές στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα η αντίστοιχη της αρχικής δοκού RC-8C. Οι συγκρίσεις αυτές αφορούν τη θετική φορά φόρτισης (Σχήμα 7.3). Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η μέση καμπτική αντοχή της CFRT-11C ήταν 2,5 φορές περίπου η αντίστοιχη της δοκού RC-8C και για τις δύο φορές της φόρτισης.

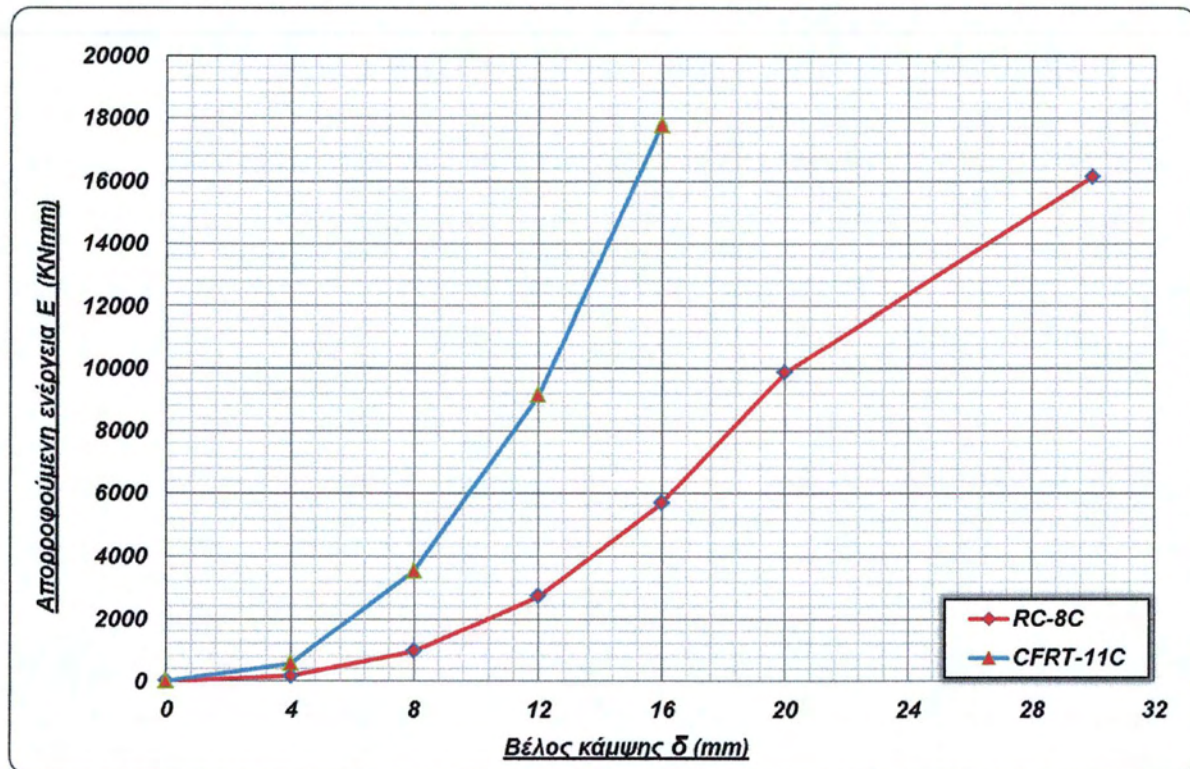


Σχήμα 7.2. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών RC-8C και CFRT-11C



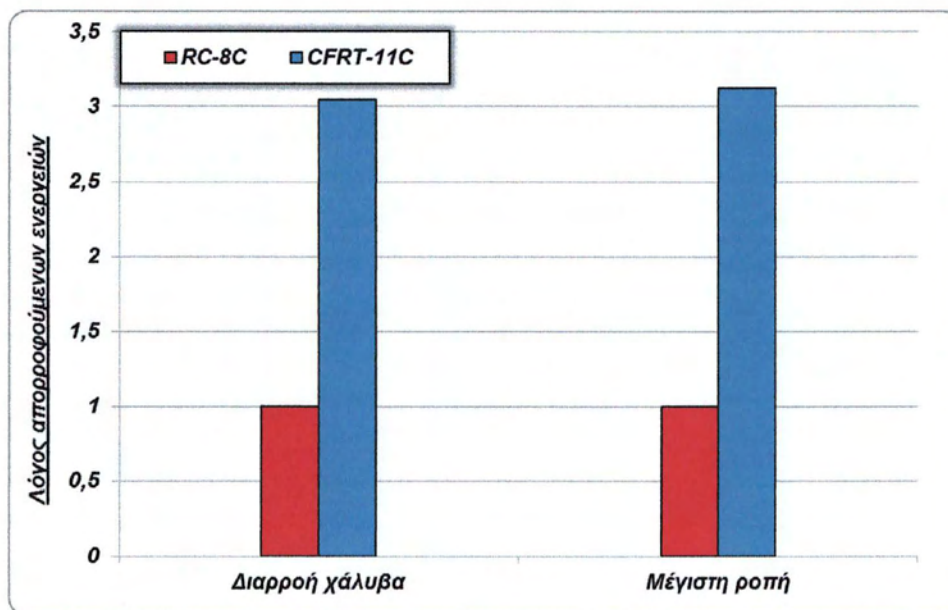
Σχήμα 7.3. Λόγος μέγιστης καμπτικής ροπής της δοκού CFRT-11C προς την αντίστοιχη της RC-8C

Στα Σχήματα 7.4 και 7.5 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των δοκών όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια. Συγκρίνοντας τη συνολική (αθροιστικά) απορροφούμενη ενέργεια των δύο δοκών μέχρι την ολοκλήρωση του 2^{ου} κύκλου φόρτισης για τιμή του βέλους κάμψης $\delta = \pm 16\text{mm}$, η ενισχυμένη δοκός εμφάνισε αυξημένη τιμή απορρόφησης ενέργειας κατά 3,13 φορές.



Σχήμα 7.4. Σύγκριση συνολικής (αθροιστικά) απορροφούμενης ενέργειας των δοκών RC-8C και CFRT-11C

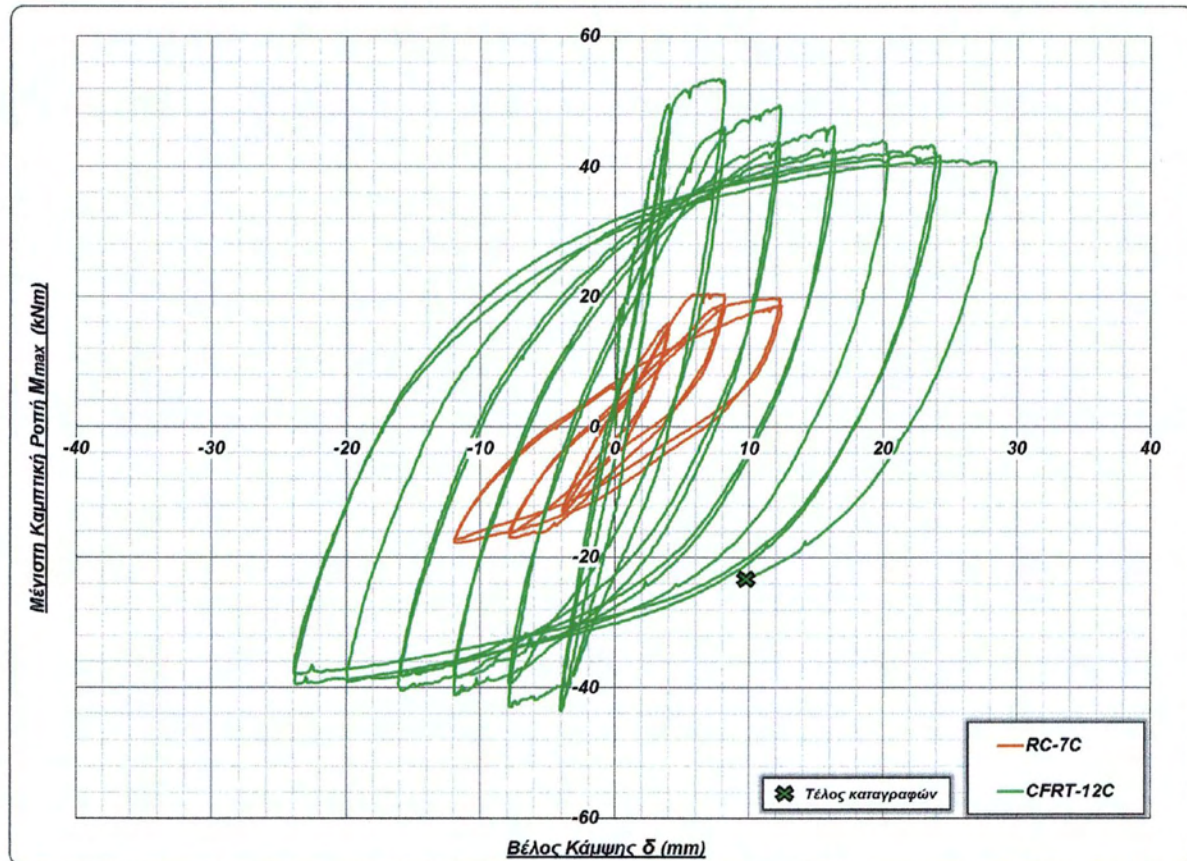
Πιο συγκεκριμένα, η απορροφούμενη ενέργεια της δοκού CFRT-11C μέχρι το σημείο διαρροής του χάλυβα ήταν 3,05 φορές η αντίστοιχη της δοκού RC-8C, ενώ μέχρι την επίτευξη της μέγιστης καμπτικής αντοχής 3,12 φορές.



Σχήμα 7.5. Λόγος απορροφούμενης ενέργειας της δοκού CFRT-11C προς την αντίστοιχη της RC-8C στη διαρροή του χάλυβα και στην επίτευξη της μέγιστης ροπής

7.1.2 Δοκός CFRT-12C

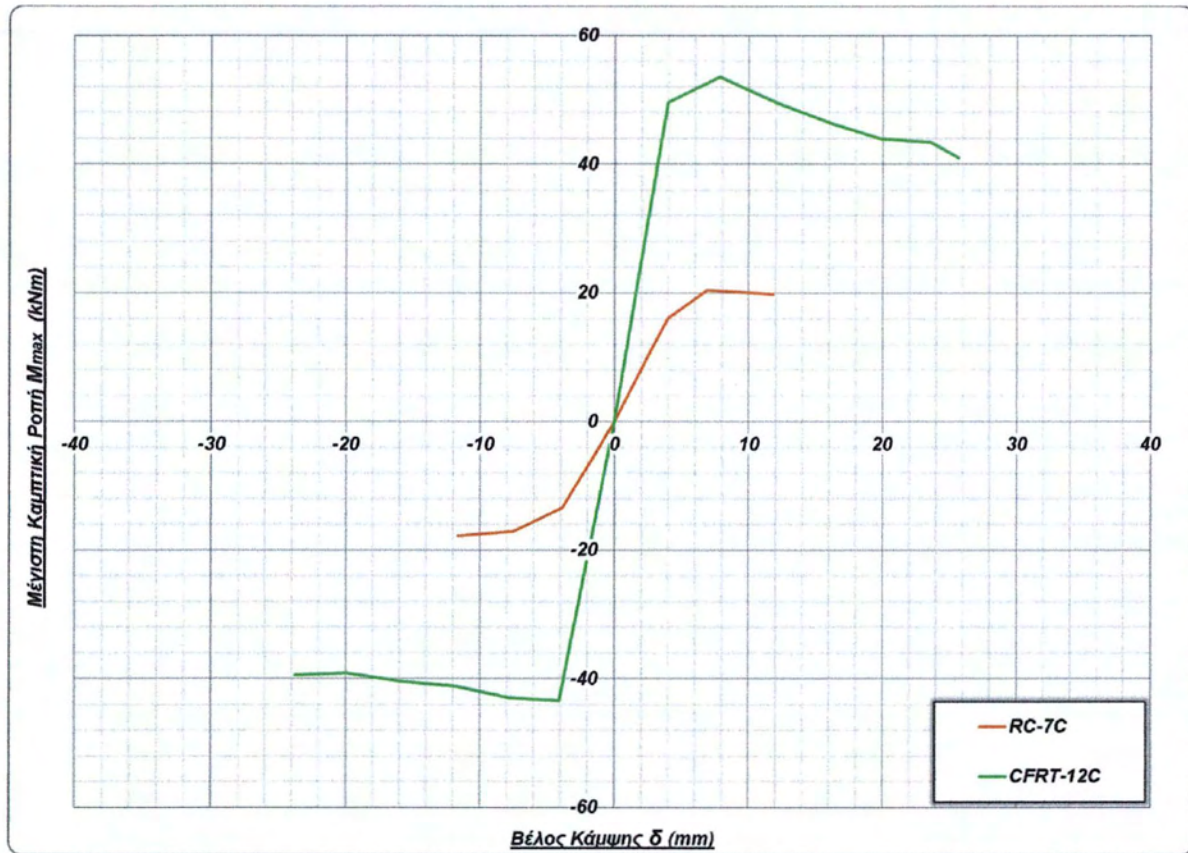
Όπως έχει προαναφερθεί, η δοκός RC-7C ενισχύθηκε με μανδύα από ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα και η ενισχυμένη δοκός ονομάστηκε CFRT-12C. Η σύγκριση της συμπεριφοράς τους παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα.



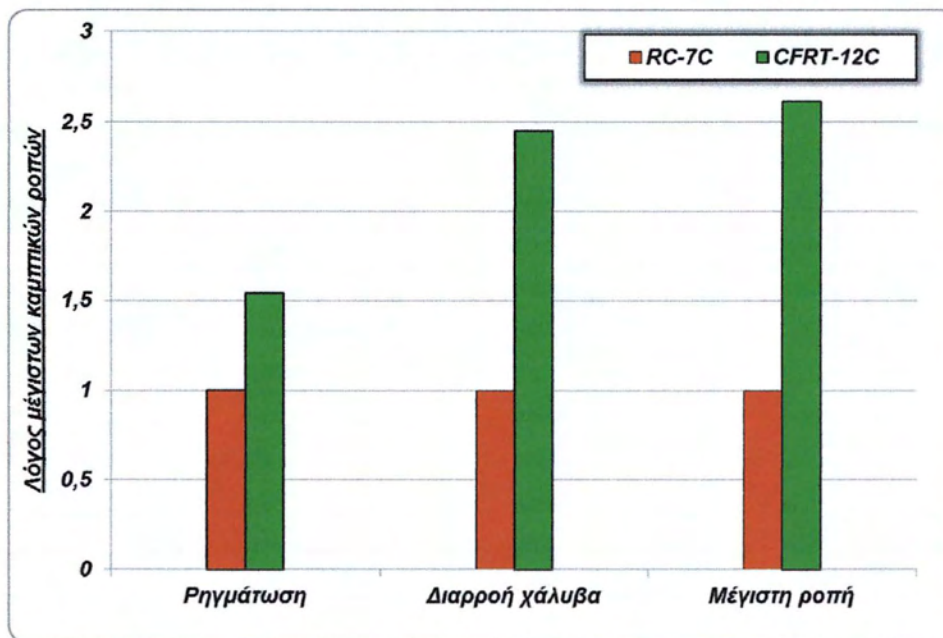
Σχήμα 7.6. Σύγκριση διαγραμμάτων μέγιστης καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης των δοκών RC-7C και CFRT-12C

Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο βέλος κάμψης των δοκών RC-7C και CFRT-12C, δηλαδή της αρχικής δοκού και της ενίσχυσής της, ενώ στο Σχήμα 7.7 οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δύο δοκών.

Η ενισχυμένη δοκός CFRT-12C παρουσίασε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, η οποία ήταν 1,54 φορές στη ρηγμάτωση του μανδύα, 2,45 φορές στη διαρροή του διαμήκου σπλισμού της ενίσχυσης και 2,61 φορές στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα η αντίστοιχη της αρχικής δοκού RC-7C. Οι συγκρίσεις αυτές αφορούν τη θετική φορά φόρτισης (Σχήμα 7.8). Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η μέση καμπτική αντοχή της CFRT-12C ήταν 2,4 φορές περίπου η αντίστοιχη της δοκού RC-7C και για τις δύο φορές της φόρτισης.

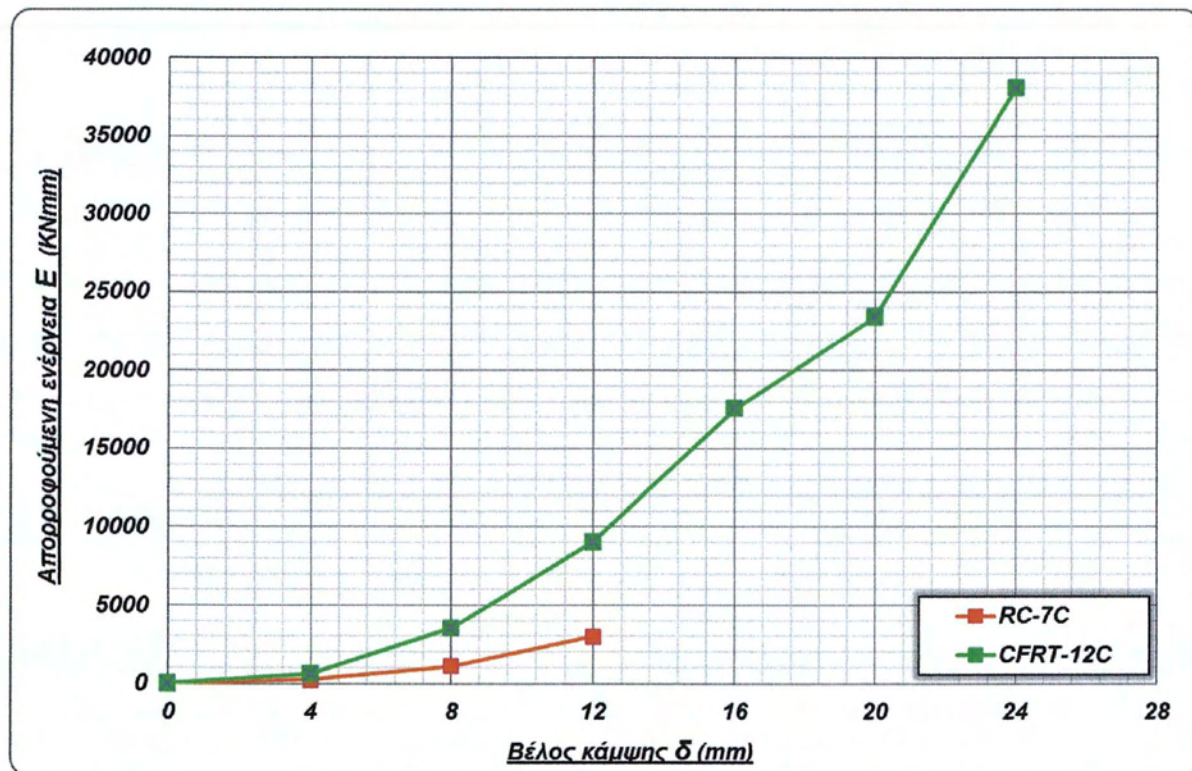


Σχήμα 7.7. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών RC-7C και CFRT-12C



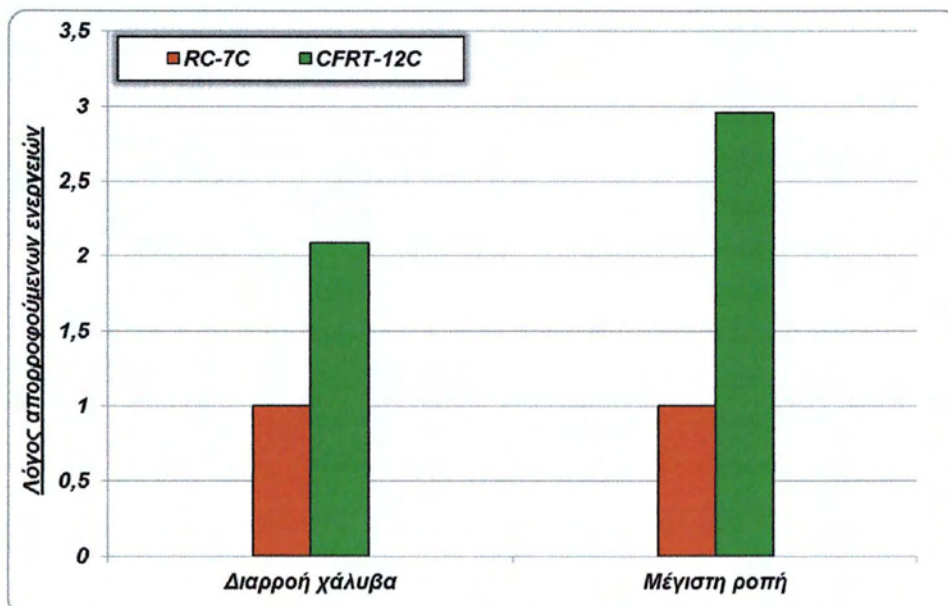
Σχήμα 7.8. Λόγος μέγιστης καμπτικής ροπής της δοκού CFRT-12C προς την αντίστοιχη της RC-7C

Στα Σχήματα 7.9 και 7.10 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των δοκών όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια. Συγκρίνοντας τη συνολική (αθροιστικά) απορροφούμενη ενέργεια των δύο δοκών μέχρι την ολοκλήρωση του 2^{ου} κύκλου φόρτισης για τιμή του βέλους κάμψης $\delta = \pm 12\text{mm}$, η ενισχυμένη δοκός εμφάνισε αυξημένη τιμή απορρόφησης ενέργειας κατά 3,03 φορές σε σύγκριση με την αρχική δοκό RC-7C.



Σχήμα 7.9. Σύγκριση συνολικής (αθροιστικά) απορροφούμενης ενέργειας των δοκών RC-7C και CFRT-12C

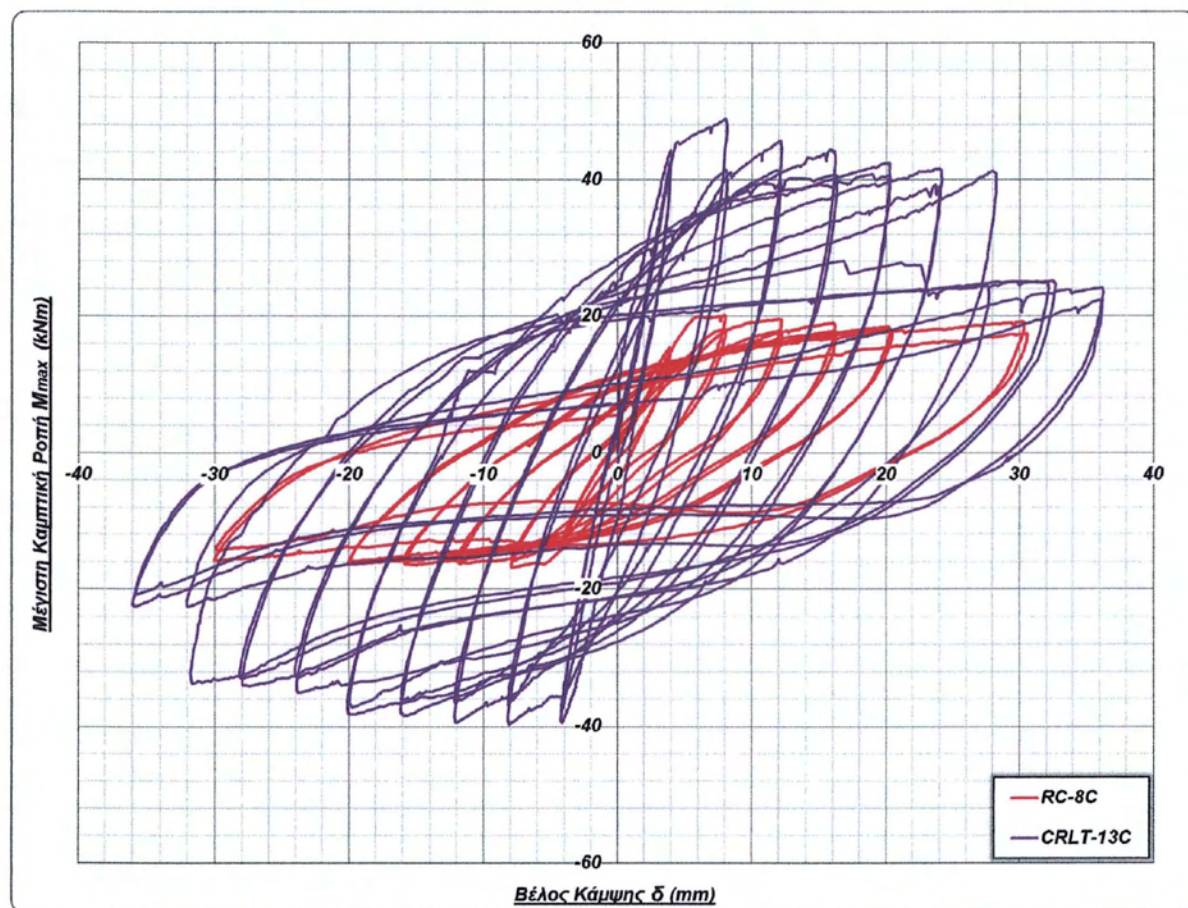
Πιο συγκεκριμένα, η απορροφούμενη ενέργεια της δοκού CFRT-12C μέχρι το σημείο διαρροής του χάλυβα ήταν 2,09 φορές η αντίστοιχη της δοκού RC-7C, ενώ μέχρι την επίτευξη της μέγιστης καμπτικής αντοχής 2,96 φορές.



Σχήμα 7.10. Λόγος απορροφούμενης ενέργειας της δοκού CFRT-12C προς την αντίστοιχη της RC-7C στη διαρροή του χάλυβα και στην επίτευξη της μέγιστης ροπής

7.1.3. Σύγκριση CRLT-13C με RC-8C

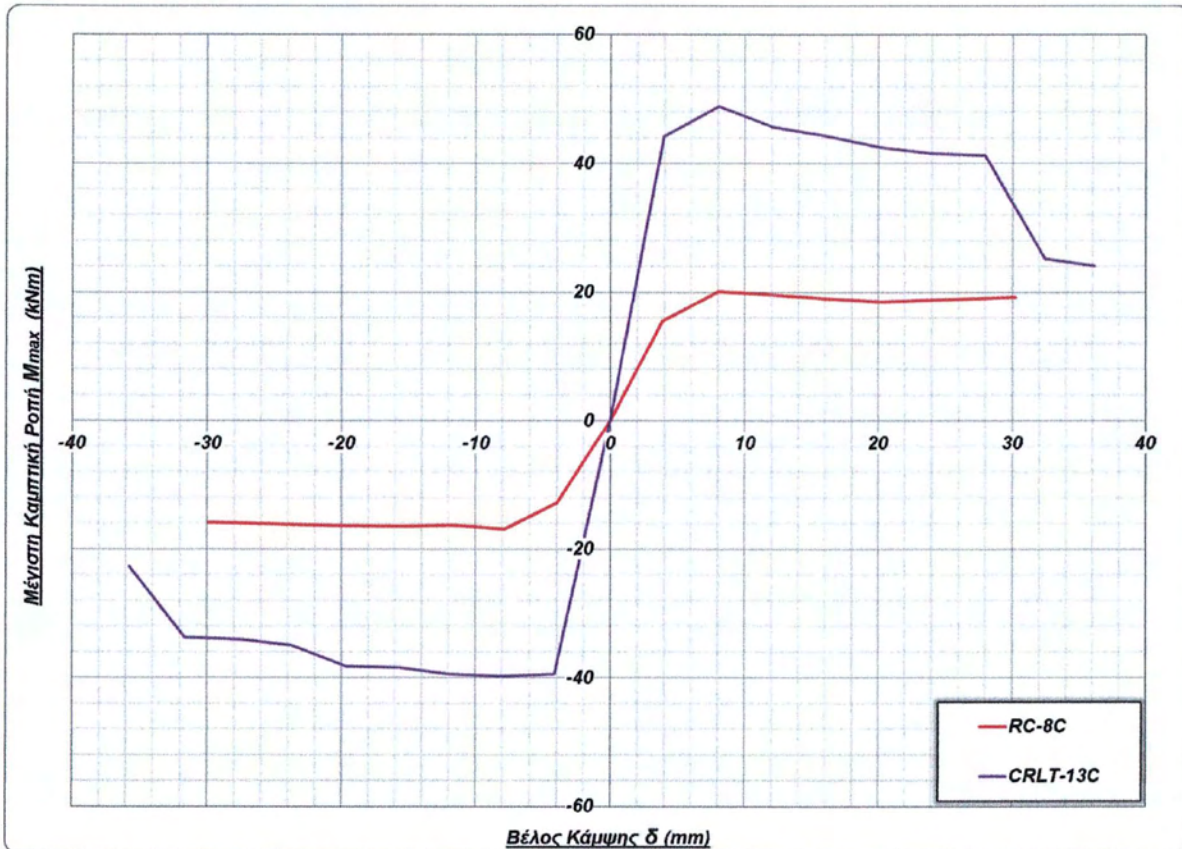
Όπως έχει προαναφερθεί, μία δοκός ακριβώς ίδια με τις RC-7C και RC-8C, ενισχύθηκε με μανδύα από σκυρόδεμα κανονικής αντοχής και η ενισχυμένη δοκός ονομάστηκε CRLT-13C. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού και της δοκού RC-8C. Πρέπει να σημειωθεί πως το διάγραμμα της RC-8C δεν αποτελεί φόρτιση δημιουργίας αρχικής βλάβης, αλλά η σύγκριση γίνεται για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.



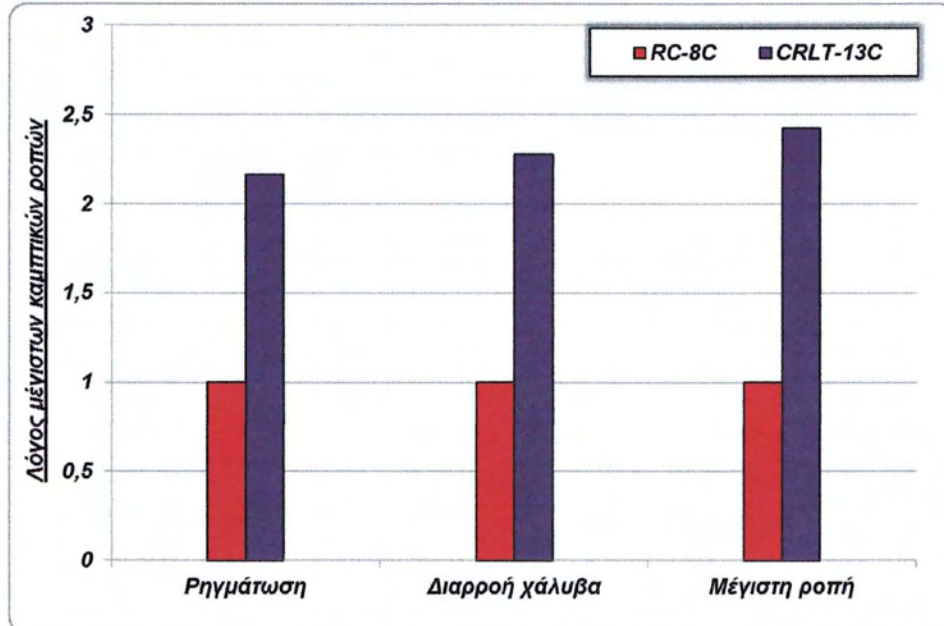
Σχήμα 7.11. Σύγκριση διαγραμμάτων μέγιστης καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης των δοκών RC-8C και CRLT-13C

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο βέλος κάμψης των δοκών RC-8C και CRLT-13C, ενώ στο Σχήμα 7.12 οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δύο δοκών.

Η ενισχυμένη δοκός CRLT-13C παρουσίασε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, η οποία ήταν 2,16 φορές στη ρηγμάτωση του μανδύα, 2,28 φορές στη διαρροή του διαμήκους οπλισμού της ενίσχυσης και 2,42 φορές στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα η αντίστοιχη της δοκού RC-8C. Οι συγκρίσεις αυτές αφορούν τη θετική φορά φόρτισης (Σχήμα 7.13). Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η μέση καμπτική αντοχή της CRLT-13C ήταν 2,3 φορές περίπου η αντίστοιχη της δοκού RC-8C και για τις δύο φορές της φόρτισης.



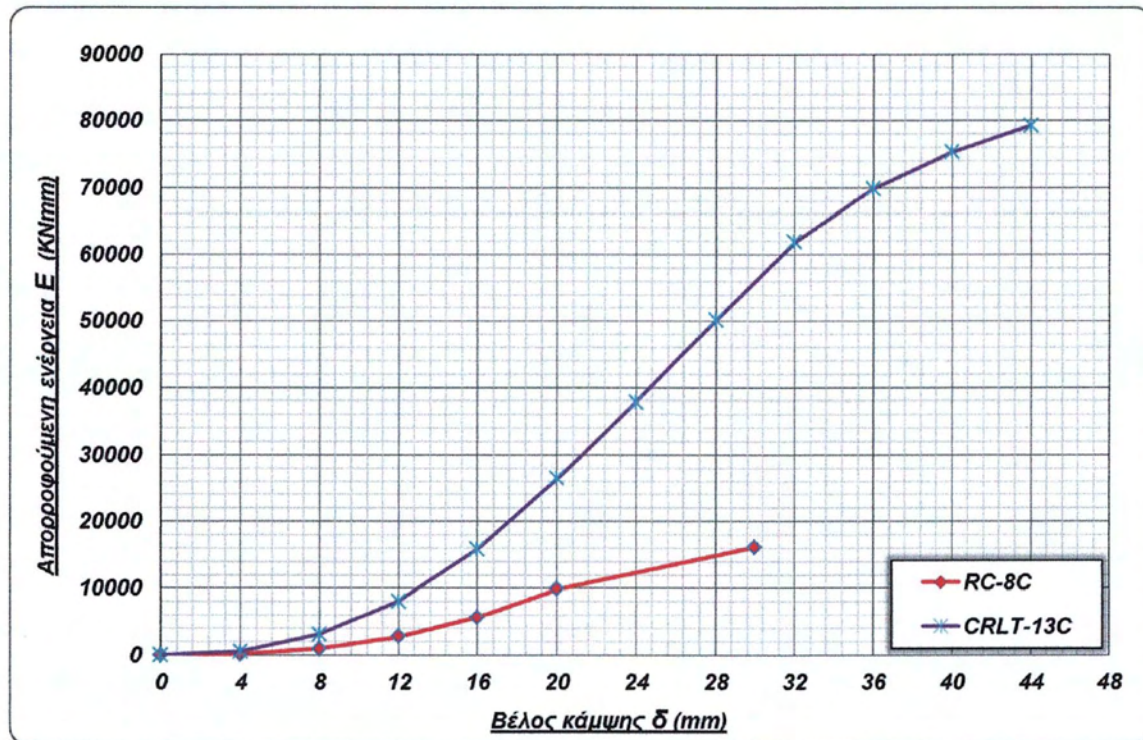
Σχήμα 7.12. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών RC-8C και CRLT-13C



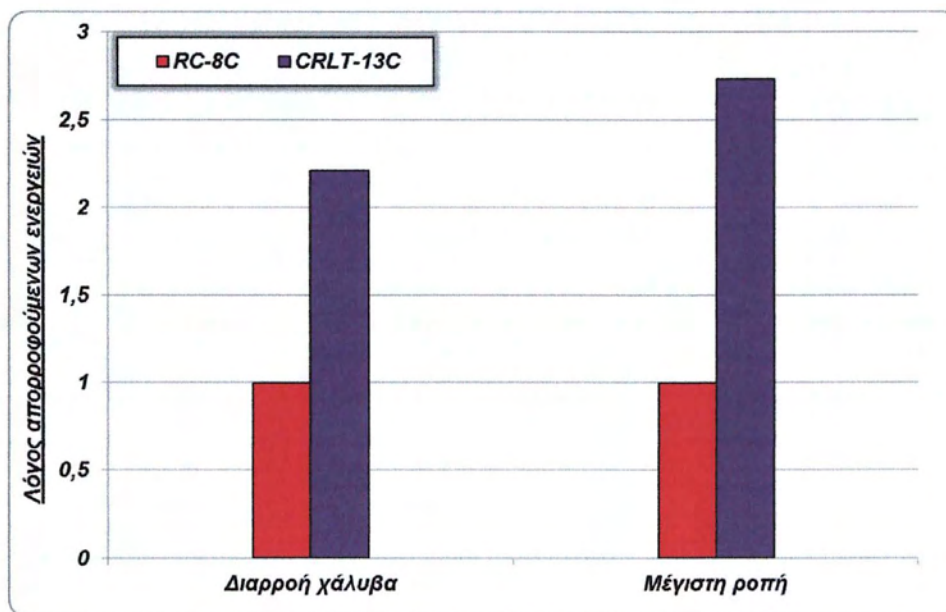
Σχήμα 7.13. Λόγος μέγιστης καμπτικής ροπής της δοκού CRLT-13C προς την αντίστοιχη της RC-8C

Στα Σχήματα 7.14 και 7.15 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των δοκών όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια. Συγκρίνοντας τη συνολική (αθροιστικά) απορροφούμενη ενέργεια των δύο δοκών μέχρι την ολοκλήρωση του 2^{ου} κύκλου φόρτισης για την τιμή του βέλους κάμψης $\delta = \pm 30\text{mm}$, η ενισχυμένη δοκός εμφάνισε αυξημένη τιμή απορρόφησης ενέργειας

κατά 3,47 φορές. Πιο συγκεκριμένα, η απορροφούμενη ενέργεια της δοκού CRLT-13C μέχρι το σημείο διαρροής του χάλυβα ήταν 2,21 φορές η αντίστοιχη της RC-8C, ενώ μέχρι την επίτευξη της μέγιστης καμπτικής αντοχής 2,73 φορές.



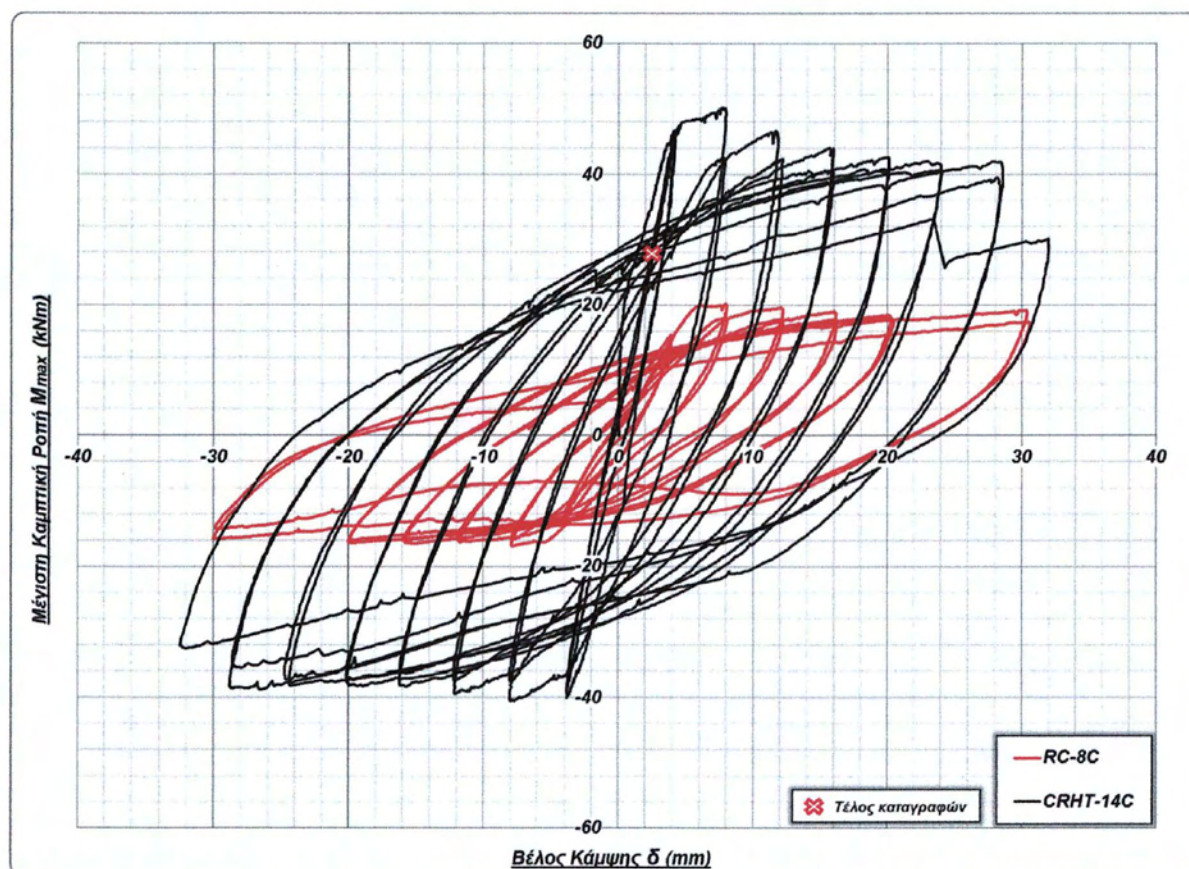
Σχήμα 7.14. Σύγκριση συνολικής (αθροιστικά) απορροφούμενης ενέργειας των δοκών RC-8C και CRLT-13C



Σχήμα 7.15. Λόγος απορροφούμενης ενέργειας της δοκού CRLT-13C προς την αντίστοιχη της RC-8C στη διαρροή του χάλυβα και στην επίτευξη της μέγιστης ροπής

7.1.4. Σύγκριση CRHT-14C με RC-8C

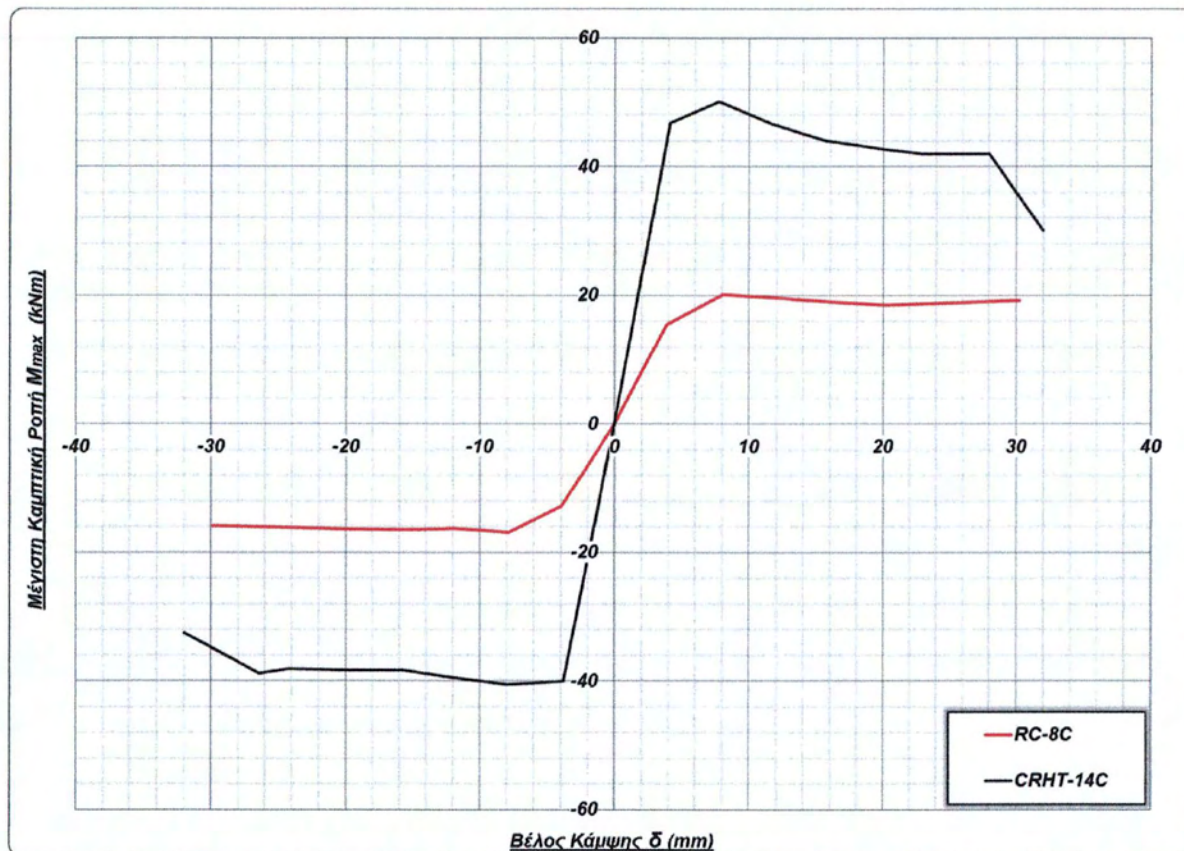
Όπως έχει προαναφερθεί, μία δοκός ακριβώς ίδια με τις RC-7C και RC-8C, ενισχύθηκε με μανδύα από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και η ενισχυμένη δοκός ονομάστηκε CRHT-14C. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού και της δοκού RC-8C. Πρέπει να σημειωθεί πως το διάγραμμα της RC-8C δεν αποτελεί φόρτιση δημιουργίας αρχικής βλάβης, αλλά η σύγκριση γίνεται για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.



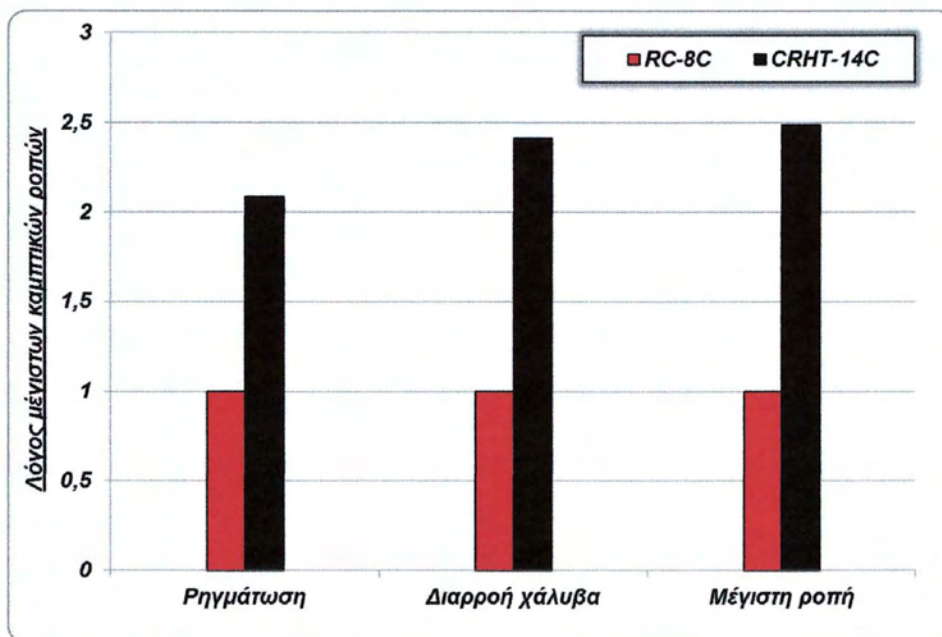
Σχήμα 7.16. Σύγκριση διαγραμμάτων μέγιστης καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης των δοκών RC-8C και CRHT-14C

Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μέγιστης καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο βέλος κάμψης των δοκών RC-8C και CRHT-14C, ενώ στο Σχήμα 7.17 οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δύο δοκών.

Η ενισχυμένη δοκός CRHT-14C παρουσίασε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, η οποία ήταν 2,09 φορές στη ρηγμάτωση του μανδύα, 2,41 φορές στη διαρροή του διαμήκου οπλισμού της ενίσχυσης και 2,49 φορές στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα η αντίστοιχη της δοκού RC-8C. Οι συγκρίσεις αυτές αφορούν τη θετική φορά φόρτισης (Σχήμα 7.18). Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η μέση καμπτική αντοχή της CRHT-14C ήταν 2,3 φορές περίπου η αντίστοιχη της RC-8C και για τις δύο φορές της φόρτισης.



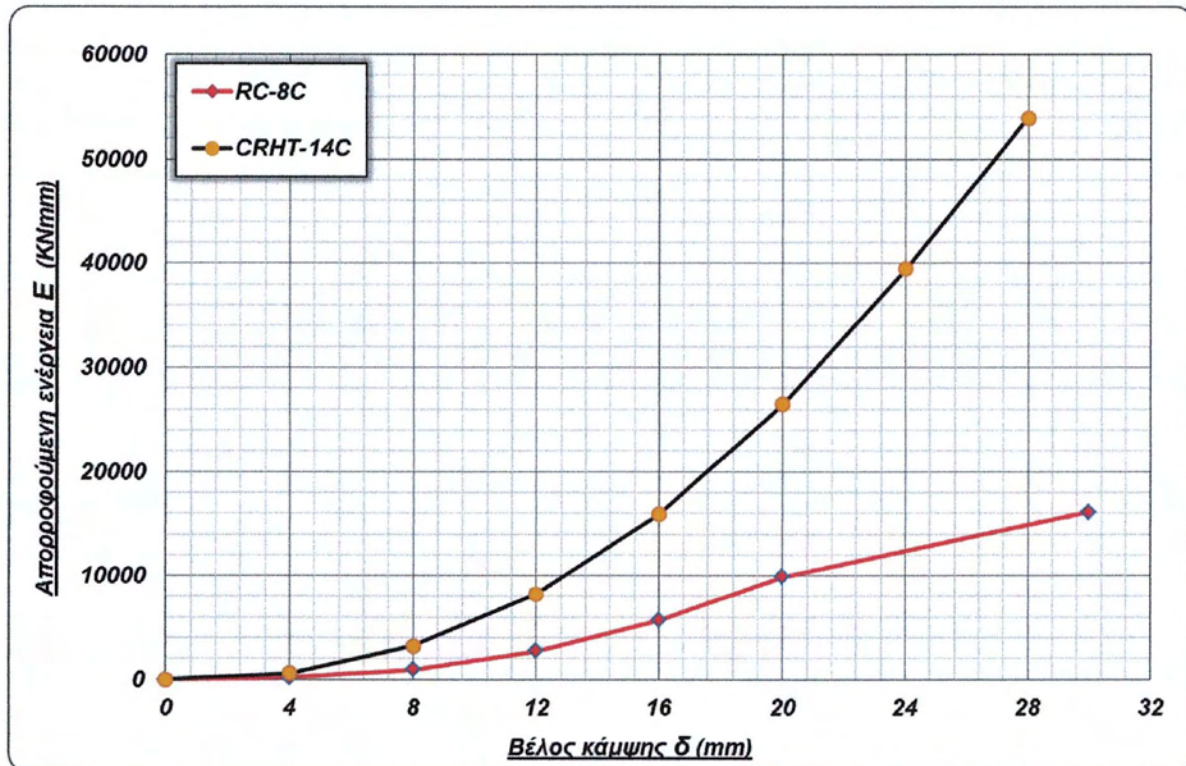
Σχήμα 7.17. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών RC-8C και CRHT-14C



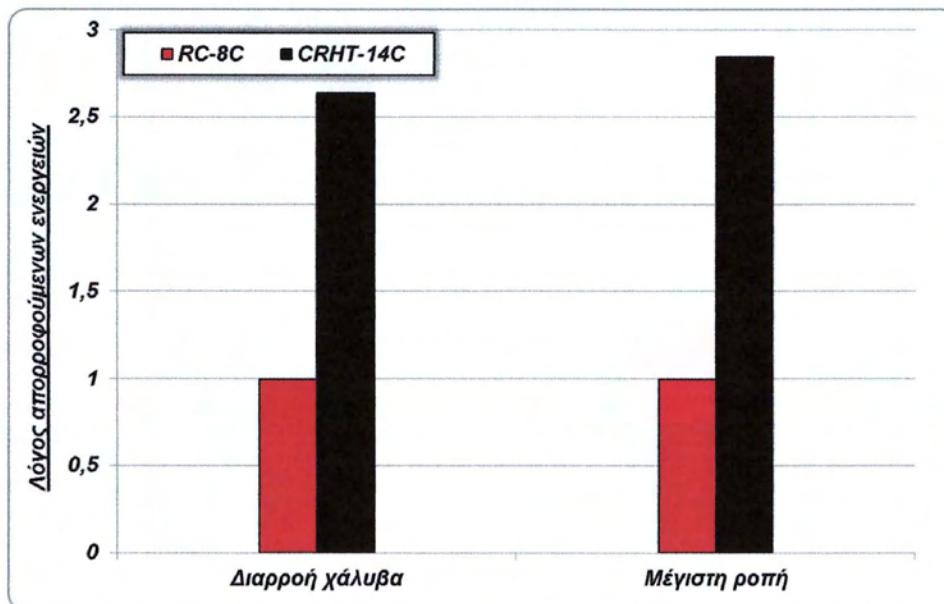
Σχήμα 7.18. Λόγος μέγιστης καμπτικής ροπής της δοκού CRHT-14C προς την αντίστοιχη της RC-8C

Στα Σχήματα 7.19 και 7.20 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των δοκών όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια. Συγκρίνοντας τη συνολική (αθροιστικά) απορροφούμενη ενέργεια των δύο δοκών μέχρι την ολοκλήρωση του 2^{ου} κύκλου φόρτισης για τιμή του βέλους κάμψης $\delta = \pm 28\text{mm}$, η ενισχυμένη δοκός εμφάνισε αυξημένη τιμή απορρόφησης ενέργειας κατά 3,62 φορές. Πιο συγκεκριμένα, η απορροφούμενη ενέργεια της δοκού CRHT-14C μέχρι το σημείο

διαρροής του χάλυβα ήταν 2,64 φορές η αντίστοιχη της RC-8C, ενώ μέχρι την επίτευξη της μέγιστης καμπτικής αντοχής 2,85 φορές.

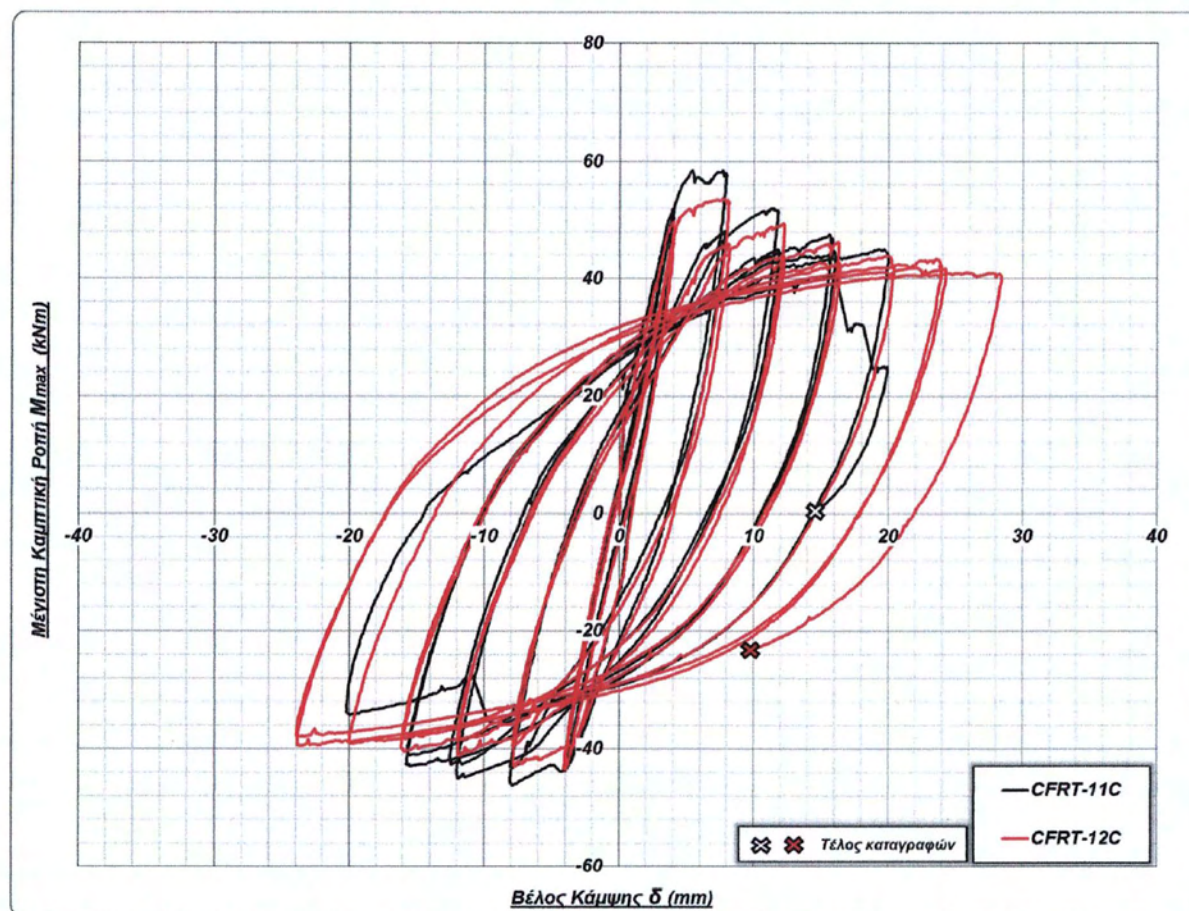


Σχήμα 7.19. Σύγκριση συνολικής (αθροιστικά) απορροφούμενης ενέργειας των δοκών RC-8C και CRHT-14C



Σχήμα 7.20. Λόγος απορροφούμενης ενέργειας της δοκού CRHT-14C προς την αντίστοιχη της RC-8C στη διαρροή του χάλυβα και στην επίτευξη της μέγιστης ροπής

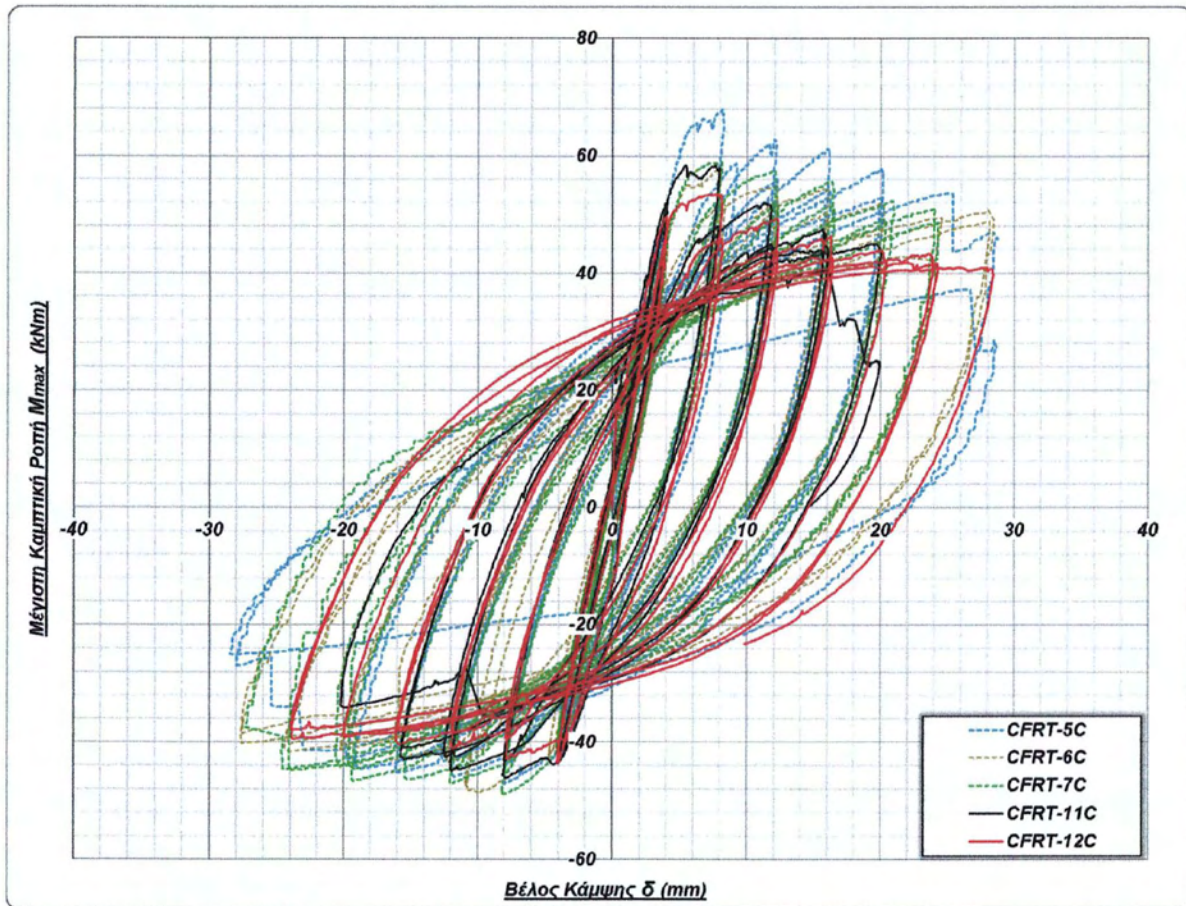
7.2. Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με αρχική βλάβη και χωρίς



Σχήμα 7.21. Σύγκριση διαγραμμάτων ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα και αρχική βλάβη

Από τη σύγκριση των ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα και αρχική βλάβη, προκύπτει ότι η ενισχυμένη δοκός CFRT-11C παρουσίασε μεγαλύτερη ροπή ρηγμάτωσης, ροπή διαρροής του διαμήκου σπλισμού αλλά και μέγιστη αντοχή, παρόλο που η αρχική δοκός της είχε μεγαλύτερο βαθμό βλάβης από τη CFRT-12C. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη φόρτιση δημιουργίας βλάβης της αρχικής δοκού RC-8C, αποδιοργανώθηκε το σκυρόδεμα στην κάτω παρειά της δοκού (σε αντίθεση με τη δοκό RC-7C στην οποία δημιουργήθηκαν μόνο τριχοειδείς ρωγμές) και κατά συνέπεια τα αποδιοργανωμένα αυτά κομμάτια σκυροδέματος απομακρύνθηκαν πριν τη σκυροδέτηση του μανδύα (Σχήμα 6.8). Το αποτέλεσμα ήταν η κενή αυτήν περιοχή να συμπληρωθεί με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα κατά τη σκυροδέτηση του μανδύα, οπότε λόγω της αντικατάστασης μέρους της διατομής της δοκού στο μέσο με μίγμα υψηλής θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, η γενική απόδοση της δοκού ήταν αρκετά βελτιωμένη. Βέβαια, με την αύξηση του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης, η απόδοση της δοκού μειώνεται αρκετά λόγω της ταυτόχρονης αύξησης των παραλαβόμενων τάσεων από την αρχική δοκό (η οποία όπως αναφέρθηκε είχε βλάβη). Παρόμοια

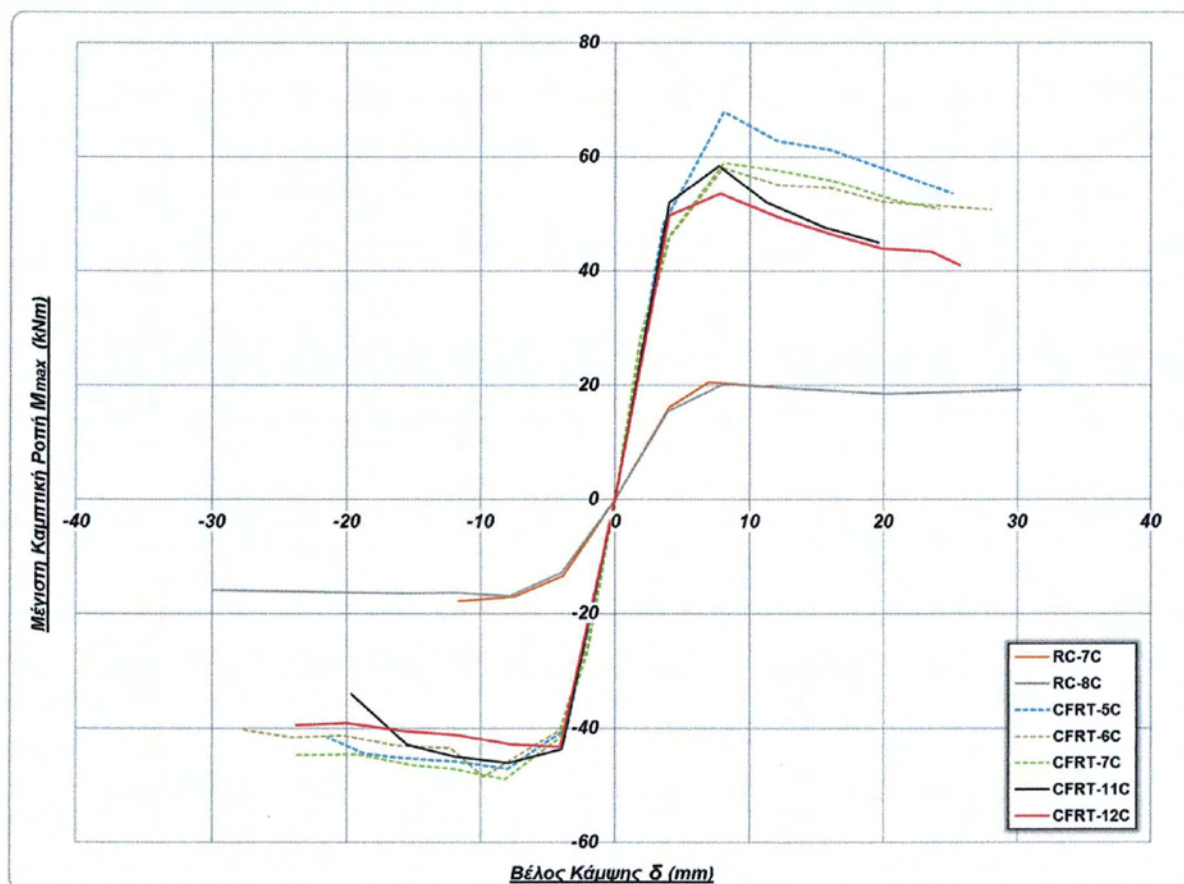
συμπεριφορά παρατηρείται και για τη δοκό CFRT-12C, η οποία όμως παρουσίασε μικρότερη αντοχή και μικρότερη πτώση απόκρισης από τη δοκό CFRT-11C.



Σχήμα 7.22. Σύγκριση διαγραμμάτων δοκών CFRT με αρχική βλάβη και χωρίς

Οι ενισχυμένες δοκοί CFRT-11C και CFRT-12C, παρουσίασαν κατώτερη απόδοση από τις αντίστοιχες CFRT-5C, CFRT-6C και CFRT-7C, στις οποίες οι αρχικές δοκοί δεν είχαν βλάβη (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012). Οι δοκοί CFRT-6C και CFRT-7C είχαν ακριβώς τους ίδιους οπλισμούς με τις εξεταζόμενες δοκούς, ενώ η CFRT-5C είχε τους ίδιους οπλισμούς με τη μόνη διαφορά ότι η αρχική δοκός (εσωτερική) δεν είχε οπλισμό διάτμησης. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η δοκός CFRT-11C συμπεριφέρεται παρόμοια με τις δοκούς CFRT χωρίς αρχική βλάβη (κυρίως με τις CFRT-6C και CFRT-7C) για μετατοπίσεις έως $\delta = \pm 8\text{mm}$, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη πτώση απόκρισης και μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου φόρτισης της κάθε μετατόπισης, αλλά και μεταξύ των 1^{ων} κύκλων των μετατοπίσεων μόνο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο αρχικό στάδιο της φόρτισης, το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων παραλαμβάνεται από το μανδύα, άρα είναι λογικό η απόδοση των δοκών να είναι η παρόμοια. Για μεγαλύτερα βέλη κάμψης, όμως, όπου αυξάνονται οι τάσεις στη δοκό και ταυτόχρονα αυξάνονται και οι τάσεις που παραλαμβάνει η αρχική δοκός τότε εμφανίζεται μεγάλη διαφορά στη συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχική (εσωτερική) δοκός RC-8C, η οποία είχε υποβληθεί σε φόρτιση

δημιουργίας βλάβης, δεν μπορεί να παραλάβει αυτές τις αυξανόμενες τάσεις και κατά συνέπεια μειώνεται η αντοχή της δοκού σε σχέση με τις δοκούς CFRT χωρίς αρχική βλάβη. Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και για στη δοκό CFRT-12C, με τη μόνη διαφορά ότι ο βαθμός της βλάβης ήταν μικρότερος και γι' αυτό το λόγο παρουσιάζει μικρότερη πτώση απόκρισης από τη δοκό CFRT-11C.

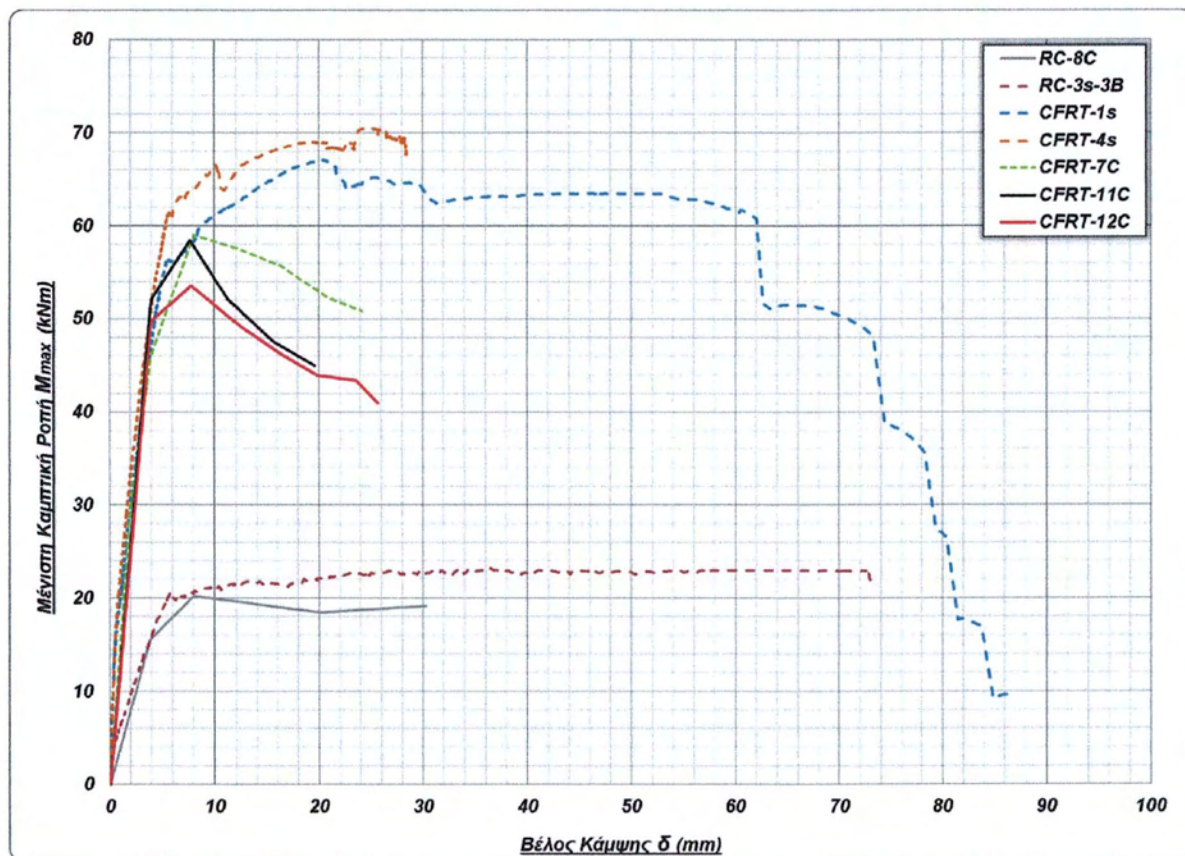


Σχήμα 7.23. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης δοκών CFRT με αρχική βλάβη και χωρίς

Οι ενισχυμένες δοκοί με αρχική βλάβη παρουσίασαν μικρότερη καμπτική αντοχή κατά 9% κατά μέσο όρο (5% η CFRT-11C και 13% η CFRT-12C) σε σχέση με τις CFRT χωρίς αρχική βλάβη. Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η δοκός CFRT-11C παρουσίασε μικρότερη μέση αντοχή κατά 15,5% σε σύγκριση με τις αντίστοιχες δοκούς χωρίς αρχική βλάβη για τη θετική φορά φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, η μέση καμπτική αντοχή υπολογίστηκε μικρότερη κατά 12,9% σε σύγκριση με τις δοκούς CFRT-6C και CFRT-7C και κατά 20,6% με τη CFRT-5C. Για την αρνητική φορά φόρτισης, η μέση αντοχή της CFRT-11C υπολογίστηκε μικρότερη κατά 5,4% σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκούς. Παρόμοιες τιμές προέκυψαν και για τη δοκό CFRT-12C, η οποία εμφάνισε μέση καμπτική αντοχή, για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από εκείνη της επίτευξης της μέγιστης ροπής, μικρότερη κατά 17,1%. Πιο συγκεκριμένα, η μέση καμπτική αντοχή υπολογίστηκε μικρότερη κατά 14,5% για τις δοκούς CFRT-6C και CFRT-7C και κατά 22,4% για τη CFRT-5C. Για την αρνητική φορά

φόρτισης, η μέση αντοχή της CFRT-12C υπολογίστηκε μικρότερη κατά 10,4% σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκούς.

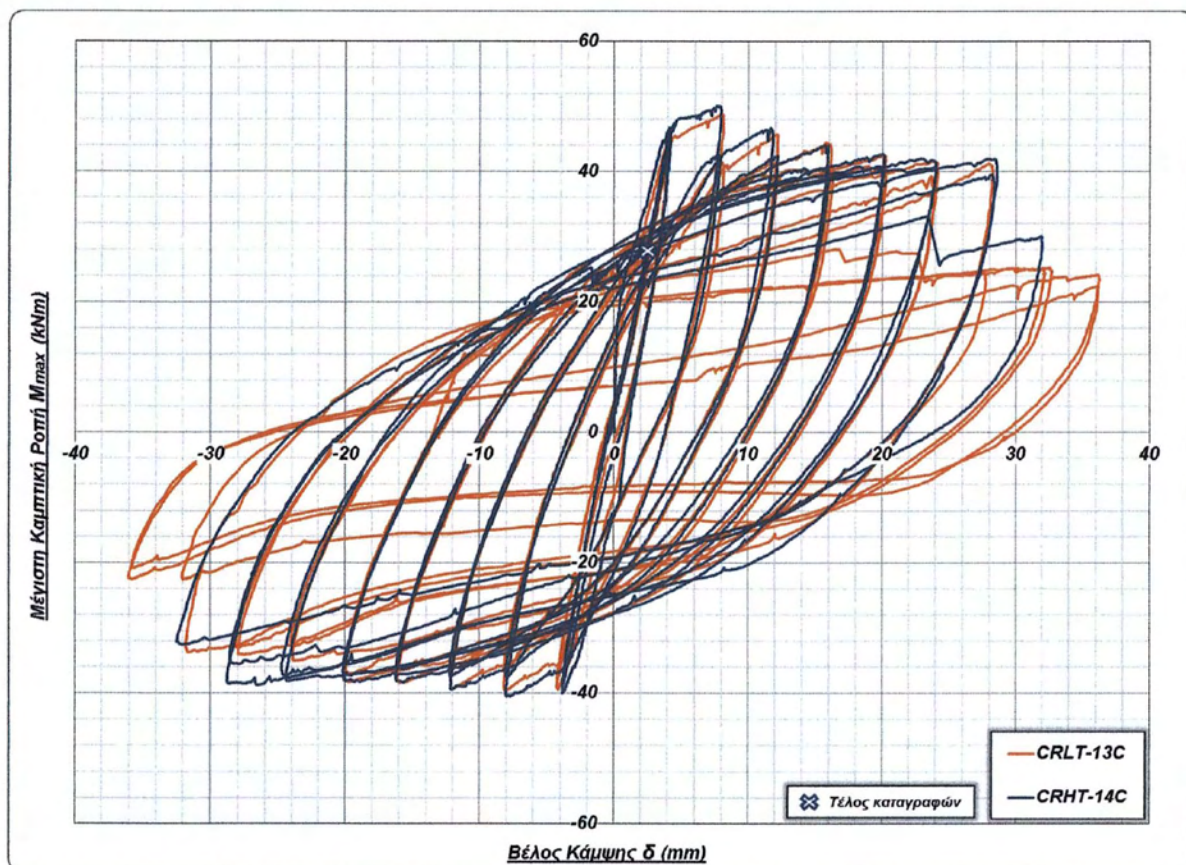
Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών CFRT-7C, CFRT-11C και CFRT-12C, τα διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης των δοκών CFRT χωρίς βλάβη και ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα μονοτονικής φόρτισης κάμψης τριών σημείων δοκού RC. Η σύγκριση αυτή θεωρείται χρήσιμη καθώς, η μονοτονική φόρτιση των δοκών χωρίς αρχική βλάβη, είναι η ιδανική περίπτωση φόρτισης και αποτελεί το άνω όριο της απόδοσης των δοκών. Όσον αφορά τις δοκούς RC, προκύπτει ότι η συμπεριφορά τους είναι παρόμοια μέχρι την επίτευξη της μέγιστης ροπής, αλλά στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση ακολουθεί πτώση της αντοχής όπως είναι αναμενόμενο. Για τις δοκούς CFRT, παρατηρείται ότι τα διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης και οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης σχεδόν συμπίπτουν για καμπτική ροπή έως 50 ± 52 kNm, ακολουθεί αύξηση της αντοχής με τη δοκό CFRT-11C να συμπεριφέρεται αρκετά όμοια για ροπή έως 56 kNm, ενώ μετά παρατηρείται πτώση της αντοχής και για τις δύο δοκούς CFRT-11C και CFRT-12C, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης αλλά και της βλάβης των αρχικών δοκών RC. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι για βέλη κάμψης έως $\delta = \pm 8$ mm, οι ενισχυμένες δοκοί παρουσιάζουν σχεδόν ίδια απόδοση.



Σχήμα 7.24. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών CFRT με διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης

Όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια των ενισχυμένων δοκών με αρχική βλάβη (CFRT-11C, CFRT-12C), υπολογίστηκε ότι είναι σε παρόμοια επίπεδα με την αντίστοιχη των ενισχυμένων δοκών χωρίς αρχική βλάβη, συγκεκριμένα κατά 3% μεγαλύτερη μέχρι το τέλος των καταγραφών. Το αποτέλεσμα αυτό θεωρείται λογικό, διότι ανάλογα με το βαθμό της βλάβης που δημιουργείται, κατά τη σκυροδέτηση το ινοπλισμένο τσιμεντοκονιάμα υψηλής αντοχής συμπληρώνει τα κενά που έχουν δημιουργηθεί λόγω της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, οπότε η αντοχή και η απορροφούμενη ενέργεια προκύπτουν σχεδόν ίδιες (πιθανόν και μεγαλύτερες).

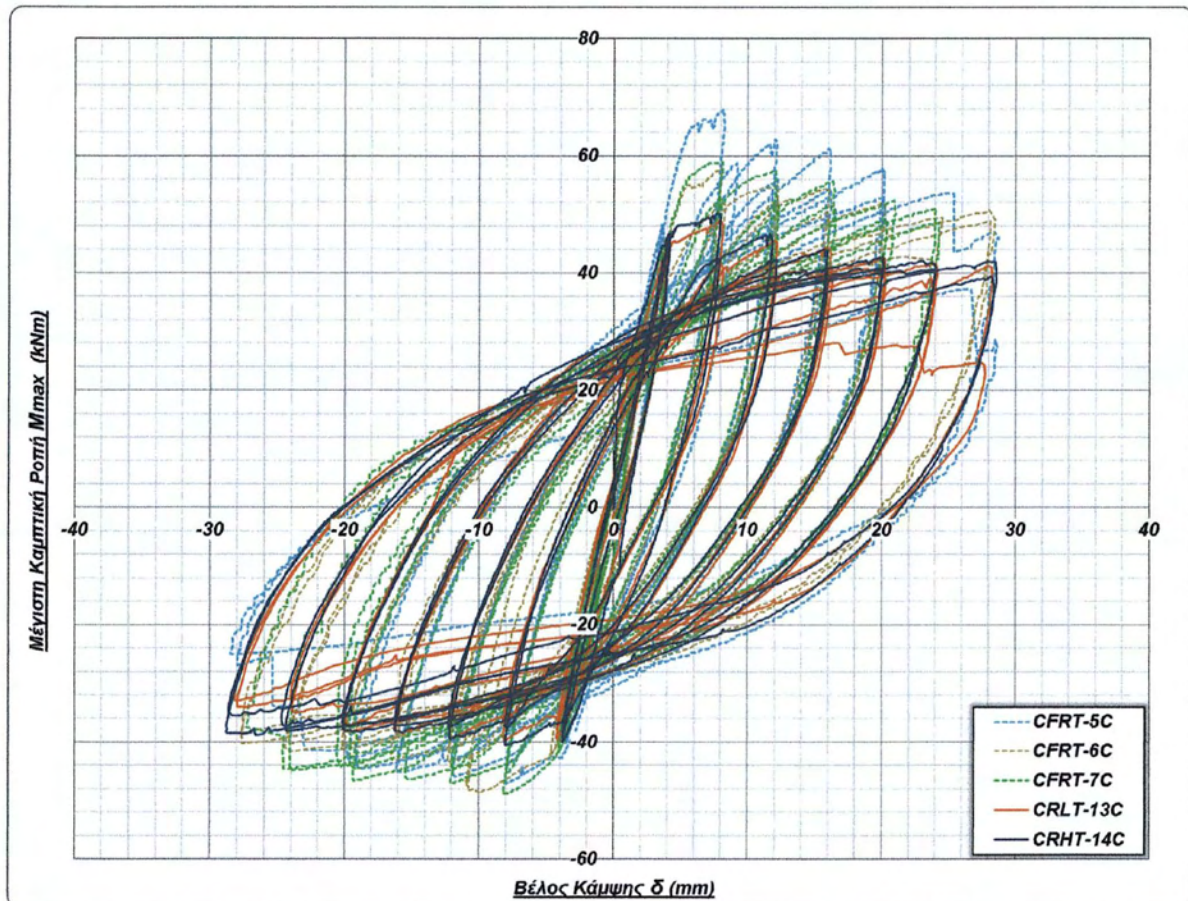
7.3. Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος χωρίς αρχική βλάβη με τις ενισχυμένες δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος



Σχήμα 7.25. Σύγκριση διαγραμμάτων ενισχυμένων δοκών με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος

Οι ενισχυμένες δοκοί CRLT-13C και CRHT-14C, δηλαδή οι αρχικές δοκοί χωρίς βλάβη που ενισχύθηκαν με μανδύες συμβατικού σκυροδέματος, παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά σε όλη τη φόρτιση, με τη μόνη διαφορά ότι η δοκός CRHT-14C παρουσίασε λίγο μεγαλύτερη καμπτική αντοχή. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του μανδύα της δοκού ($f_{ck}^{CRHT-14C} = 66,3 \text{ MPa}$, $f_{ck}^{CRLT-13C} = 40,3 \text{ MPa}$, από τις δοκιμές κυβικών

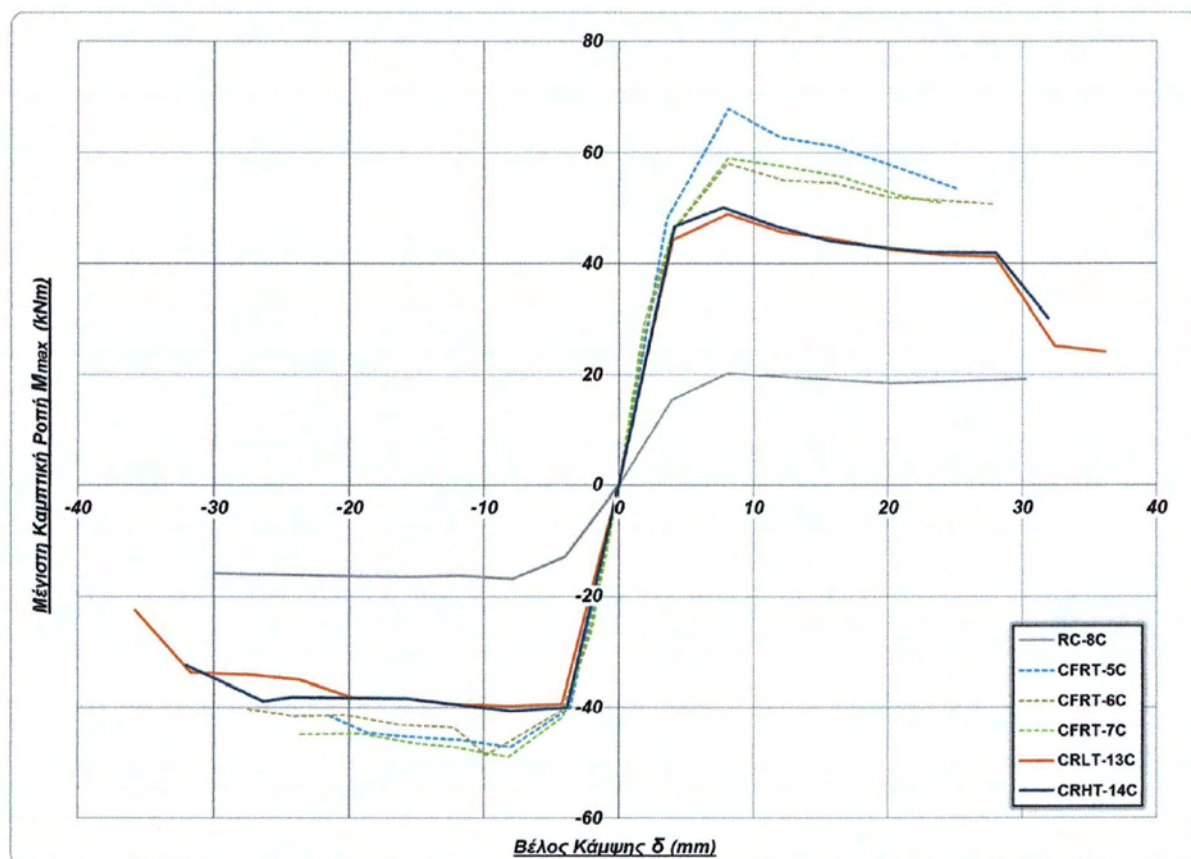
δοκιμίων). Ωστόσο, η αρκετά υψηλότερη θλιπτική αντοχή (65%) αναμενόταν να έχει μεγαλύτερη συνεισφορά στην απόδοση της δοκού. Αυτό οφείλεται στο μικρό πάχος του μανδύα (3,5 cm) και κατ' επέκταση του μικρού βάθους της θλιβόμενης ζώνης, οπότε η διαφορά των θλιπτικών αντοχών δεν επηρεάζει σημαντικά τη γενική συμπεριφορά των δοκών.



Σχήμα 7.26. Σύγκριση διαγραμμάτων ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα χωρίς αρχική βλάβη (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012) με τις ενισχυμένες δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος

Οι ενισχυμένες δοκοί με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος παρουσίασαν μικρότερη καμπτική αντοχή από τις δοκούς που ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα κατά 20% κατά μέσο όρο (20,5% η CRLT-13C και 18,6% η CRHT-14C) αλλά η γενικότερη συμπεριφορά τους ήταν παρόμοια. Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$) για τη θετική φορά φόρτισης, η δοκός CRHT-14C παρουσίασε μέση καμπτική αντοχή μικρότερη κατά 17,3% κατά μ.ό. σε σύγκριση με τις CFRT-6C, CFRT-7C και κατά 25,5% σε σύγκριση με τη CFRT-5C. Για την αρνητική φορά της φόρτισης, η μέση αντοχή της CRHT-14C υπολογίστηκε μικρότερη κατά 13% σε σχέση με τις άλλες δοκούς. Παρόμοιες τιμές προέκυψαν και για η δοκό CRLT-13C, η οποία μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), παρουσίασε μέση καμπτική αντοχή μικρότερη κατά 19,3% (κατά μ.ό.) σε σύγκριση με τις CFRT-6C,

CFRT-7C και κατά 26% σε σύγκριση με τη CFRT-5C. Για την αρνητική φορά της φόρτισης, η μέση αντοχή της CRLT-13C υπολογίστηκε μικρότερη κατά 15,5% σε σχέση με τις άλλες δοκούς.

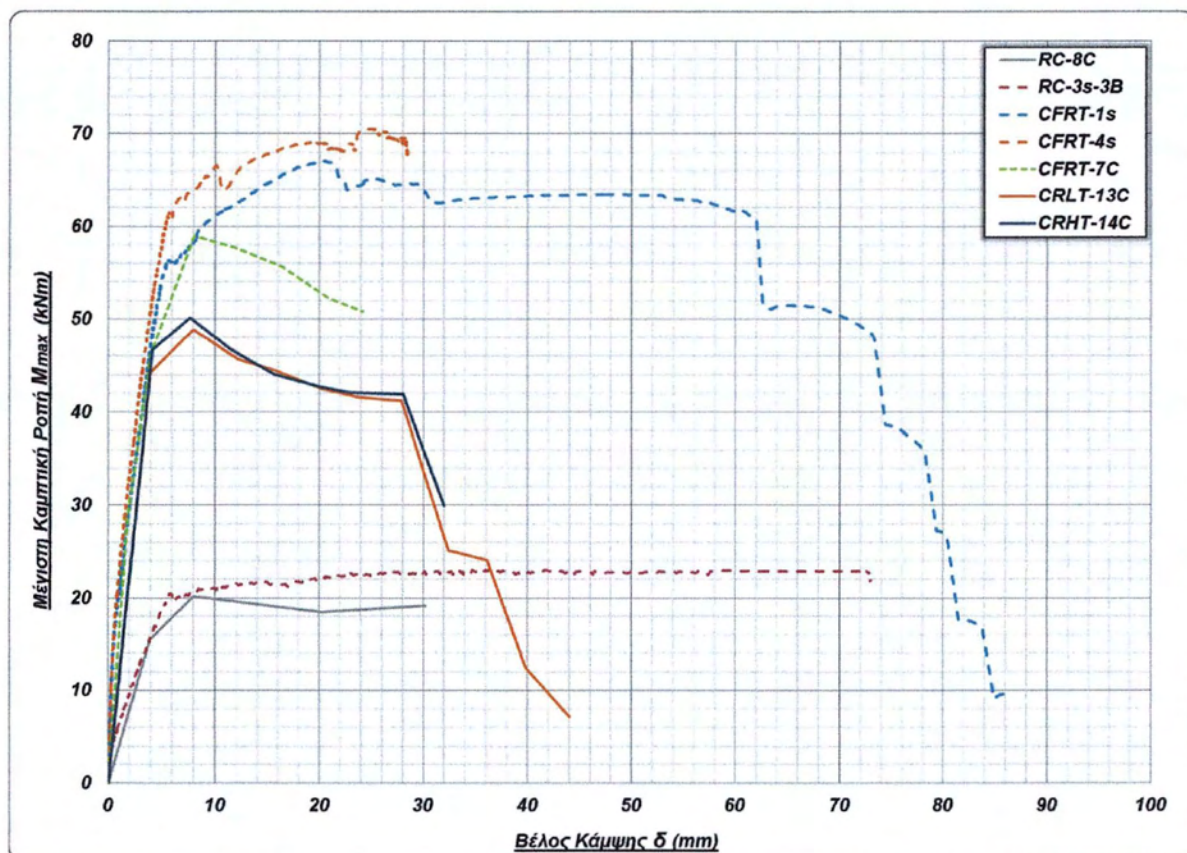


Σχήμα 7.27. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο μανδύα χωρίς αρχική βλάβη (Θ. Παπαθεοχάρης, 2012) και των ενισχυμένων δοκών με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος

Στο Σχήμα 7.28 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών CFRT-7C, CRLT-13C και CRHT-14C, τα διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης των δοκών CFRT χωρίς βλάβη και ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα μονοτονικής φόρτισης κάμψης τριών σημείων δοκού RC. Για τις δοκούς CRLT-13C και CRHT-14C, παρατηρείται ότι τα διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης και οι περιβάλλουσες των 1^{ων} κύκλων σχεδόν συμπίπτουν για καμπτική ροπή έως $44 \div 47$ kNm, ακολουθεί αύξηση της αντοχής με τη δοκό CRHT-14C να επιτυγχάνει λίγο μεγαλύτερη αντοχή από τη CRLT-13C, ενώ μετά ακολουθεί ομαλή μείωση της αντοχής και για τις δυο δοκούς για μετατοπίσεις έως και $\delta = +26$ mm, όπου παρατηρείται απότομη πτώση της απόκρισης των δοκών.

Στο Σχήμα 7.28 παρατηρείται επίσης η ανώτερη απόδοση των δοκών με ινοπλισμένο μανδύα σε σχέση τις αντίστοιχες με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος. Για μετατοπίσεις έως και $\delta = +24$ mm, η δοκός CFRT-7C διατηρεί αρκετά μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, χωρίς

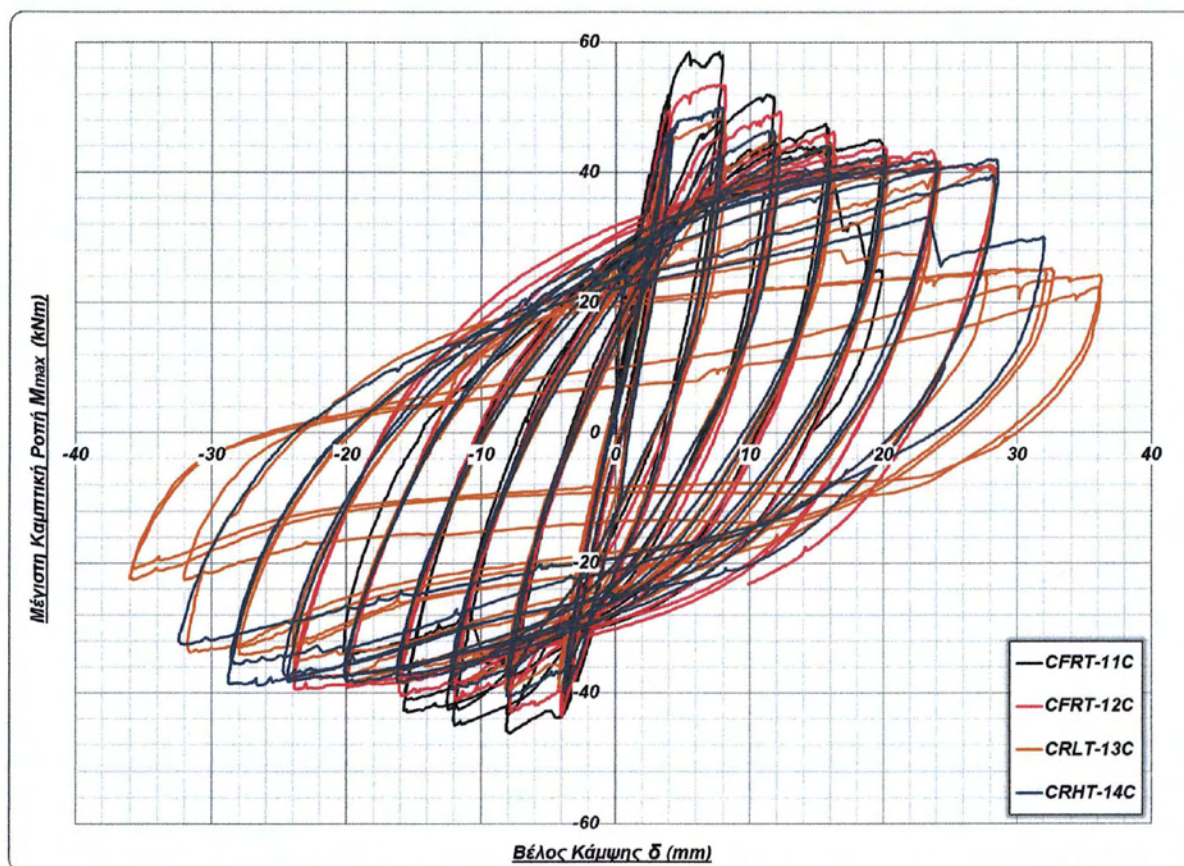
απότομη πτώση της απόκρισης και με παρόμοια συμπεριφορά με τις CRLT-13C και CRHT-14C. Όπως προκύπτει και τη θεωρητική ανάλυση των δοκών, αυξάνοντας τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε τιμές μεγαλύτερες από εκείνες του μανδύα της δοκού CRHT-14C, δεν προκύπτει καμία αξιοσημείωτη διαφορά στην απόδοση της δοκού. Αυτό σημαίνει πως η δοκός CRHT-14C αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα συμπεριφοράς ενισχυμένης δοκού με μανδύα υψηλής αντοχής. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται στην ψαθυρότητα και τη χαμηλή εφελκυστική αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως η προσθήκη ινών βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της δοκού και οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά αυτούς τους περιοριστικούς παράγοντες.



Σχήμα 7.28. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης δοκών CFRT χωρίς αρχική βλάβη, CRLT, CRHT με διαγράμματα μονοτονικής φόρτισης

Όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια των ενισχυμένων δοκών με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος, προέκυψε λίγο μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη των ενισχυμένων δοκών με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, συγκεκριμένα κατά 7% μικρότερη.

7.4. Σύγκριση ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με αρχική βλάβη με τις ενισχυμένες δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος

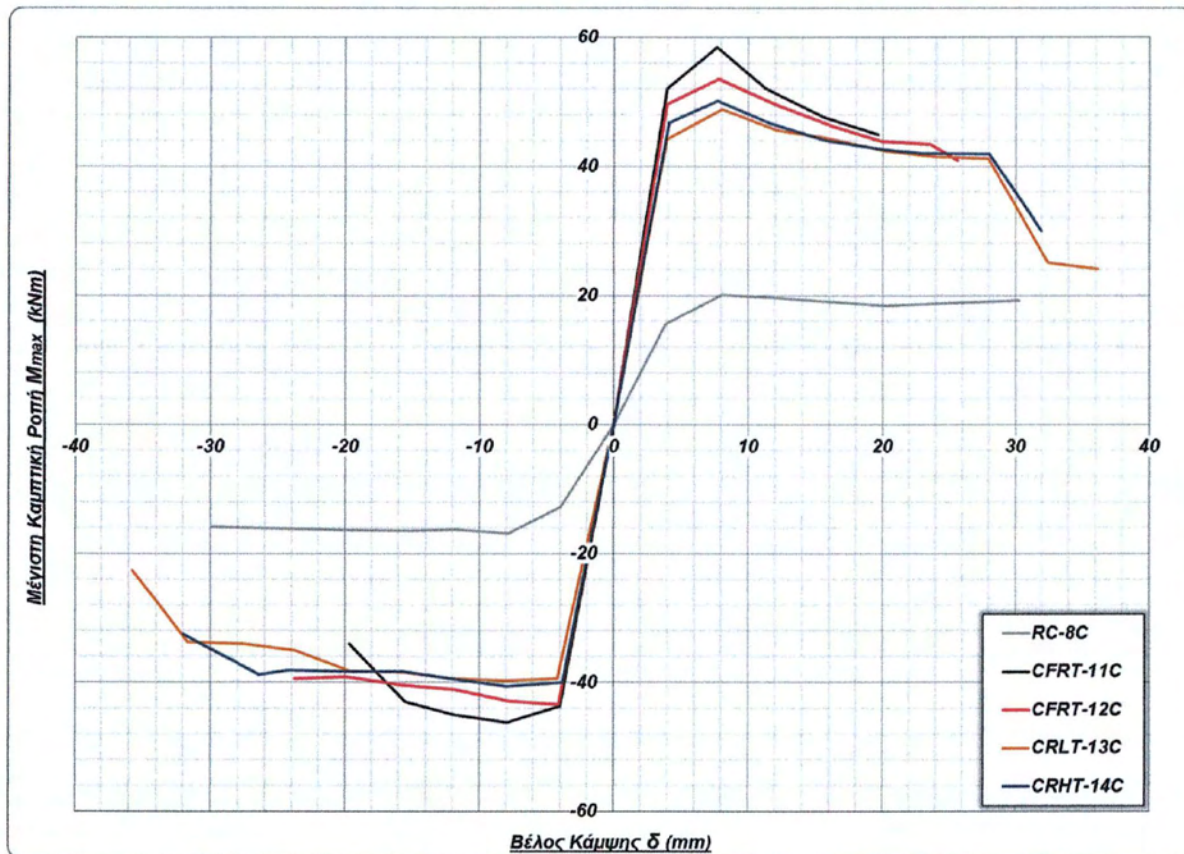


Σχήμα 7.29. Διαγράμματα μέγιστης καμπτικής ροπής – βέλους κάμψης όλων των δοκών που εξετάστηκαν

Από τη σύγκριση των ενισχυμένων δοκών προκύπτει ότι η δοκός CFRT-11C, παρόλο που η αρχική δοκός της RC-8C είχε το μεγαλύτερο βαθμό βλάβης, παρουσίασε τη μεγαλύτερη ροπή ρηγμάτωσης με διαφορά από τις υπόλοιπες, τη μεγαλύτερη ροπή διαρροής του διαμήκους οπλισμού και τη μεγαλύτερη μέγιστη φέρουσα ικανότητα (Πίνακας 7.1, Σχήμα 7.31).

Μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής (για $\delta > \delta_{Mmax}$), η δοκός CFRT-11C παρουσίασε τη μεγαλύτερη πτώση απόκρισης συγκριτικά με τις υπόλοιπες δοκούς, ενώ η καμπτική αντοχή της παρέμεινε σε υψηλότερα επίπεδα για παραμορφώσεις έως $\delta = +20$ mm για τη θετική φορά φόρτισης, όπου εκτιμήθηκε στο 2,4% υψηλότερη από τη δοκό CFRT-12C και περίπου 5,8% για τις δοκούς CRLT-13C και CRHT-14C. Οι δοκοί με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος CRLT-13C και CRHT-14C, παρουσίασαν τη μικρότερη πτώση απόκρισης μετά την επίτευξη της μέγιστης ροπής, ενώ συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο σε σχέση με τις αρχικές δοκούς RC-7C και RC-8C για μετατοπίσεις έως $\delta = +28$ mm. Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα και για την αρνητική φορά της φόρτισης, όπου η δοκός CFRT-11C εμφάνισε

μεγαλύτερη καμπτική αντοχή για μετατοπίσεις έως $\delta = -16\text{mm}$, όπου και παρατηρείται απότομη πτώση της αντοχής λόγω της απώλειας της συνεισφοράς των ινών.



Σχήμα 7.30. Σύγκριση περιβαλλουσών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των δοκών

Για μεγάλες τιμές του επιβαλλόμενου βέλους κάμψης $\delta = \pm 20\text{mm}$, που αντιστοιχεί σε 2,5 φορές μεγαλύτερο βέλος κάμψης από την αντίστοιχη μετατόπιση στην οποία συμβαίνει η διαρροή του χάλυβα ($\delta = \pm 8\text{mm}$), η δοκός CFRT-11C παρουσιάζει πτώση απόκρισης μεταξύ θετικών ροπών 1^{ων} κύκλων φόρτισης των παραπάνω μετατοπίσεων κατά 23% για τη θετική φορά φόρτισης, ενώ κατά 26% για την αρνητική φορά. Οι αντίστοιχες τιμές για τη δοκό CFRT-12C είναι 18% για τη θετική φορά και 9% για την αρνητική φορά της φόρτισης.

Για τη δοκό CRLT-13C, η πτώση απόκρισης από την τιμή επιβαλλόμενου βέλους κάμψης $\delta = \pm 8\text{mm}$ έως $\delta = \pm 28\text{mm}$, υπολογίστηκε 15,6%, ενώ για την αρνητική φορά της φόρτισης 14,2%. Συγκρίνοντας την αντοχή της δοκού CRHT-14C για τις ίδιες ακριβώς μετατοπίσεις, η πτώση απόκρισης ανέρχεται στο 16,3% για τη θετική φορά και 4,3% για την αρνητική φορά της φόρτισης.

Η πτώση απόκρισης μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου φόρτισης, για τη θετική φορά της και για μετατοπίσεις έως $\delta = +4\text{mm}$, κυμαίνεται από $3,4 \div 5,7\%$ για όλες τις δοκούς, εκτός από τη δοκό CRHT-14C που εμφάνισε πτώση 1,2%. Για μετατοπίσεις έως $\delta = +8\text{mm}$, οι δοκοί RC

παρουσίασαν πτώση απόκρισης της τάξης του 9,7% κατά μ.ό., ενώ οι ενισχυμένες δοκοί 14,8%, εκτός από τη CFRT-11C για την οποία η πτώση υπολογίστηκε 17,9%. Παρόμοια εικόνα και για βέλος κάμψης έως $\delta=+12\text{mm}$, όπου οι δοκοί RC εμφάνισαν πτώση της τάξης του 7,3% κατά μ.ό., οι CRLT-13C, CRHT-14C 9,4% κατά μ.ό., ενώ για τη CFRT-12C υπολογίστηκε 11,1% και για τη CFRT-11C 13,5%. Για βέλος κάμψης έως $\delta=+16\text{mm}$, όλες οι δοκοί παρουσίασαν πτώση απόκρισης κατά $6,2 \div 8,4\%$, ενώ για $\delta=+20\text{mm}$ για τη δοκό RC-8C η πτώση ήταν 2,4%, για τις CRHT-14C και CRLT-13C $4 \div 4,4\%$, ενώ για τη CFRT-11C ήταν 10,3%. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως η δοκός CFRT-11C εμφάνισε σταθερά μεγαλύτερη πτώση απόκρισης από τις υπόλοιπες δοκούς σχεδόν για όλες τις μετατοπίσεις, το οποίο είναι λογικό λόγω της αρχικής βλάβης στην εσωτερική δοκό. Για την αρνητική φορά της φόρτισης η πτώση απόκρισης ήταν γενικά αρκετά μικρότερη, αλλά δεν προκύπτει κάποιο σημαντικό συμπέρασμα καθώς οι τιμές της πτώσης της αντοχής ήταν σε παρόμοια επίπεδα για τις δοκούς.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι ροπές ρηγμάτωσης, οι ροπές διαρροής του διαμήκους οπλισμού και οι καμπτικές αντοχές των δοκών και τα αντίστοιχα βέλη κάμψης σε αυτά τα στάδια της φόρτισης, ενώ στο Σχήμα 7.31 οι λόγοι των καμπτικών ροπών.

Πίνακας 7.1. Ροπές και αντίστοιχα βέλη κάμψης σε χαρακτηριστικά σημεία της φόρτισης

Δοκός	M_{cr} (kNm)	δ_{cr} (mm)	M_y (kNm)	δ_y (mm)	M_{max} (kNm)	δ_{Mmax} (mm)
RC-7C	3,2	0,14	20,4	5,85	20,5	6,93
RC-8C	4,6	0,25	20	6,12	20,2	8,04
CFRT-11C	16,7	0,32	58,4	5,44	58,5	7,69
CFRT-12C	4,9	0,05	49,8	4,33	53,5	7,85
CRLT-13C	9,9	0,14	45,5	4,5	48,9	8,05
CRHT-14C	9,5	0,11	48,2	5	50,1	7,75

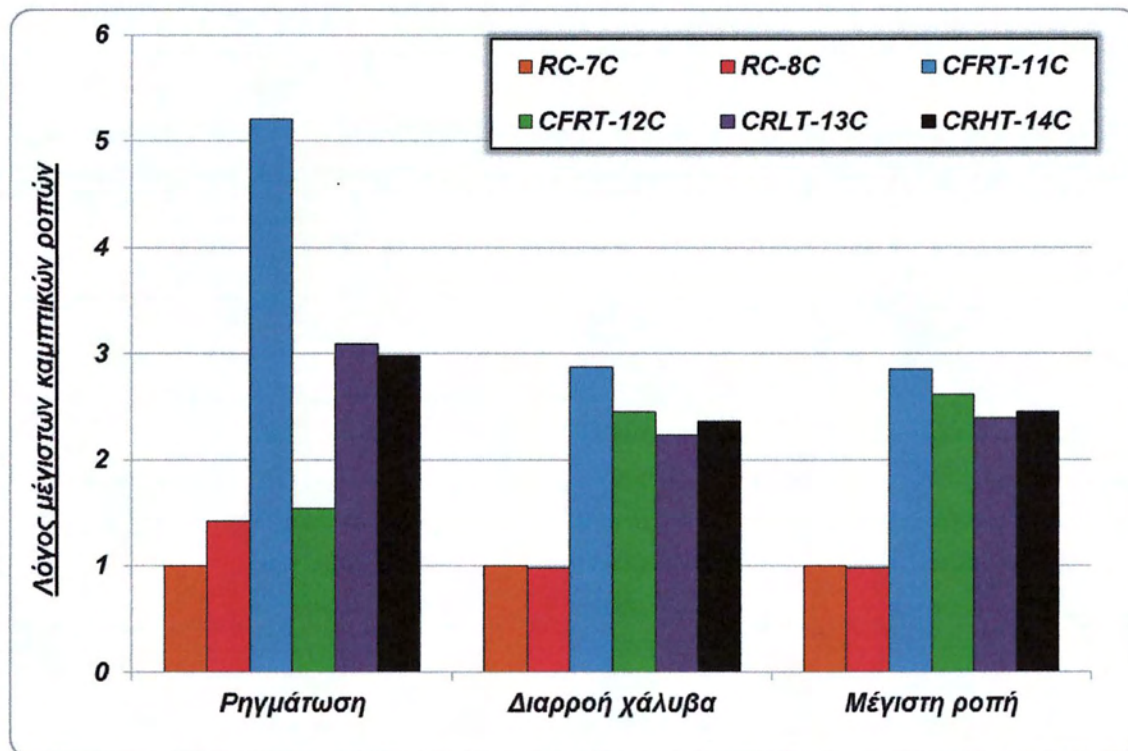
Πίνακας 7.2. Σύγκριση πειραματικών τιμών καμπτικής ροπής με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση των δοκών

Δοκός	$M_{cr}^{exp.}$ (kNm)	$M_{cr}^{cal.}$ (kNm)	$M_y^{exp.}$ (kNm)	$M_y^{cal.}$ (kNm)	$M_{max}^{exp.}$ (kNm)	$M_{max}^{cal.}$ (kNm)	$M_{max}^{exp.} / M_{max}^{cal.}$
RC	3,9	3,3	20,2	17,1	20,3	18,1	1,12
CFRT	10,6	10,1	54,1	46,1	56	59,5	0,94
CRLT	9,9	8,7	45,5	33,8	48,9	45,2	1,08
CRHT	9,5	9,7	48,2	34,9	50,1	47,5	1,05

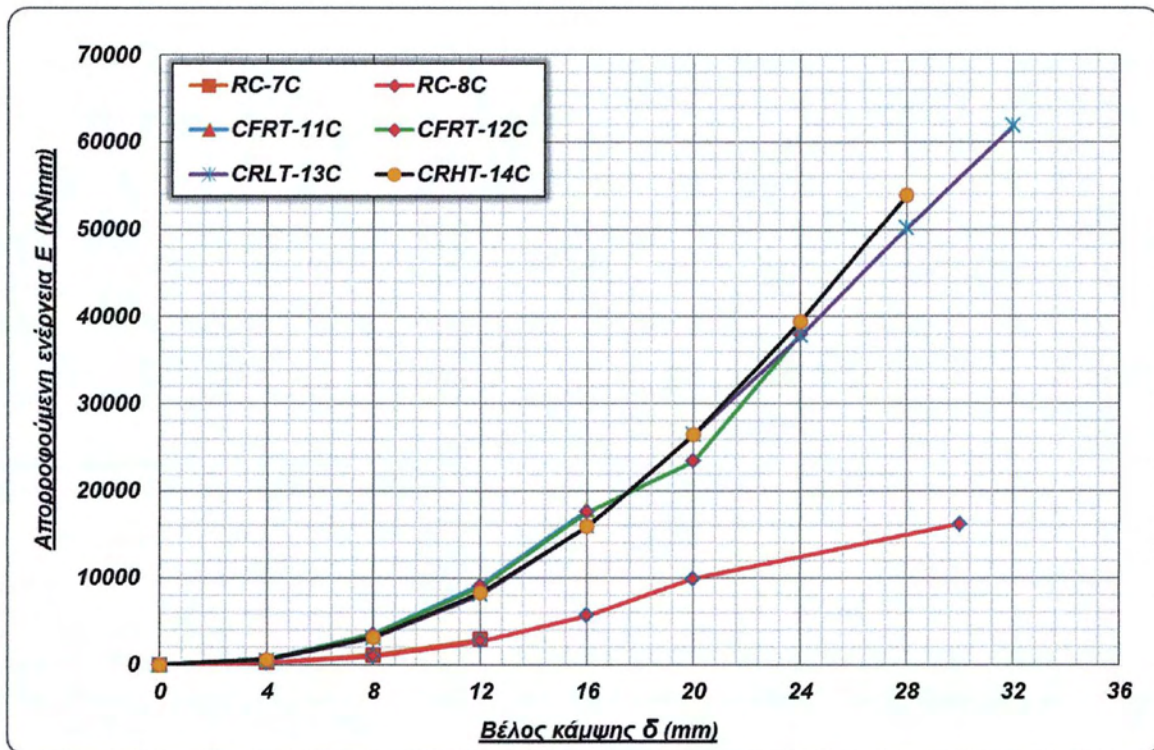
*exp. (experimental) = πειραματική τιμή

*cal. (calculated) = τιμή που υπολογίστηκε από τη θεωρητική ανάλυση

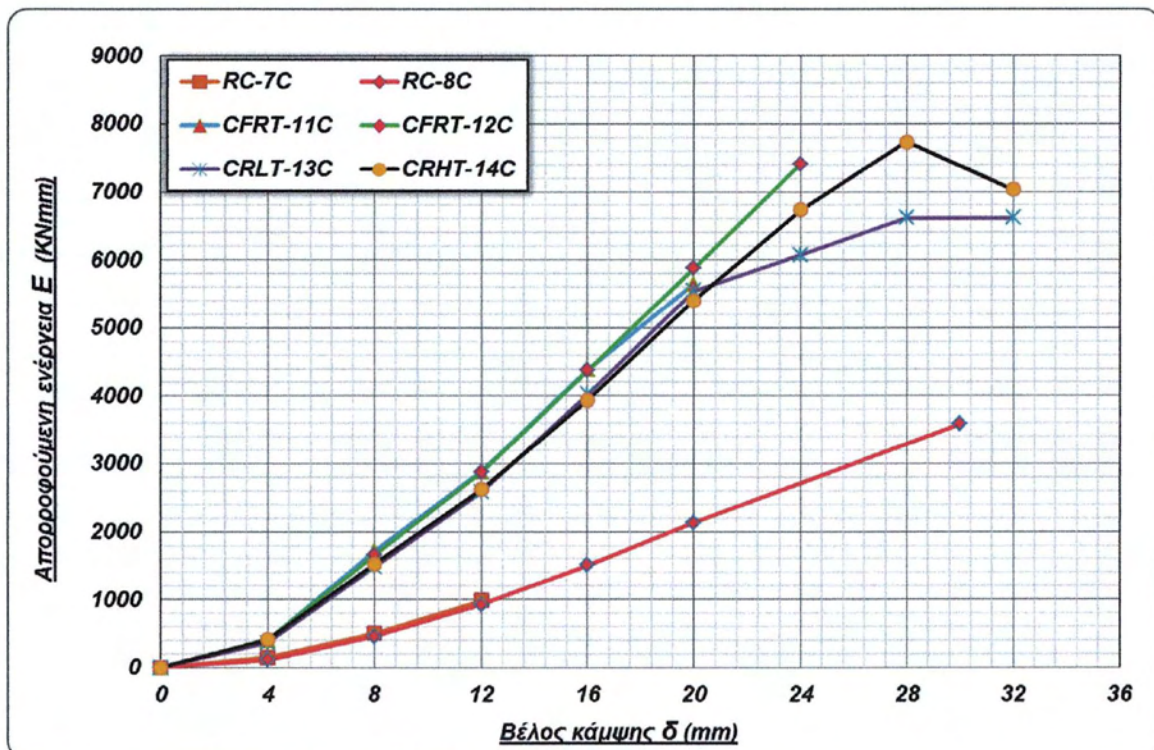
* Στις πειραματικές τιμές των δοκών υπολογίστηκε ο μέσος όρος



Σχήμα 7.31. Λόγος μέγιστων καμπτικών ροπών των δοκών σε χαρακτηριστικά σημεία της φόρτισης προς την αντίστοιχη της RC-7C

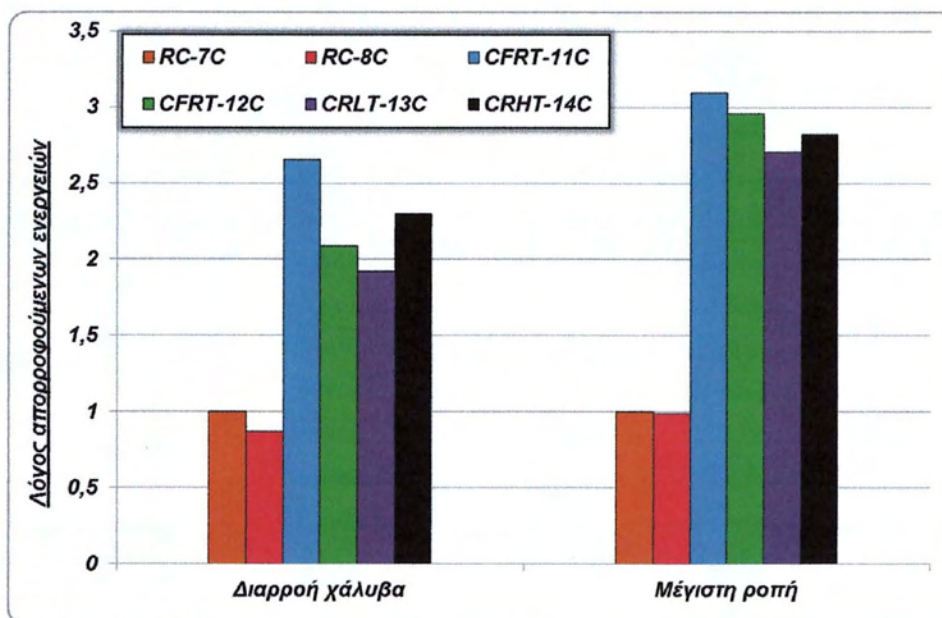


Σχήμα 7.32. Σύγκριση συνολικών απορροφούμενων ενεργειών των δοκών (αθροιστικά) σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης



Σχήμα 7.33. Σύγκριση απορροφούμενων ενεργειών των δοκών για τους 1ους κύκλους φόρτισης κάθε μετατόπισης σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης

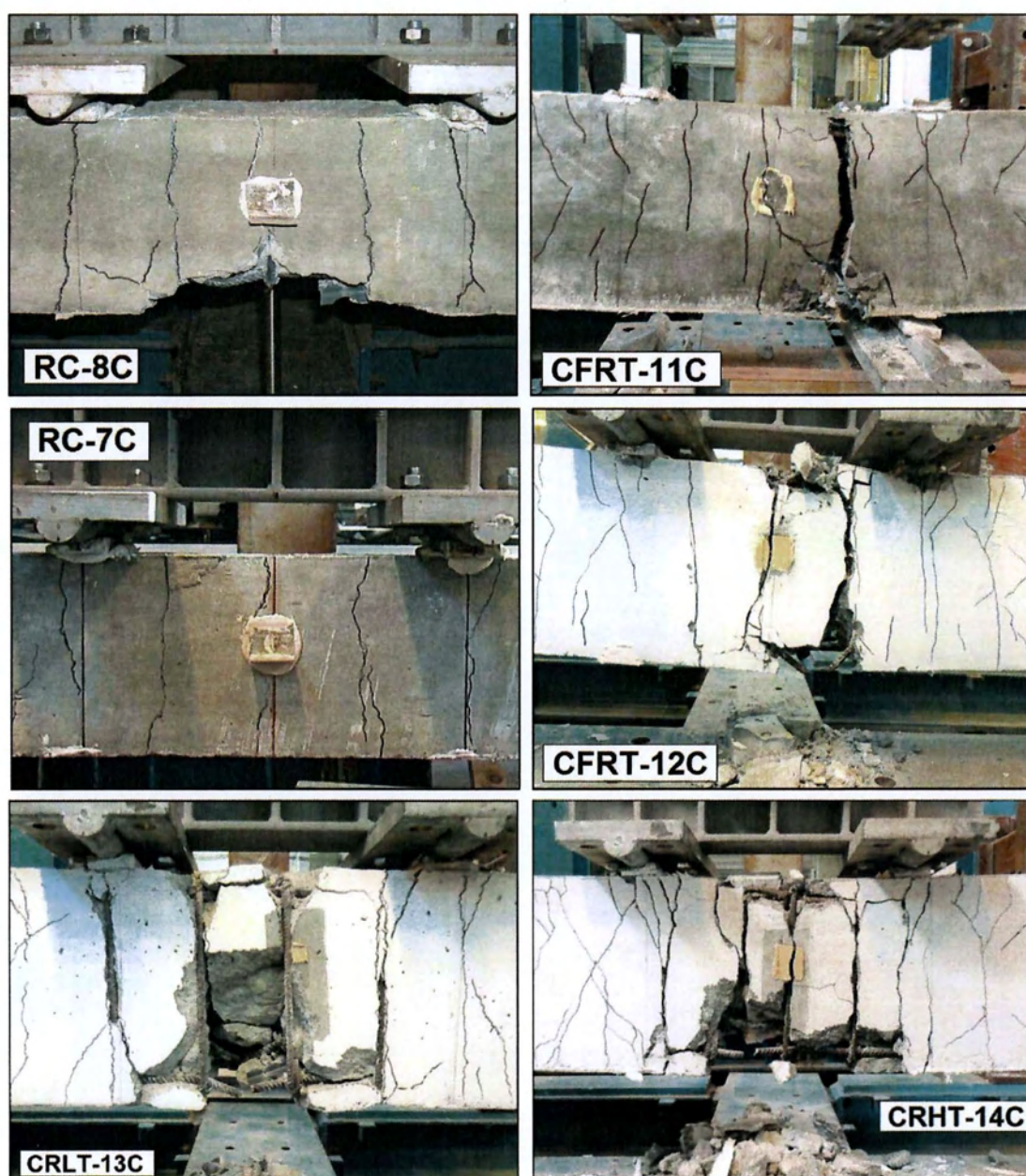
Η απορροφούμενη ενέργεια όλων των ενισχυμένων δοκών παρέμεινε σε παρόμοια επίπεδα μέχρι το τέλος των καταγραφών, με αυτή των CFRT να είναι οριακά μεγαλύτερη έναντι των CRLT, CRHT. Επειδή κατά τη φόρτιση της δοκού CFRT-12C, παραλήφθηκε από λάθος ο 2^{ος} κύκλος φόρτισης για επιβαλλόμενη μετατόπιση $\delta=\pm 20\text{mm}$, εκτός από το διάγραμμα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας (αθροιστικά) σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο βέλος κάμψης στο Σχήμα 7.32, παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα στο Σχήμα 7.33 αλλά μόνο για τους 1^{ους} κύκλους φόρτισης. Είναι σημαντικό πως, οι δοκοί στις οποίες δημιουργήθηκε βλάβη και στη συνέχεια ενισχύθηκαν με ινοπλισμένο μανδύα (CFRT-11C, CFRT-12C), επιτυγχάνουν σχεδόν ίδια απόσβεση ενέργειας (λίγο μεγαλύτερη) από τις δοκούς που ενισχύθηκαν με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος αλλά δεν τους είχε δημιουργηθεί βλάβη (CRLT-13C, CRHT-14C).



Σχήμα 7.34. Λόγος απορροφούμενων ενεργειών των δοκών προς την αντίστοιχη της RC-7C σε χαρακτηριστικά σημεία της φόρτισης

Από το Σχήμα 7.35 στο οποίο παρουσιάζονται φωτογραφίες των περιοχών αστοχίας των δοκών που εξετάστηκαν, παρατηρείται ότι η εικόνα των ρωγμών στην αστοχία τους διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του μανδύα. Ειδικότερα, στις ενισχυμένες με ινοπλισμένο μανδύα δοκούς (CFRT-11C, CFRT-12C), παρατηρείται συγκέντρωση των παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού με τη διεύρυνση μίας ή δύο ρωγμών και αρκετές τριχοειδείς ρωγμές. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η διαφορά στο μέγεθος της βλάβης που δημιουργήθηκε στις αρχικές δοκούς RC, δεν επηρεάζει την εικόνα της αστοχίας των ενισχυμένων δοκών. Στις ενισχυμένες με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος δοκούς, όμως, παρατηρείται έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος με αποκάλυψη των συνδετήρων καθ' ύψος στην περιοχή αστοχίας (στο μέσο της δοκού), μεταξύ των σημείων επιβολής φορτίου. Επίσης, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του μανδύα φαίνεται να μην

επηρεάζει τη μορφή ρηγμάτωσης και γενικά την εικόνα της αστοχίας. Το πλεονέκτημα των ινοπλισμένων μανδύων να μειώνουν τις παραμορφώσεις της δοκού μέσω της γεφύρωσης των ρωγμών από τις ίνες, αποκτά περισσότερο ενδιαφέρον αν συνυπολογιστεί και το μέγεθος της βλάβης που δημιουργήθηκε στις αρχικές δοκούς πριν ενισχυθούν, ιδιαίτερα της δοκού RC-8C (CFRT-11C) με το μεγαλύτερο βαθμό βλάβης.

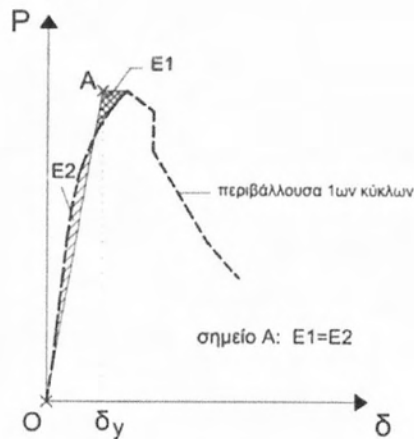


Σχήμα 7.35. Φωτογραφίες των περιοχών αστοχίας όλων των δοκών που εξετάστηκαν

Η συμβατική δυσκαμψία «διαρροής» K_y ορίζεται ως:

$$K_y^+ = \frac{P_{\max}^+}{\delta_y^+} \quad \text{και} \quad K_y^- = \frac{P_{\max}^-}{\delta_y^-}$$

Όπου: P_{\max}^+ και P_{\max}^- είναι τα μέγιστα φορτία σε θετική και αρνητική φόρτιση αντίστοιχα.



Σχήμα 7.36. Τρόπος υπολογισμού της συμβατικής τιμής διαρροής δ_y (Μωρέττη Μ. Λ., Παπαθεοχάρης Θ., Περδικάρης Φ., *Design of Reinforced Concrete Infilled Frames*, 2014)

Πίνακας 7.3. Συμβατική δυσκαμψία «διαρροής» δοκών και η αντίστοιχη μετατόπιση

Δοκίμιο	K_y^+ (kN/mm)	δ_y^+ (mm)	K_y^- (kN/mm)	δ_y^- (mm)
RC-7C	12,28	5,47	9,62	-6,05
RC-8C	11,49	5,76	9,42	-5,88
CFRT-11C	41,80	4,58	34,37	-4,41
CFRT-12C	22,36	7,85	-	-
CRLT-13C	33,88	4,73	-	-
CRHT-14C	35,24	4,66	34,09	-3,90

Όπως προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα 7.3, η εφαρμογή του μανδύα οδήγησε σε αυξημένη δυσκαμψία των ενισχυμένων δοκών CFRT σε σύγκριση με αυτή των αρχικών δοκών RC, ανάλογα με το μέγεθος της αρχικής βλάβης. Συγκεκριμένα, η δυσκαμψία των της δοκού CFRT-11C ήταν 3,6 φορές η αντίστοιχη της αρχικής δοκού RC-8C, ενώ η δυσκαμψία της CFRT-12C ήταν 1,8 φορές η αντίστοιχη της αρχικής δοκού RC-7C. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το μέγεθος της αρχικής βλάβης επηρεάζει σημαντικά τη δυσκαμψία των ενισχυμένων δοκών. Για τις δοκούς CRLT-13C, CRHT-14C η δυσκαμψία υπολογίστηκε ότι ήταν 3 φορές περίπου η αντίστοιχη των δοκών RC.

7.5. Συμπεράσματα

1. Οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν αυξημένες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες των αρχικών δοκών RC:
 - αντοχή σε κάμψη: $\approx 2,6$ φορές οι CFRT (μανδύες ινοπλισμένου τσιμ/τος)
 $\approx 2,4$ φορές οι CRLT, CRHT (μανδύες συμβατικού σκυρ/τος)
 - ικανότητα απορρόφησης ενέργειας: ≈ 3 φορές (μέχρι το τέλος των καταγραφών)
 - δυσκαμψία: $1,8 \div 3,6$ φορές οι CFRT
 3 φορές οι CRLT, CRHT
2. Η δοκός CFRT-11C παρουσίασε τη μεγαλύτερη καμπτική αντοχή, αυξημένη κατά 9% σε σχέση με την CFRT-12C και κατά 18% σε σχέση με τις ενισχυμένες με συμβατικό σκυρόδεμα, παρόλο που η αρχική δοκός RC-8C είχε το μεγαλύτερο βαθμό βλάβης.
3. Η δοκός CRHT-14C παρουσίασε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή από τη δοκό CRLT-13C μόλις κατά 2% παρόλο που ενισχύθηκε με σκυρόδεμα μεγαλύτερης θλιπτικής αντοχής κατά 65%.
4. Για επιβαλλόμενες παραμορφώσεις $\delta > \delta_{Mmax}$ η δοκός CFRT-11C παρουσίασε τη μεγαλύτερη πτώση απόκρισης συγκριτικά με τις υπόλοιπες δοκούς που εξετάστηκαν, ωστόσο η καμπτική αντοχή της παρέμεινε σε υψηλότερα επίπεδα για παραμορφώσεις έως $\delta = \pm 20$ mm.
5. Η απορροφούμενη ενέργεια των ενισχυμένων δοκών με μανδύα ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με αρχική βλάβη και των ενισχυμένων δοκών με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος ήταν σε παρόμοια επίπεδα (έως το τέλος των καταγραφών).
6. Η εικόνα των ρωγμών στην αστοχία των δοκών διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του μανδύα. Στις ενισχυμένες δοκούς με ινοπλισμένο μανδύα παρατηρείται συγκέντρωση των παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού με τη διεύρυνση μίας ή δύο ρωγμών (ανεξάρτητα από το μέγεθος της αρχικής βλάβης), ενώ στις δοκούς με μανδύα συμβατικού σκυροδέματος έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος με αποκάλυψη των συνδετήρων καθ' ύψος στην περιοχή αστοχίας (στο μέσο της δοκού).

7. Οι δοκοί CFRT-11C, CFRT-12C παρουσίασαν σε σύγκριση με τις αντίστοιχες CFRT (μανδύες ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος) χωρίς αρχική βλάβη:

- μικρότερη καμπτική αντοχή κατά 9%
- μικρότερη καμπτική αντοχή για $\delta > +/\delta_{Mmax}$ κατά 16% & 5÷10% αντίστοιχα
- σχεδόν ίδια ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (3% μεγαλύτερη μέχρι το τέλος των καταγραφών)

8. Οι δοκοί CRLT-13C, CRHT-14C (μανδύες συμβατικού σκυροδέματος) παρουσίασαν σε σύγκριση με τις CFRT χωρίς αρχική βλάβη μικρότερη:

- αντοχή σε κάμψη κατά 20%
- αντοχή σε κάμψη για $\delta > +/\delta_{Mmax}$ κατά 21% & 14% αντίστοιχα
- ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά 7%

Βιβλιογραφία

1. Altun F. (2004), «An experimental study of the jacketed reinforced-concrete beams under bending», *Construction and Building Materials* 18, p.611–618
2. Banthia N. (2008), «Fiber Reinforced Concrete for the Arabian Gulf», *Proceedings of Advances in Concrete Technology in the Middle-East*, Dubai, UAE
3. Banthia N. (2012), «FRC: Milestone in international Research and development», *Proceedings of FIBCON2012*, ICI, Nagpur, India, February 13-14, p. 48
4. Benjeddou O., Ouezdou M. B., Bedday A. (2007), «Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates», *Construction and Building Materials* 21, p.1301–1310
5. Biryukovich KL, Biryukovich YuL, Biryukovich DL. (1964), «Glass-fibre-reinforced cement», Kiev
6. Brandt A. M. (2008), «Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering», *Composite Structures* Volume 86, Issues 1–3, p.3–9
7. Katzer J., Domski J. (2012), «Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete», *Construction and Building Materials* 34, p.243–248
8. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. (2007), «An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beam strengthening», 6th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FraMCoS-6), Catania
9. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. (2010), «Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete», *Cement & Concrete Composites* 32, p.731–739
10. Majumdar AJ, Ryder JR. (1968), «Glass fibre reinforcement of cement products» *Glass Technology* , 9(3):78-84
11. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (2009), «Σκυρόδεμα - Μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά», Μετάφραση: Παπαγιάννη Ι., Εκδόσεις Κλειδάριθμος
12. Naaman A. E. (2003), «Engineered Steel Fibres with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites», *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 3, p.241-252
13. Romualdi JP, Batson GB. (1963), «Mechanics of crack arrest in concrete», *J. Eng. Mech. ASCE*. p.147-168

14. Μωρέττη Μ. Λ., «Ειδικά Κεφάλαια Οπλισμένου Σκυροδέματος, Σημειώσεις για το μάθημα»
15. Μωρέττη Μ. Λ., Παπαθεοχάρης Θ., Περδικάρης Φ. (2014), «Design of Reinforced Concrete Infilled Frames», Journal of Structural Engineering, ASCE
16. Παπαθεοχάρης Θ. (2007), «Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος κάμψη», Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων: Περδικάρης Φ., Βόλος
17. Παπαθεοχάρης Θ. (2012), «Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς σε Κάμψη Συμβατικά Οπλισμένων Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος», Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων: Περδικάρης Φ., Βόλος
18. Πενέλης Γ.Γ., Κάππος Α.Ι. (1999), «Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
19. Πενέλης Γ., Στυλιανίδης Κ., Κάππος Α., Ιγνατάκης Χ. (2008), «Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Εκδόσεις Αϊβάξης, Θεσσαλονίκη
20. Στυλιανίδης Κ., Παπανικολάου Κ.Β., Σαλονικιός Θ. (1998), «Αξιολόγηση Δεικτών Μηχανικών Χαρακτηριστικών Δοκιμών Ινοπλισμένου Σκυροδέματος», Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Σειρά Ι, Τεύχος 2
21. Τρέζος Κ. Γ. (2009), «Αποτίμηση των ιδιοτήτων των υλικών σε υφιστάμενες κατασκευές», 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος
22. Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος (2004), «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)», 2^η Έκδοση, Πάτρα
23. Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος (2008), «Δομικά Υλικά», 8^η Έκδοση, Πάτρα
24. Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΚΩΣ 2000, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος (Σ.Π.Μ.Ε.)
25. Κανονισμός Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2012), Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.)
26. Συστάσεις για Προσεισμικές και Μετασεισμικές Επεμβάσεις σε Κτίρια (2001), Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Αθήνα

Δοκός	δ_{cr} (mm)	$M_{cr}^{exp.}$ (kNm)	$M_{cr}^{cal.}$ (kNm)	$M_{cr}^{exp.} / M_{cr}^{cal.}$	δ_y (mm)	$M_y^{exp.}$ (kNm)	$M_y^{cal.}$ (kNm)	$M_y^{exp.} / M_y^{cal.}$	δ_{Mmax} (mm)	$M_{max}^{exp.}$ (kNm)	$M_{max}^{cal.}$ (kNm)	$M_{max}^{exp.} / M_{max}^{cal.}$
RC-7C (φόρτιση έως $\delta=\pm 12\text{mm}$)	0,14	3,2	3,3	1,18	5,85	20,4	17,1	1,18	6,93	20,5	18,1	1,12
RC-8C (φόρτιση έως $\delta=\pm 30\text{mm}$)	0,25	4,6			6,12	20			8,04	20,2		
CFRT-11C (RC-8C, ινοπλισμένος μανδύας)	0,32	16,7	10,1	1,65	5,44	58,4	46,1	1,27	7,69	58,5	59,5	0,98
CFRT-12C (RC-7C, ινοπλισμένος μανδύας)	0,05	4,9		0,49	4,33	49,8		1,08	7,85	53,5		0,90
CFRT-5C (RC χωρίς βλάβη, ινοπ/νος μανδύας)	0,3	10,8	7,9	1,37	5	61,2	62,5	0,91	8,2	67,6	67,3	0,91
CFRT-6C (RC χωρίς βλάβη, ινοπ/νος μανδύας)	0,4	10,9			5,5	55			8	58		
CFRT-7C (RC χωρίς βλάβη, ινοπ/νος μανδύας)	0,3	10,7			5,2	54,8			8,1	59		
CRLT-13C (RC χωρίς βλάβη, μανδύας κανονικής αντοχής)	0,14	9,9	8,7	1,14	4,5	45,5	33,8	1,35	8,05	48,9	45,2	1,08
CRHT-14C (RC χωρίς βλάβη, μανδύας υψηλής αντοχής)	0,11	9,5	9,7	0,98	5	48,2	34,9	1,38	7,75	50,1	47,5	1,05

Στάδιο Φόρτισης	$M^{CFRT-11C} / M^{CFRT}$ (χωρίς βλάβη)	$M^{CFRT-12C} / M^{CFRT}$ (χωρίς βλάβη)	$M^{CRLT-13C} / M^{CFRT}$ (χωρίς βλάβη)	$M^{CRHT-14C} / M^{CFRT}$ (χωρίς βλάβη)
Ρηγμάτωση	1,55	0,45	0,92	0,88
Διαρροή διαμήκους οπλισμού	1,02	0,87	0,80	0,85
Μέγιστη ροπή	0,95	0,87	0,79	0,81

* *exp.* (experimental) = πειραματική τιμή

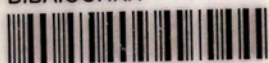
* *cal.* (calculated) = τιμή που υπολογίστηκε από τη θεωρητική ανάλυση

* Στις πειραματικές τιμές των δοκών υπολογίστηκε ο μέσος όρος

* Οι τιμές θεωρητικής ανάλυσης των δοκών CFRT-5C, CFRT-6C και CFRT-7C σύμφωνα με Θ. Παπαθεοχάρη (2012)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121044