ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP

Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτη Α. Αποστολόπουλου

Ματθαίου Γ. Κοντονίκα

Επιβλέπων

Σπηλιόπουλος Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΕΠΙΚΑΙΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ένα από τα βασικότερα και σοβαρότερα προβλήματα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, που είναι εκτεθειμένες σε διαβρωτικό περιβάλλον, είναι η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού. Πέρα από τη μείωση της αντοχής του δομικού στοιχείου, η διάβρωση του οπλισμού μπορεί να προκαλέσει επίσης ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα του δομικού στοιχείου, λόγω της αύξησης του όγκου του χαλύβδινου οπλισμού. Το φαινόμενο αυτό ξεκίνησε να παρατηρείται πιο έντονα σε κατασκευές της βόρειας Αμερικής και της Βόρειας Ευρώπης (κυρίως γέφυρες, κτίρια στάθμευσης οχημάτων, εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων κτλ). Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στο 1/3 από τις 600.000, περίπου, γέφυρες που διαθέτει, έχουν παρουσιαστεί στατικά και λειτουργικά προβλήματα λόγω διάβρωσης (Benmokrane et al. 1998), ενώ μελέτες έχουν δείξει ότι θα εξασφαλιζόταν τεράστια οικονομία μόνο από την αναστολή της διάβρωσης σε εγκατεστημένες γέφυρες (450-500 εκατ. δολάρια το 1988). Από τις γέφυρες αυτές, οι περισσότερες είναι από οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα, και έχει εκτιμηθεί ότι άμεσα θα πρέπει να επισκευαστούν ή να ενισχυθούν. Στην Αγγλία, πάνω από 10.000 γέφυρες από σκυρόδεμα χρειάζονται επισκευές και ενισχύσεις για τον ίδιο λόγο (Read, 1989). Η διάβρωση στις κατασκευές που βρίσκονται σε βόρεια κλίματα γίνεται ακόμα πιο έντονη από τη χρήση αλατιού για το λιώσιμο του χιονιού. Έτσι, ακόμα πιο μεγάλα

είναι τα προβλήματα σε στεγασμένα γκαράζ στα οποία εισέρχονται αυτοκίνητα από δρόμους στους οποίους έχει πέσει αλάτι. Τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονται επίσης και στις παράκτιες κατασκευές. Στην Ευρώπη, το κόστος των επισκευών των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω της διάβρωσης των ράβδων οπλισμού, έχει εκτιμηθεί ότι θα ξεπεράσει τα 600 εκατομμύρια δολάρια ετησίως (Clarke, 1993). Στον Καναδά, το κόστος μόνο των απαιτούμενων επισκευών των σταθμών στάθμευσης αυτοκινήτων, που είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, έχει εκτιμηθεί ότι θα ξεπεράσει τα 6 δισεκατομμύρια δολάρια (Banthia, 1995).

Το πρόβλημα της διάβρωσης στις νέες κατασκευές σκυροδέματος φαίνεται να αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την χρήση ενός νέου οπλισμού, που είναι γνωστός ως οπλισμός *FRP* (Fiber Reinforced Polymers). Πρόκειται για ένα είδος οπλισμού από συνθετικό υλικό που κατασκευάζεται από ίνες εμποτισμένες με ειδικές ρητίνες. Η χρήση του οπλισμού αυτού έχει ευρέως διαδοθεί τα τελευταία χρόνια τόσο στην Αμερική, όσο και σε άλλες χώρες, όπως στην Ιαπωνία κυρίως, τον Καναδά, την Αγγλία, κτλ. Η είσοδος του νέου αυτού υλικού στη δομική βιομηχανία έχει δημιουργήσει την επιτακτική ανάγκη ανάπτυξης της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την ασφαλή χρήση του στην πράξη. Έτσι, αρμόδιοι κρατικοί φορείς, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα σκυροδέματος, σε όλες σχεδόν τις προηγμένες χώρες του κόσμου, έχουν θέσει ως άμεση ερευνητική προτεραιότητα την διασαφήνιση της μηχανικής συμπεριφοράς, τόσο του νέου αυτού οπλισμού, όσο και των δομικών στοιχείων σκυροδέματος που οπλίζει. Έτσι, ένα τεράστιο ποσό γνώσης πάνω στο θέμα αυτό, έχει αποκτηθεί, σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Η γνώση αυτή, που έχει καταγραφεί σε επιστημονικά περιοδικά, σε πρακτικά συνεδρίων, και σε τεχνικές εκθέσεις οργανισμών, έχει αποτελέσει την βάση των οδηγιών και συστάσεων για τον σχεδιασμό κατασκευών σκυροδέματος με τον οπλισμό *FRP*.

Το Αμερικάνικο Ινστιτούτο σκυροδέματος (ACI), η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (JSCE), η Καναδική Ένωση Προτύπων και το Καναδικό δίκτυο ISIS, το Ινστιτούτο Δομικών Μηχανικών του Ηνωμένου Βασιλείου έχουν αναπτύξει την ‘πρώτη γενιά’ οδηγιών σχεδιασμού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό *FRP*. Πέρα από τις παραπάνω ενώσεις, μόλις πρόσφατα, η Ιταλία και η Νορβηγία, έχουν

αναπτύξει τις δικές τους οδηγίες και συστάσεις για την χρήση του οπλισμού αυτού σε κατασκευές σκυροδέματος με οπλισμό *FRP*.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ, ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.2.1 Αντικείμενο της εργασίας

Το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της καμπτικής παραμορφωσιακής συμπεριφοράς δοκών σκυροδέματος με οπλισμό *FRP*. Η πειραματική διερεύνηση περιελάμβανε: (α) την κατασκευή τριών δοκών σκυροδέματος με το ίδιο ποσοστό αλλά με διαφορετικό τύπο οπλισμού η κάθε μία. (β) την μονότονη καταπόνηση των δοκών σε κάμψη τεσσάρων σημείων και την καταγραφή της βύθισης, του τύπου ρηγμάτωσης, του εύρους ρωγμών και της καμπτικής ροπής αστοχίας των δοκών. Η θεωρητική διερεύνηση περιελάμβανε την τρισδιάστατη ανάλυση των τριών δοκών με πεπερασμένα στοιχεία για τον θεωρητικό προσδιορισμό της παραμόρφωσης και της έντασης των δοκών. Ο βασικός σκοπός της θεωρητικής διερεύνησης ήταν ο έλεγχος και η επιβεβαίωση των υποθέσεων και των παραδοχών που υιοθετούνται στα απλοποιημένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό δοκών με οπλισμό FRP.

1.2.2 Η δομή και το περιεχόμενο των κεφαλαίων της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της θεωρητικής έρευνας που έχει γίνει διεθνώς τα τελευταία χρόνια πάνω στην καμπτική παραμορφωσιακή συμπεριφορά δοκών με οπλισμό FRP. Γίνεται επίσης αναφορά ,στις βασικές σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη του βέλους κάμψης και του εύρους των ρωγμών δοκών σκυροδέματος με οπλισμό FRP, οι οποίες έχουν υιοθετηθεί από τους βασικότερους κώδικες και κανονισμούς.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το πειραματικό έργο που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Περιγράφονται οι πειραματικοί δοκοί που κατασκευάστηκαν, η διαδικασία των δοκιμών, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση των τριών δοκών με πεπερασμένα στοιχεία. Τα θεωρητικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν για τις δύο διακριτές φάσεις της συμπεριφοράς των δοκών: το Στάδιο Ι, που αφορά την μη ρηγματωμένη κατάσταση , και το Στάδιο ΙΙ που αφορά τη ρηγματωμένη κατάσταση. Για το κάθε στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη βύθιση και την ένταση των δοκών. Για το Στάδιο ΙΙ, όπου η μοντελοποίηση συμπεριέλαβε τον αριθμό και τη γεωμετρία των σχηματιζόμενων ρωγμών, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πάνω στο εύρος των ρωγμών και στην επίδραση του διεπιφανειακού νόμου συνάφειας-ολίσθησης πάνω στην παραμόρφωση των δοκών.

Τέλος, η εργασία κλείνει με το Κεφάλαιο 5 όπου παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που αποκτήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στο Παράρτημα της εργασίας συμπεριλαμβάνονται ορισμένες θεωρητικές σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον θεωρητικό προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής των δοκών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ

Οι κανονισμοί του Αμερικάνικου Κανονισμού Σκυροδέματος (ACI, 1999) και της Καναδικής Ένωσης Προτυποποίησης (CSA, 1998) πρότειναν τη χρήση της ισοδύναμης ροπής αδράνειας I_e για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης των ρηγματωμένων μελών από σκυρόδεμα με οπλισμό από χάλυβα. Η διαδικασία απαιτεί τον υπολογισμό μιας ομοιόμορφης ροπής αδράνειας σε όλο το μήκος της δοκού, και τη χρήση των εξισώσεων της κατακόρυφης μετατόπισης που προέρχονται από τη γραμμική ελαστική ανάλυση.

Ο υπολογισμός της ισοδύναμης ροπής αδράνειας I_e βασίζεται σε ημι-εμπειρικές μεθόδους, και παρά τις όποιες αμφιβολίες που υπάρχουν για τη δυνατότητα εφαρμογής τους στα συμβατικά οπλισμένα στοιχεία σκυροδέματος που υποβάλλονται σε σύνθετες φορτίσεις και συνοριακές συνθήκες, έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές στη διάρκεια που εφαρμόζεται. Στους κώδικες της Βόρειας Αμερικής, ο υπολογισμός της κατακόρυφης μετατόπισης καμπτόμενων μελών βασίζεται κυρίως, στις εξισώσεις που προέρχονται από τη γραμμική ελαστική ανάλυση, χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη ροπή αδράνειας I_e, που δίνεται από τον τύπο του Branson (1965)

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I^t{}_{cr \le} I_g \quad , \tag{2.1}$$

όπου M_{cr} είναι η ροπή ρηγμάτωσης, M_α η αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή στο δομικό στοιχείο, I_g η ροπή αδράνειας της συμπαγούς διατομής, I_{cr} η ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής, I_e η ισοδύναμη ροπή αδράνειας.

Μετά από μια σειρά δοκιμών που έγιναν σε διάφορους τύπους δοκών και με διαφορετικές συνθήκες φόρτισης (Yu και Winter, 1960; Branson, 1977; Nawy και Neuworth, 1977) αποδείχτηκε ότι ο παραπάνω τύπος εξαρτάται από το είδος της φόρτισης, την τιμή του λόγου I_g/I_{cr} και του ποσοστού οπλισμού ρ. Η εξίσωση του Branson παρέχει μια αξιόπιστη εκτίμηση της κατακόρυφης μετατόπισης για δοκούς οπλισμένες με τυπικές ποσότητες χάλυβα. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη καθώς η έκφραση της ισοδύναμης ροπής αδράνειας I_e προήλθε από πειραματικές μετρήσεις δοκών που οπλίζονταν από χάλυβα. Τα περισσότερα από αυτά τα δοκάρια ήταν αμφιέρειστα με ορθογώνια διατομή που είχαν ένα ποσοστό οπλισμού ρ ίσο με 1.65 % και ένα αντίστοιχο λόγο ακαμψιών I_g/I_{cr} ίσο με 2.2 (Washa και Fluck, 1952; Branson, 1965). Η σύγκριση των κατακόρυφων μετατοπίσεων έγινε για ένα φορτίο που ήταν περίπου ίσο με 2.5 φορές αυτό της ρηγμάτωσης. Στην ανάλυση συμπεριελήφθησαν επίσης κάποια συνεχή δοκάρια, καθώς και μερικά τύπου Τ με I_g/I_{cr} ίσο με 3 (Yu και Winter, 1960). Όλα τα δοκάρια φορτίστηκαν ομοιόμορφα. Στη συνέχεια, ο Branson (1977) πραγματοποίησε μια παραμετρική μελέτη για δοκάρια των οποίων οι τιμές του I_g/I_{cr} ήταν μεταξύ των τιμών 1.5 και 4.0. Αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστά οπλισμού χάλυβα που ξεκινούν από 2.2% και μειώνονται μέχρι 0.6% για ένα ορθογώνιο δοκάρι με σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 35 MPa. Η αναπτυσσόμενη ροπή M_α, σε αυτήν την περίπτωση, κυμαίνεται από μια υψηλή τιμή, περίπου ίση με 4 ή 5 φορές τη ροπή ρηγμάτωσης M_{cr}, σε μία μικρότερη τιμή ίση με 2 φορές τη ροπή ρηγμάτωσης M_{cr}, όταν ο λόγος οπλισμού μειώνεται από 2.2% σε 0.6%

Κατά καιρούς έγιναν αρκετές προσπάθειες από διάφορους μελετητές για την αναζήτηση μιας σχέσης που θα έδινε ακριβή αποτελέσματα της ισοδύναμης ροπής αδράνειας για

δοκούς οπλισμένες με FRP. Από τους περισσότερους θεωρήθηκε, ότι η μορφή αυτής της σχέσης θα πρέπει να είναι παρόμοια με αυτήν της εξίσωσης του Branson, επειδή είναι πολύ εύχρηστη και οι μελετητές είναι εξοικειωμένοι με αυτή.

Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις, που ασχολήθηκε με τη σύγκριση και κριτική της προτεινόμενης από το ACI μεθόδου, ήταν αυτή του Alsayed (1998). Στη δημοσίευση αυτή, με βάση τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα των ερευνών πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, συμπεραίνεται ότι, η συμπεριφορά των δοκών με οπλισμό FRP είναι διαφορετική σε μεγάλο βαθμό από αυτή των αντίστοιχων δοκών με οπλισμό χάλυβα. Η μελέτη παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων από δοκιμές σε εννέα δοκούς με οπλισμό GFRP και σε τρεις δοκούς με οπλισμό χάλυβα, και των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του τύπου του ACI, του τροποποιημένου μοντέλου του GangaRao (1992), και ενός μοντέλου που κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των ράβδων FRP του πειράματος (Alsayed, 1998).

Με την αντικατάσταση της ισοδύναμης ροπής αδράνειας I_e από τη μέση ροπή αδράνειας I_m (GangaRao και Faza, 1992), ο Alsayed βρήκε πειραματικά αποτελέσματα πολύ κοντά στα προβλεπόμενα από την τροποποιημένη εξίσωση. Τα βασικότερα συμπεράσματα του άρθρου αυτού είναι:

- Η αστοχία στις δοκούς με οπλισμό GFRP συμβαίνει πρώτα στη θλιβόμενη ζώνη, λόγω της θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος, και όχι στις ράβδους οπλισμού από την αστοχία αυτών σε εφελκυσμό.

- Το μοντέλο που προτείνει το ACI υποεκτιμά την παραμόρφωση των GFRP, και το λάθος στην πρόβλεψη του φορτίου λειτουργίας ανέρχεται στο 70%. Στην περίπτωση που αντικατασταθεί η ισοδύναμη ροπή αδράνειας της εξίσωσης του ACI με την τροποποιημένη του GangaRao, το λάθος στην πρόβλεψη πέφτει στο 15%. Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει

ότι δεν είναι αναγκαίες οι τροποποιήσεις για τα διάφορα είδη φόρτισης, με διαφορές διατάξεις οπλισμού και διαφορετικά είδη ράβδων FRP.

- Για τις δοκούς με οπλισμό GFRP, που έχουν σχεδιαστεί να αστοχεί το σκυρόδεμα, η φέρουσα καμπτική ικανότητα της δοκού μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με χρήση της μεθόδου οριακής αντοχής, για υπεροπλισμένες διατομές. Παρόλα αυτά, η παραμόρφωση στο φορτίο λειτουργίας για τέτοιες δοκούς μπορεί να καθορίζει το σχεδιασμό και για πολλούς τύπους από FRP. Ο μέσος λόγος της καμπτικής παραμόρφωσης που μετράται στο φορτίο λειτουργίας δοκών με οπλισμό GFRP ως προς δοκούς με οπλισμό χάλυβα, της ίδιας φέρουσας καμπτικής οριακής ικανότητας και των ίδιων διαστάσεων είναι ίσος προς 2.

- Με συντελεστή ασφαλείας 1.5 έναντι αστοχίας σε εφελκυσμό των οπλισμών GFRP, διασφαλίζεται η αστοχία των δοκών από θλίψη σκυροδέματος.

Ο Benmokrane (1996), ύστερα από πειραματική έρευνα, πρότεινε ότι η εξίσωση του Branson θα έπρεπε να τροποποιηθεί περαιτέρω εισάγοντας δύο εμπειρικές προκειμένου να προσαρμοστεί για την περίπτωση των ράβδων GFRP. Η τροποποιημένη εξίσωση που πρότεινε ο Benmokrane είναι η εξής:

$$I_e = al_{cr} + \left(\frac{I_g}{\beta} - aI_{cr}\right)\left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^3 \leq I_g\,, \qquad (2.2)$$

όπου τα α και β προσδιορίστηκαν ίσα με 0.84 και 7.0, αντίστοιχα.

Οι Brown και Bartholomew (1996) πρότειναν ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η βασική μορφή της εξίσωσης (2.1) με μια λογική ακρίβεια για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης των δοκών σκυροδέματος οπλισμένων με ράβδους FRP, εάν χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση πέμπτης δύναμης αντί αυτής με τρίτη που προϋπήρχε. Η τροποποιημένη εξίσωση είναι η ακόλουθη:

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^5\right] I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^5\right] I_{cr} \le I_g \,, \tag{2.3}$$

Ο Gao (1998) εισήγαγε στον τύπο του Branson μια διαρθρωτική παράμετρο β για την καλύτερη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων. Η τροποποιημένη σχέση του Branson που προτάθηκε είναι η εξής:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^m \beta I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^m\right] I_{cr} \le I_g \,, \tag{2.4}$$

όπου m=3 για ράβδους FRP από γυαλί και β_b είναι διορθωτική παράμετρος. Η επιτροπή ACI 440 (ACI, 2003) και η ISIS (2001) πρότειναν μια τροποποιημένη έκφραση για το β_b, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_b = a_b \left[\frac{E_f}{E_s} + 1\right] \tag{2.5}$$

όπου E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού FRP, E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, α_b είναι συντελεστής συνάφειας (μέχρι να διατεθούν περισσότερα στοιχεία $\alpha_b=0.5$). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής β_b ισούται με 0.6 για ράβδους FRP από γυαλί με ακαμψία 40 GPa.

Η επιτροπή του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Σκυροδέματος ACI 440 (2004) πρότεινε επίσης αναθεωρήσεις στην εξίσωση σχεδιασμού της ACI 440.1R-03 (ACI, 2003). Η εξίσωση της ισοδύναμης ροπής αδράνειας έχει διατηρήσει την ίδια μορφή με αυτή της εξίσωσης (2.4), εντούτοις, η μορφή του συντελεστή β άλλαξε. Ο νέος συντελεστής μείωσης β άλλαξε τη βασική μεταβλητή από το μέτρο ελαστικότητας στο σχετικό λόγο οπλισμού, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\beta = \frac{1}{5}\left(\frac{\rho_{FRP}}{\rho_{bal}}\right) \leq 1.0 \tag{2.6}$$

Ο Yost (2003) έλαβε υπόψη την επιρροή της αναλογίας οπλισμού με τον συντελεστή:

$$\alpha_b = 0.064\left(\frac{\rho}{\rho_{bal}}\right) + 0.13 \tag{2.7}$$

όπου ρ_{bal} είναι το ποσοστό οπλισμού της ισορροπημένης διατομής, ρ είναι το ποσοστό οπλισμού. Στην περίπτωση που ο λόγος ρ/ρ_{bal} είναι ανάμεσα στα όρια $1.20 < \rho/\rho_{bal} < 2.70$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέση τιμή του α_b ίση με 0.25. η απόκλιση που παρατηρείται στην αναμενόμενη συμπεριφορά και η αδυναμία σωστής πρόβλεψης της κατακόρυφης μετατόπισης δοκών σκυροδέματος οπλισμένων με ράβδους FRP έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορών στα χαρακτηριστικά συνάφειας, στις συμπεριφορές ρηγμάτωσης, καθώς επίσης και στην εμφάνιση μιας χαμηλότερης ακαμψίας οπλισμού (ACI, 2003). Ο Yost (2003) αντιλήφθηκε επίσης τη σημασία του ποσοστού οπλισμού στην προβλεπόμενη συμπεριφορά όπως σημειώθηκε παραπάνω.

Οι Toutanji και Saafi (2000) μελέτησαν πειραματικά την καμπτική παραμόρφωση δοκών οπλισμένων με ράβδους GFRP και πρότειναν εμπειρικές σχέσεις προσαρμοσμένες κατά τον καλύτερο τρόπο στα πειραματικά τους αποτελέσματα. Η σχέση που πρότειναν για την ισοδύναμη ροπή αδράνειας είναι η εξής:

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^m\right] I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^m\right] I_{cr} \leq I_g \tag{2.8}$$

με m=3, όπου ρ_{FRP} είναι το ποσοστό οπλισμού.

Η επιτροπή του Καναδά ISIS Design Manual M03-01 (Rizkalla και Mufti, 2001) πρότεινε τη χρήση μίας αρκετά διαφορετικής εξίσωσης για τον υπολογισμό της

ισοδύναμης ροπής αδράνειας, η οποία προτάθηκε από τον Chali (2001). Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:

$$I_e = \frac{I_g I_{cr}}{I_{cr} + \left(1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_{\max}}\right)^2\right)(I_g - I_{cr})} \leq I_g \text{, με } \gamma=0.5 \qquad (2.9)$$

Η εξίσωση αυτή προέρχεται από την σχέση καμπυλότητας που προβλέπεται στον κανονισμό CEB-FIP (1990) και CEB-FIP (1993) η οποία αρχικά αναφερόταν ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Ο Scanlon (2004) επισήμανε ότι η εξίσωση (2.1) του Branson υπερεκτιμά τη μέση ακαμψία οπλισμένων φορέων σκυροδέματος που περιέχουν σχετικά μικρό ποσοστό χάλυβα, όταν το $\rho=A_{st}/bd$ είναι μικρότερο από 1% και για τα πολύ ελαφρώς οπλισμένα στοιχεία όπου I_g/I_{cr} είναι μεγάλο, και γενικά υποεκτιμά τις άμεσες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Η κατάσταση είναι ακόμα χειρότερη για στοιχεία που είναι οπλισμένα με ράβδους FRP όπου έτσι και αλλιώς ο λόγος I_g/I_{cr} είναι πολύ μεγάλος. Σαν βελτίωση, ο Scanlon πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 + \beta_c \eta \left(M_{cr} / M_a \right)} = \frac{I_{cr}}{1 - \eta \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2} \text{ ,} \qquad (2.10)$$

όπου $\eta = 1 - \frac{\mathrm{I_{cr}}}{\mathrm{I_{unc}}}$ και I_{unc} είναι η ροπή αδράνειας του αρηγμάτωτου τμήματος, η οποία είναι περίπου ίση με I_g για τα ελαφρώς οπλισμένα στοιχεία. Η μέθοδος ροπών-καμπυλοτήτων για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης είναι βασισμένη στις βασικές αρχές της στατικής των κατασκευών. Όταν ένα διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας είναι γνωστό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού της κατακόρυφης μετατόπισης δομικών στοιχείων κάτω από οποιαδήποτε φόρτιση, με βάση τον τύπο:

$$\delta = \int_0^L m \frac{M}{EI} dx \tag{2.11}$$

όπου *L* είναι το άνοιγμα της δοκού, *M/EI* είναι η καμπυλότητα του τμήματος, και *m* η ροπή κάμψης λόγω μοναδιαίας φόρτισης που εφαρμόζεται στο σημείο όπου πρόκειται να υπολογιστεί η κατακόρυφη μετατόπιση.

Μία μέθοδος υπολογισμού της κατακόρυφης μετατόπισης μέσω του διαγράμματος ροπής καμπυλότητας υιοθετήθηκε από τους Faza και GangaRao (1992), οι οποίοι υπολόγισαν την κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, που υπόκειται σε κάμψη τεσσάρων σημείων, μέσω της ολοκλήρωσης ενός υποτιθέμενου διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας. Οι Faza και GangaRao (1992) έκαναν την υπόθεση ότι για την κάμψη τεσσάρων σημείων, η δοκός ρηγματώνεται πλήρως μεταξύ των σημείων εφαρμογής των φορτίων και μερικώς οπουδήποτε αλλού. Έτσι θα μπορούσε να παραχθεί ένας τύπος υπολογισμού της κατακόρυφης μετατόπισης με την υπόθεση ότι η ροπή αδράνειας μεταξύ των σημείων φόρτισης είναι η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής, και ότι η ροπή αδράνειας οπουδήποτε αλλού είναι η ισοδύναμη ροπή αδράνειας που καθορίζεται από την εξίσωση (2.1). Μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης ροπής-καμπυλότητας που προτάθηκε από τους Faza και GangaRao (1992), η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση για την κάμψη τεσσάρων σημείων υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\delta_{\max} = \frac{Pa}{24E_c I_c I_{cr}} \left(8a^2 I_{cr} + 3L^2 I_e - 12a^2 I_e\right) \tag{2.12}$$

όπου *α* είναι διατμητικό άνοιγμα.

Η εξίσωση (2.12) έχει περιορισμένη χρήση επειδή δεν είναι σαφείς οι υποθέσεις που πρέπει να γίνουν για την εφαρμογή της ισοδύναμης ροπής αδράνειας σε άλλες περιπτώσεις φορτίσεων. Εντούτοις, είχε πολύ καλά αποτελέσματα στην

πρόβλεψη της κατακόρυφης μετατόπισης των δοκαριών που δοκιμάστηκαν από τους Faza και GangaRao (1992).

Ο κανονισμός του Καναδά (CSA S806-02) πρότεινε ότι η μέθοδος υπολογισμού της κατακόρυφης μετατόπισης μέσω του διαγράμματος της ροπής-καμπυλότητας είναι συμβατή με τα στοιχεία που είναι οπλισμένα από ράβδους FRP, επειδή το διάγραμμα της ροπής-καμπυλότητας μπορεί να προσεγγιστεί από δύο γραμμικές περιοχές, μία πριν το σκυρόδεμα παρουσιάσει ρωγμές, και μία δεύτερη μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής (Razaqpur, 2000). Επομένως, δεν χρειάζεται ο υπολογισμός της καμπυλότητας στα διάφορα τμήματα κατά μήκος της δοκού όπως συμβαίνει για το σκυρόδεμα που οπλίζεται από χάλυβα. Υπάρχουν μόνο τρία δοκάρια ρωγμών με αντίστοιχες καμπυλότητες που καθορίζουν ολόκληρο το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας (κατά τη ρηγμάτωση, αμέσως μετά τη ρηγμάτωση, και στο τέλος). Έχοντας αυτό υπόψη, παρήχθησαν απλοί τύποι για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης των αμφιέρειστων δοκών οπλισμένων με ράβδους FRP που υιοθετήθηκαν από τον κανονισμό CSA S806-02 (CSA, 2002). Η κατακόρυφη μετατόπιση λόγω κάμψης τεσσάρων σημείων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\delta_{\max} = \frac{Pa}{24E_c I_{cr}}\left[3L^2 - 4a^2 - 8\left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 a^2\right] \tag{2.13}$$

2.2 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

Η ροπή ρηγμάτωσης δομικών στοιχείων M_{cr} υπολογίζεται με βάση τις ιδιότητες της συμπαγούς διατομής χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά του οπλισμού (Benmokrane *et al*, 1996).

Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στο χάλυβα, στην περίπτωση του οπλισμού FRP, το ποσοστό οπλισμού έχει παρατηρηθεί ότι έχει αμελητέα επίδραση στην απόσταση των ρωγμών (Masmoudi *et al*, 1998, Theriault *et al*, 1998). Αντίθετα οι Toutanji και Saafi (1999) παρατήρησαν ότι η απόσταση των ρωγμών μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού οπλισμού. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος δεν επηρεάζει την απόσταση των ρωγμών.

Το εύρος ρωγμών, σε αντίθεση με την απόσταση των ρωγμών έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνεται με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής (Theriault *et al*, 1998), το οποίο όμως έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις των Faza και GangaRao (1991). Η αύξηση του ποσοστού οπλισμού οδήγησε σε μείωση του εύρους ρωγμών (Theriault *et al*, 1998; Toutanji και Saafi, 1999).

Οι Masmoudi *et al*, 1998 ανέφεραν ότι τα εύρη ρωγμών που παρουσιάζονται σε δοκούς με οπλισμό FRP είναι τρεις με τέσσερις φορές αυτών που παρουσιάζονται στην περίπτωση του χάλυβα. Πρότειναν ο υπολογισμός του εύρους ρωγμών να γίνεται με την εξίσωση

$$w = K_g f_f \beta \sqrt[3]{d_c A} \tag{2.14}$$

η οποία είναι μία τροποποιημένη εξίσωση των Gergely-Lutz. Η σταθερά K_g προσδιορίστηκε ίση με 41×10^{-6} mm/N για τη σειρά δοκιμίων που εξέτασαν. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου ήταν σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποίησαν οι Theriault *et al*, 1998.

Οι Faza και GangaRao (1993) ξεκαθάρισαν ότι το εύρος ρωγμών των δομικών στοιχείων οπλισμένων με FRP πρέπει να διαφοροποιείται από αυτόν του χάλυβα λόγω των διαφορών στα μέτρα ελαστικότητας και στις συνθήκες συνάφειας. Τονίστηκε η ανάγκη να ληφθεί υπόψη η ενεργή αντοχή συνάφειας των ράβδων FRP στον υπολογισμό του εύρους ρωγμών. Προτάθηκε ο παρακάτω τύπος υπολογισμού, ο οποίος όμως δεν έδωσε

αποδεκτά αποτελέσματα στην περίπτωση των GFRP με επιφάνεια που έχει υποστεί αμμοβολή (sand coated) λόγω της υψηλής αντοχής συνάφειας που έχουν.

$$W_{\max} = l\varepsilon_f \tag{2.15}$$

$$l = \frac{(2 f_t A)}{\mu_m \pi D} \tag{2.16}$$

όπου

l η απόσταση των ρωγμών

f_t η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

μ_m η μέγιστη αντοχή συνάφειας

A η ενεργή περιοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος που περιβάλλει τη ράβδο διαιρεμένη με τον αριθμό των ράβδων

D η διάμετρος της ράβδου

ε_f η μέγιστη παραμόρφωση του FRP σε συνθήκες λειτουργίας

Σε μια διαφορετική προσέγγιση οι Faza και GangaRao (1993) πρότειναν την εξίσωση των Gergely-Lutz, αντικαθιστώντας την παραμόρφωση του χάλυβα με αυτή του FRP

$$w = 0.076\beta \frac{E_s}{E_f} f_f \beta \sqrt[3]{d_c A} \text{ ksi μονάδες} \tag{2.17}$$

όπου f_f/F_f είναι η παραμόρφωση του οπλισμού FRP.

Τονίζεται πάλι, ότι η εξίσωση (2.17) έχει εφαρμογή μόνο στην περίπτωση που οι οπλισμοί FRP και χάλυβα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά συνάφειας. Το εύρος ρωγμής που προβλέφθηκε από αυτή την εξίσωση δεν ήταν σε συμφωνία με τα πειράματα που

περιείχαν ράβδους sand-coated υψηλής συνάφειας. Παρόλα αυτά η ίδια εξίσωση οδήγησε σε καλές προβλέψεις του εύρους ρωγμής σε πειράματα των Alkhrdaji *et al* (2000).

Ο Zhao και οι συνεργάτες του (1997, 1999) πραγματοποίησαν πειράματα και προέβλεψαν το εύρος ρωγμών με την προσέγγιση του BSI (1985). Οι προβλέψεις αυτές παρατηρήθηκε ότι ήταν μη συντηρητικές κατά 20% με 40%. Οι συγγραφείς επισήμαναν την ανάγκη τροποποίησης του κώδικα λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, τις υψηλές παραμορφώσεις, του οπλισμού FRP και την φύση της συνάφειας σκυροδέματος με τη ράβδο FRP. Επίσης παρατήρησαν ότι οι προβλέψεις του εύρους ρωγμής με τον Ευροκώδικα 2 (CEN, 1992) είναι ικανοποιητικές.

Ο Ombres και οι συνεργάτες του (2000) πρότειναν για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμών και της βύθισης μια αριθμητική διαδικασία που βασίζεται στο νόμο της τάσης συνάφειας-ολίσθησης. Οι προβλέψεις του συμφωνούσαν με τα πειραματικά αποτελέσματα ειδικά σε συνθήκες λειτουργίας που αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο φόρτισης μικρότερο από το 50% του οριακού φορτίου.

Οδηγίες του ACI για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμών

Η επιτροπή ACI 440R-96 (ACI Committee 440, 1996) αναφέρει ότι το εύρος ρωγμών επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά συνάφειας και το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού FRP. Η επιτροπή αναφέρεται μόνο στον οπλισμό GFRP χωρίς καμία οδηγία για τα υπόλοιπα είδη οπλισμού FRP. Η επιτροπή υιοθετεί τη δουλειά των Faza και GangaRao (1993) με την προτεινόμενη εξίσωση (2.15). Η επιτροπή ACI 440R-96 (ACI Committee 440, 1996) αναφέρει ότι το πλάτος ρωγμής είναι ανάλογο με την παραμόρφωση οπλισμού (περισσότερο σε σχέση με την τάση) και υιοθετεί μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης των Gergely-Lutz.

$$w = \frac{2.2}{E_f} \beta k_b f_f \sqrt[3]{d_c A} \tag{2.18}$$

Ο όρος k_b έχει εισαχθεί για να ληφθεί υπόψη η συνάφεια οπλισμού FRP-σκυροδέματος και πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά. Αν οι συνθήκες συνάφειας είναι όμοιες με αυτές του χάλυβα τότε ο όρος k_b είναι ίσος με τη μονάδα. Αν οι συνθήκες συνάφειας είναι πιο υποβαθμισμένες από αυτές του χάλυβα τότε ο όρος k_b έχει τιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα. Αν η τιμή του όρου είναι άγνωστη προτείνεται η τιμή 1.2.

Ο κανονισμός ISIS του Καναδά (ISIS Canada, 2001) υιοθετεί τη εξίσωση του ACI και τονίζει την ανάγκη προσδιορισμού του k_b. Ο Καναδικός κανονισμός για το σχεδιασμό κτιρίων με οπλισμό FRP (CAN/CSA-5806-02) 2002 υιοθετεί επίσης την εξίσωση του ACI αλλά επεξεργάζεται με μία έμμεση ποσότητα (z) που προέρχεται από την εξίσωση του εύρους ρωγμών.

Η επιτροπή ACI 440.IR-06 (ACI Committee 440 1996) τροποποιεί περισσότερο την εξίσωση του εύρους των ρωγμών. Το εύρος ρωγμών συνδέεται με την επικάλυψη του σκυροδέματος d_c και την απόσταση μεταξύ των ράβδων s που βασίζεται στην πρόταση του Forsch (1999).

$$w = 2\frac{f_f}{E_f}\beta k_b\sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \tag{2.19}$$

Αν δεν προσδιοριστεί πειραματικά, η τιμή που προτείνεται για τον όρο k_b είναι ίση με 1.4.

Οδηγίες του InstructE για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμών

Σε αντίθεση με το ACI και το ISIS Canada, η InstructE (1999) θεωρεί ότι τα εύρη των ρωγμών δομικών στοιχείων με οπλισμό FRP, μπορούν να προβλεφθούν από τις εξισώσεις που υπάρχουν για το χάλυβα. Το συμπέρασμα αυτό βασίζεται στη σύγκριση πολλών τιμών με τις αντίστοιχες προβλέψεις του BSI. Τα μετρούμενα εύρη ήταν περίπου 40% μεγαλύτερα από τα προβλεπόμενα. Αυτό όμως συμβαίνει και στο χάλυβα σε ποσοστό 20%. Έτσι καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η προσέγγιση του BSI είναι κατάλληλη ή μπορεί να βελτιωθεί με ένα τροποποιητικό συντελεστή περίπου ίσο με 1.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο πειραματικό έργο της παρούσας εργασίας, κατασκευάσθηκαν τρεις δοκοί σκυροδέματος με οπλισμό FRP, που υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων μέχρι να αστοχήσουν. Στις δοκιμές αυτές καταγράφηκαν το βέλος κάμψης, ο σχηματισμός και η εξέλιξη των καμπτικών ρωγμών, καθώς και η τιμή του εξωτερικού φορτίου στο οποίο αστόχησαν οι δοκοί. Οι πειραματικές δοκοί είχαν την ίδια γεωμετρία, την ίδια ποιότητα σκυροδέματος, το ίδιο ποσοστό οπλισμού και διέφεραν μόνο ως προς τον τύπο οπλισμού. Η πρώτη δοκός είχε οπλισθεί με δύο ράβδους G-FRP διαμέτρου 12.7 mm, η δεύτερη με δύο ράβδους C-FRP διαμέτρου 12.7 mm και η τρίτη με ράβδους χάλυβα κατηγορίας S500 διαμέτρου 12 mm. Ο σκοπός των πειραματικών δοκιμών ήταν να γίνει σύγκριση της καμπτικής παραμορφωσιακής συμπεριφοράς που επιδεικνύουν δοκοί σκυροδέματος που έχουν το ίδιο ποσοστό οπλισμού, την ίδια ποιότητα σκυροδέματος και διαφορετικό τύπο οπλισμού FRP. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις δοκιμές θα συγκριθούν αργότερα με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων που θα αναπτυχθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

3.2.1 Πειραματικά δοκίμια

Για την πειραματική μελέτη της κατακόρυφης μετατόπισης και των αναπτυσσόμενων ρωγμών σε δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP, που καταπονούνται σε κάμψη εκτελέστηκαν τρεις πειραματικές δοκιμές. Η πειραματική μελέτη των καμπτικών ρωγμών των δοκών επικεντρώθηκε στον τρόπο σχηματισμού τους, και στην μέτρηση του εύρους και της μεταξύ τους απόστασης. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ και περιελάμβαναν την κατασκευή των πειραματικών δοκών, τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, τον προσδιορισμό του τύπου αστοχίας, την καταγραφή των κατακόρυφων βυθίσεων της δοκού (βέλους κάμψης), τον τρόπο σχηματισμού των καμπτικών ρωγμών και την μέτρηση του εύρους των ρωγμών και της μεταξύ τους απόστασης.

Οι τρεις πειραματικές δοκοί οπλίσθηκαν με τρεις διαφορετικούς τύπους οπλισμού. Η πρώτη δοκός οπλίσθηκε με ράβδους GFRP, η δεύτερη με ράβδους CFRP και η τρίτη με ράβδους με χάλυβα. Η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-1 και 3-2. Τα γεωμετρικά στοιχεία και οι μηχανικές ιδιότητες των πειραματικών δοκών, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2.Ο κύριος οπλισμός τοποθετήθηκε στο κάτω μέρος των δοκών και σε απόσταση 1.5 *cm* από την κάτω επιφάνεια. Ο δευτερεύων οπλισμός τοποθετήθηκε σε όλο το μήκος των δοκών, με εξαίρεση το κεντρικό τους τμήμα, που είχε μήκος 40 cm. Στο κεντρικό τμήμα των δοκών δεν υπήρχε διατμητικός οπλισμός (συνδετήρες), ούτε δευτερεύων οπλισμός.Στα άλλα δύο τμήματα των δοκών, είχαν τοποθετηθεί μεταλλικοί συνδετήρες, που είχαν διάμετρο 8 mm και απείχαν μεταξύ τους 7 cm (Σχήμα 3-1).

Πίνακας 3-1 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες των ράβδων οπλισμού

	GFRP	CFRP	Χάλυβας
Ονομαστική διάμετρος, mm	12.7	12.7	12
Εμβαδόν διατομής, mm^2	126.7	126.7	113
Ειδικό βάρος, kg/m^3	425	187.5	887
Εφελκυστική αντοχή, MPa	761	2300	500
Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	46.7	130	200
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K^{-1}	6.4×10^{-6}	0.8×10^{-6}	10^{-5}

Πίνακας 3-2 Τύπος, στοιχεία, φορτίο θραύσης και τρόπος αστοχίας των πειραματικών δοκών

Τύπος Οπλισμού	Ονομασία Δοκού	Επικάλυψη mm	Κύριος Οπλισμός	Ποσοστό Οπλισμού ‰	Αντοχή Κυβικών δοκιμίων, MPa	Πειραματική Ροπή Θραύσης KNm	Τύπος Αστοχίας
GFRP	B-G	17	2Φ12.7	9.43	30	21	Αστοχία θρυμματισμού σκυροδέματος
CFRP	B-C	17	2Φ12.7	9.43	30	24.5	Αστοχία θρυμματισμού σκυροδέματος
Χάλυβας	B-S	17	2Φ12	8.42	30	22.8	Διαρροή οπλισμού

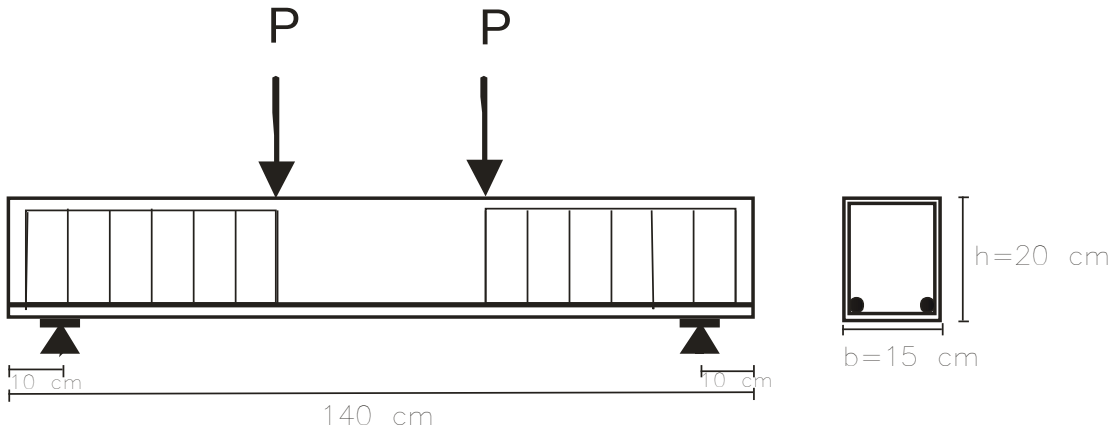
Μετά την σκυροδέτησή τους οι δοκοί-δοκίμια παρέμειναν στα καλούπια για 28 ημέρες, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να αποκτήσει την ολική αντοχή του. Οι συνθήκες του εργαστηρίου εκτιμάται ότι ήταν στους 20 ^{o}C και με υγρασία που δεν ξεπερνούσε το 90%.

Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκών δοκιμίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-3. Τα ειδικά βάρη για το τσιμέντο, την άμμο και τα χαλίκια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 31.5 KN/m^3, 15.5 KN/m^3 και 17 KN/m^3, αντίστοιχα. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν $w/c = 0.45$ και ο εγκλωβισμένος αέρας εκτιμάται στο 2%.

Πίνακας 3-3 Σύνθεση σκυροδέματος

Υλικά	Ποσότητα	Μονάδες Μέτρησης
Νερό	118	Kg
Τσιμέντο	263	Kg
Άμμος	919	Kg
Χαλίκια	1249	Kg
Αέρας	2 %	-

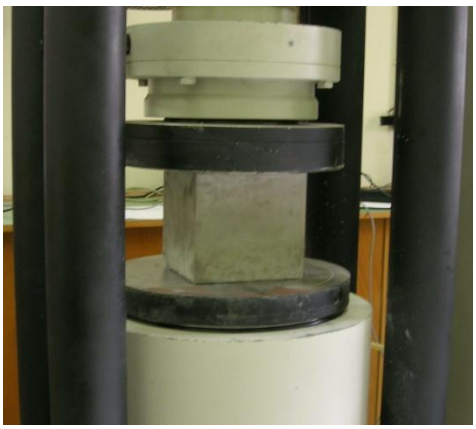
Προκειμένου να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος των δοκών, για κάθε δοκό, λήφθηκαν έξι κυβικά δοκίμια διαστάσεων $15 \times 15 \times 15\,\text{cm}$. Μετά από 28 ημέρες, τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν στη δοκιμή θλίψης στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Η μέση θλιπτική αντοχή που αντιστοιχεί σε κυλινδρικά δοκίμια για τα δοκίμια αυτά προσδιορίστηκε στα 30 MPa. Στις φωτογραφίες του Σχήματος 3-2 δείχνεται ένα από τα δοκίμια κατά την διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 3-1 Η πειραματική δοκός και η διάταξη του οπλισμού

3.2.2 Εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών

Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του ΕΜΠ με την μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων, 28 ημέρες μετά την κατασκευή των πειραματικών δοκών. Οι στηρίξεις όλων των πειραματικών δοκών απείχαν μεταξύ τους 140 cm και δέκα εκατοστά από τα άκρα της (Σχήμα 3-1). Στις δοκούς επιβλήθηκαν δύο ίσες δυνάμεις *P* που απείχαν 50 εκατοστά από τις στηρίξεις τους δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο συνθήκες καθαρής κάμψης στο μεσαίο τμήμα της δοκού. Κατά την διάρκεια των δοκιμών η φόρτιση αυξανόταν αργά και μονότονα μέχρι την τελική αστοχία των δοκών. Η βύθιση των δοκών μετριόταν συνεχώς με ένα LVDT που είχε τοποθετηθεί στο μέσο του ανοίγματος των δοκών.



(α)

(β)

Σχήμα 3-2 (α) Το κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος τοποθετημένο στην μηχανή θλίψης, (β) κυβικά δοκίμια μετά την θραύση τους

Σε συγκεκριμένα επίπεδα φόρτισης, η διαδικασία φόρτισης σταματούσε, καταγραφόταν ο σχηματισμός των ρωγμών στις δοκούς και μετριόταν το εύρος τους και η μεταξύ τους απόστασή. Το εύρος των ρωγμών μετριόταν με οπτικό μικροσκόπιο και με ψηφιακό μηκυνσιόμετρο (Σχήμα 3-3).

(α)

(β)

Σχήμα 3-3 (α) το οπτικό μικροσκόπιο και (β) το ψηφιακό μηκυνσιόμετρο

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.3.1 Η ροπή ρηγμάτωσης

Η ροπή κάμψης που εφαρμόζεται στην δοκό και προξενεί την πρώτη καμπτική ρωγμή ορίζεται ως η ροπή ρηγμάτωσης της δοκού και συμβολίζεται με M_{cr}. Η ροπή αυτή μπορεί να προβλεφθεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας την σχέση (Α-7) του Παραρτήματος Α. Στην σχέση αυτή υπεισέρχεται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος της δοκού f_{ct} που υπολογίζεται σε όρους της θλιπτικής αντοχής f_{ck} με την σχέση (Α-8). Οι πειραματικές τιμές των ροπών ρηγμάτωσης $M_{cr,\exp}$ που καταγράφτηκαν για τις πειραματικές δοκούς, και οι αντίστοιχες τιμές $M^*_{cr,th}$ που υπολογίσθηκαν θεωρητικά έχουν καταχωρηθεί στον Πίνακα 3-4. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη σχέση (Α-12) έχει αμεληθεί η ροπή αδράνειας του οπλισμού και έχει υποτεθεί ότι η διατομή της δοκού συνίσταται μόνο από σκυρόδεμα. Οι ακριβέστερες τιμές των θεωρητικών τιμών ρηγμάτωσης $M_{cr,th}$, που προκύπτουν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4. Για τον οπλισμό GFRP, η σύγκριση των δύο τιμών των θεωρητικών ροπών ρηγμάτωσης δείχνει ότι η

επίδραση του λόγου οπλισμού πάνω στην ροπή ρηγμάτωσης είναι πρακτικά αμελητέα. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής τιμής του μέτρου ελαστικότητας. Από την άλλη πλευρά, για τον οπλισμό CFRP και τον χάλυβα παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στους δύο τρόπους υπολογισμού ρηγμάτωσης, με τον δεύτερο τρόπο να δίνει συντηρητικά αποτελέσματα. Συγκρίνοντας τα θεωρητικά αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές προκύπτει ότι οι θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού των ροπών ρηγμάτωσης παρέχουν τιμές μικρότερες των πειραματικών.

Πίνακας 3-4 Θεωρητικές και πειραματικές ροπές ρηγμάτωσης των πειραματικών δοκών

Τύπος οπλισμού	Δοκός	Λόγος οπλισμού ρ_f [‰]	$M_{cr,th}$	$M^*_{cr,th}$	$M_{cr,\exp}$
GFRP	B-G	9.43	2.89	2.91	4.5
CFRP	B-C	9.43	2.89	3.08	3.2
Χάλυβας	B-S	8.42	2.89	3.18	3.4

3.3.2 Ο σχηματισμός και η απόσταση των καμπτικών ρωγμών

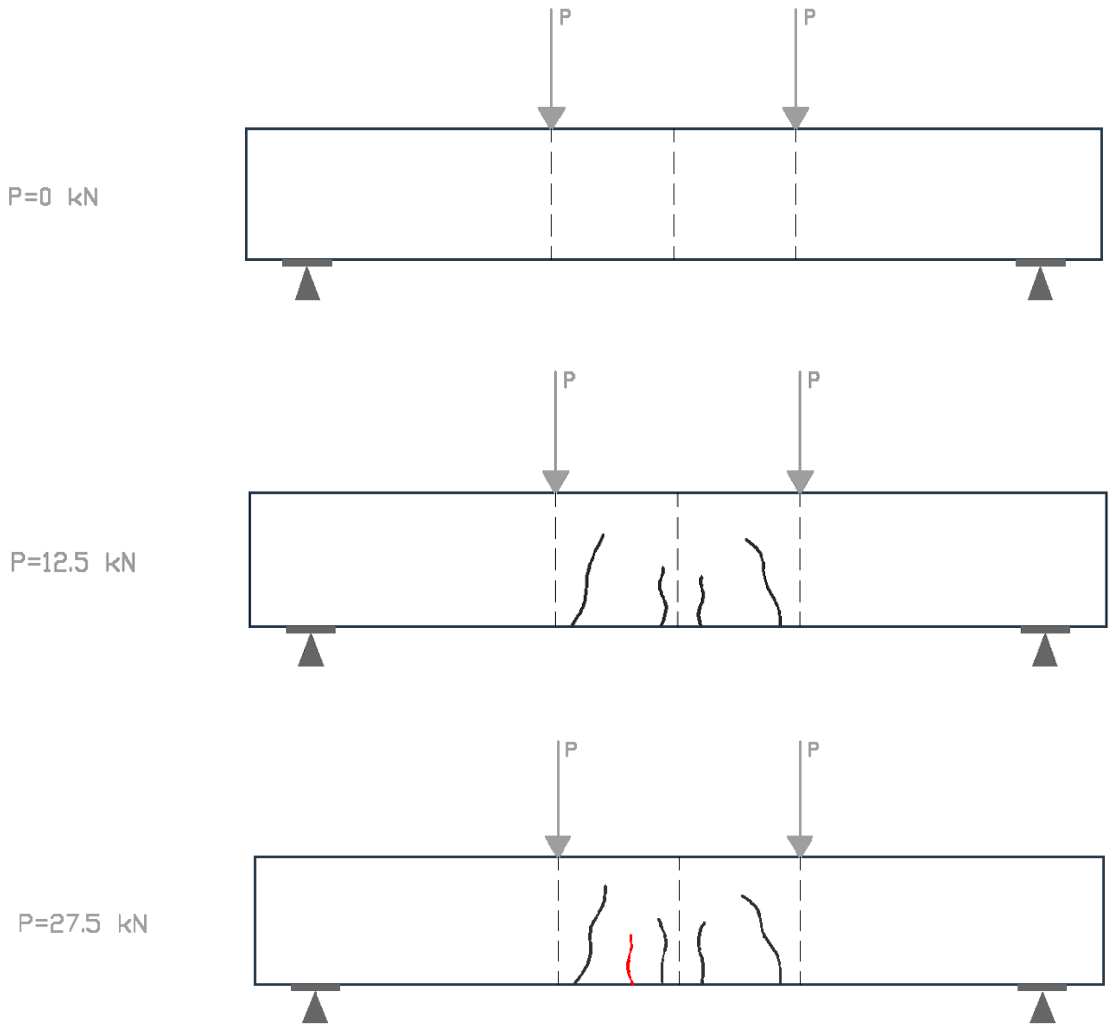
Όπως προαναφέρθηκε, οι πειραματικοί δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων, με την εξωτερική φόρτιση να μεταβάλλεται αργά και αυξητικά μέχρι την τελική αστοχία των δοκών. Η αύξηση του εξωτερικού φορτίου των δοκών σταματούσε σε συγκεκριμένες στάθμες, όπου καταγραφόταν το εύρος των αναπτυσσόμενων ρωγμών και η μεταξύ τους απόσταση.

Δοκιμή Δοκού με Οπλισμό GFRP

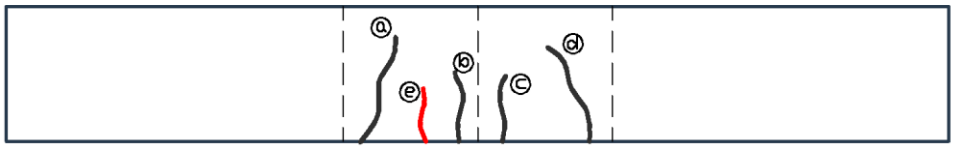
Η πειραματική δοκός, κατά την έναρξη της δοκιμής δείχνεται στο σχήμα 3-4. Οι τέσσερις ρωγμές σχηματίσθηκαν όταν P=12.5 kN. Οι δύο ρωγμές εμφανίσθηκαν κάτω από τη θέση εφαρμογής του επιβαλλόμενου φορτίου, μάλλον λόγω της τοπικής συγκέντρωσης τάσεων στις περιοχές της δοκού ακριβώς κάτω από τα συγκεντρωμένα φορτία. Οι άλλες δύο ρωγμές σχηματίστηκαν κοντά στο μέσο της δοκού. Οι ρωγμές ήταν ανά δύο συμμετρικές ως προς τον μεσαίο άξονα της δοκού. Οι ρωγμές αυτές αυξάνονταν σε εύρος και μήκος με την αύξηση του φορτίου. Όταν η φόρτιση έφτασε τα 27.5 kN, παράλληλα με την αύξηση των ήδη υπάρχουσων ρωγμών, δημιουργήθηκε και μια νέα ρωγμή στο αριστερό τμήμα της δοκού. Όταν το φορτίο έφτασε στα 35 kN πραγματοποιήθηκε η τελευταία μέτρηση, καθώς παρατηρήθηκε μεγάλο βέλος κάμψης, και ήταν πιθανή η άμεση αστοχία της δοκού.. Το δοκίμιο τελικά αστόχησε στα 45 kN. Οι ρωγμές που εμφανίστηκαν, παρατηρήθηκε ότι διαδόθηκαν μέχρι την θλιβόμενη ζώνη της δοκού.

Σχήμα 3-4 Η πειραματική δοκός GFRP κατά την έναρξη της δοκιμής (P=0)

Στο Σχήμα 3-5 δείχνεται σχηματικά η εξέλιξη ρηγμάτωσης της δοκού για τα διάφορα επίπεδα φόρτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

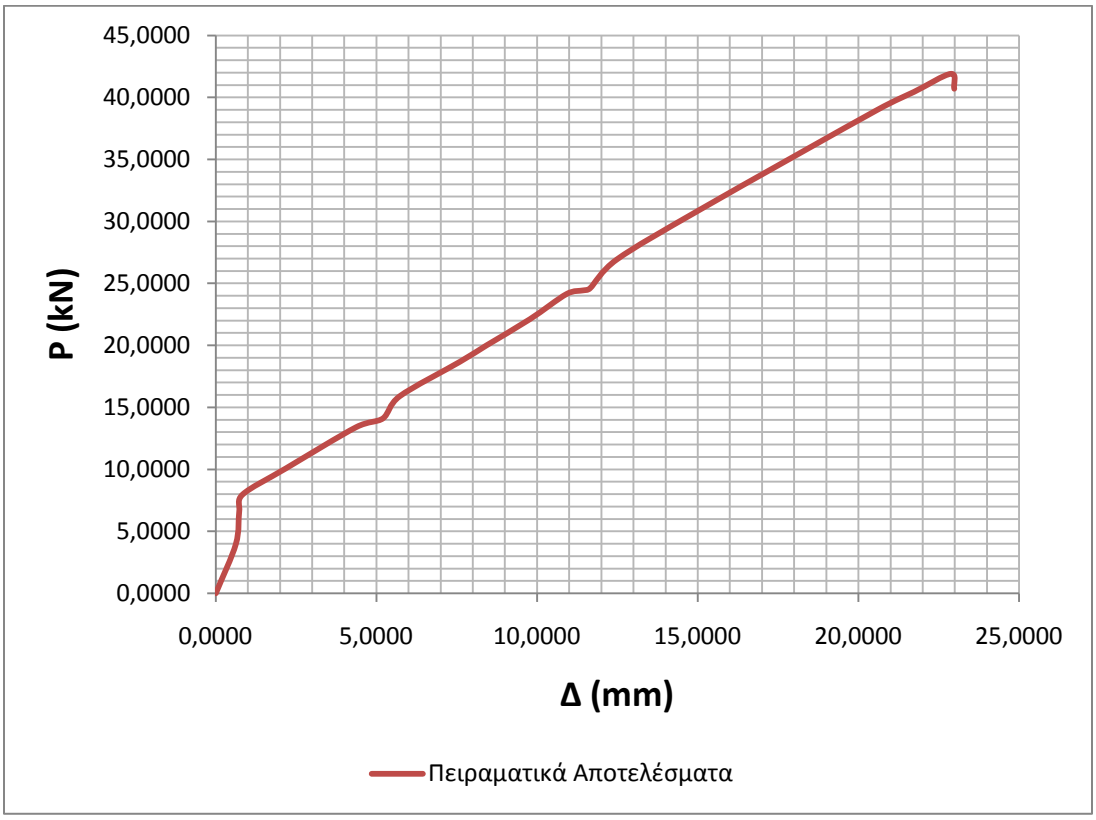


Σχήμα 3-5 Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου



Σχήμα 3-6 Σχηματική αναπαράσταση της τελικής μορφής των ρωγμών που σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Στον Πίνακα 3-5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πειραματικά αποτελέσματα της βύθισης του δοκιμίου για τα διάφορα επίπεδα φόρτισης της δοκού GFRP 12.7. Με βάση τις τιμές αυτές, κατασκευάζεται για την ίδια δοκό το διάγραμμα P-Δ, που δείχνεται στο Σχήμα 3-7.

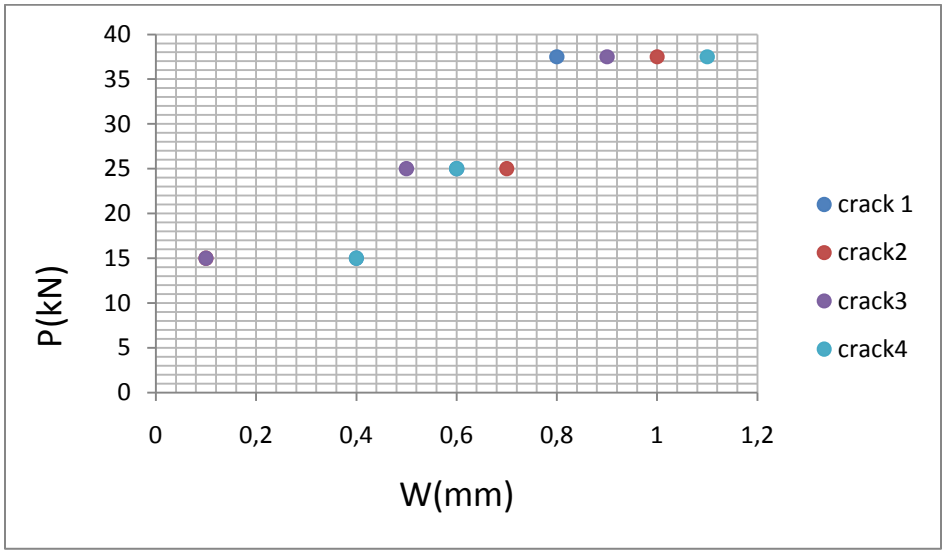


Σχήμα 3-7 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης της πειραματικής δοκού με οπλισμό GFRP 12.7

Πίνακας 3-5 Πειραματικά αποτελέσματα Φορτίου-Βύθισης της πειραματικής δοκού με οπλισμό GFRP 12.7

Πειραματικά αποτελέσματα	
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**
0	**0**
3,983	**0,624**
6,597	**0,728**
7,966	**0,832**
10,082	**2,184**
13,402	**4,368**
14,107	**5,2**
15,891	**5,72**
18,671	**7,592**
19,999	**8,424**
22,115	**9,776**
24,148	**10,92**
24,439	**11,44**
24,604	**11,648**
26,928	**12,48**
31,119	**15,184**
39,002	**20,592**
40,454	**21,736**
41,906	**22,88**
40,703	**22,984**

Οι τιμές του εύρους των τεσσάρων ρωγμών που προέκυψαν από τις μετρήσεις, καταχωρήθηκαν στον Πίνακα 3-6, ενώ στο Σχήμα 3-8, δείχνεται το διάγραμμα που προκύπτει από τις τιμές αυτές.



Σχήμα 3-8:Διάγραμμα φορτίου-εύρους ρωγμών για τις ρωγμές της δοκού GFRP 12.7

Πίνακας 3-6:Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου

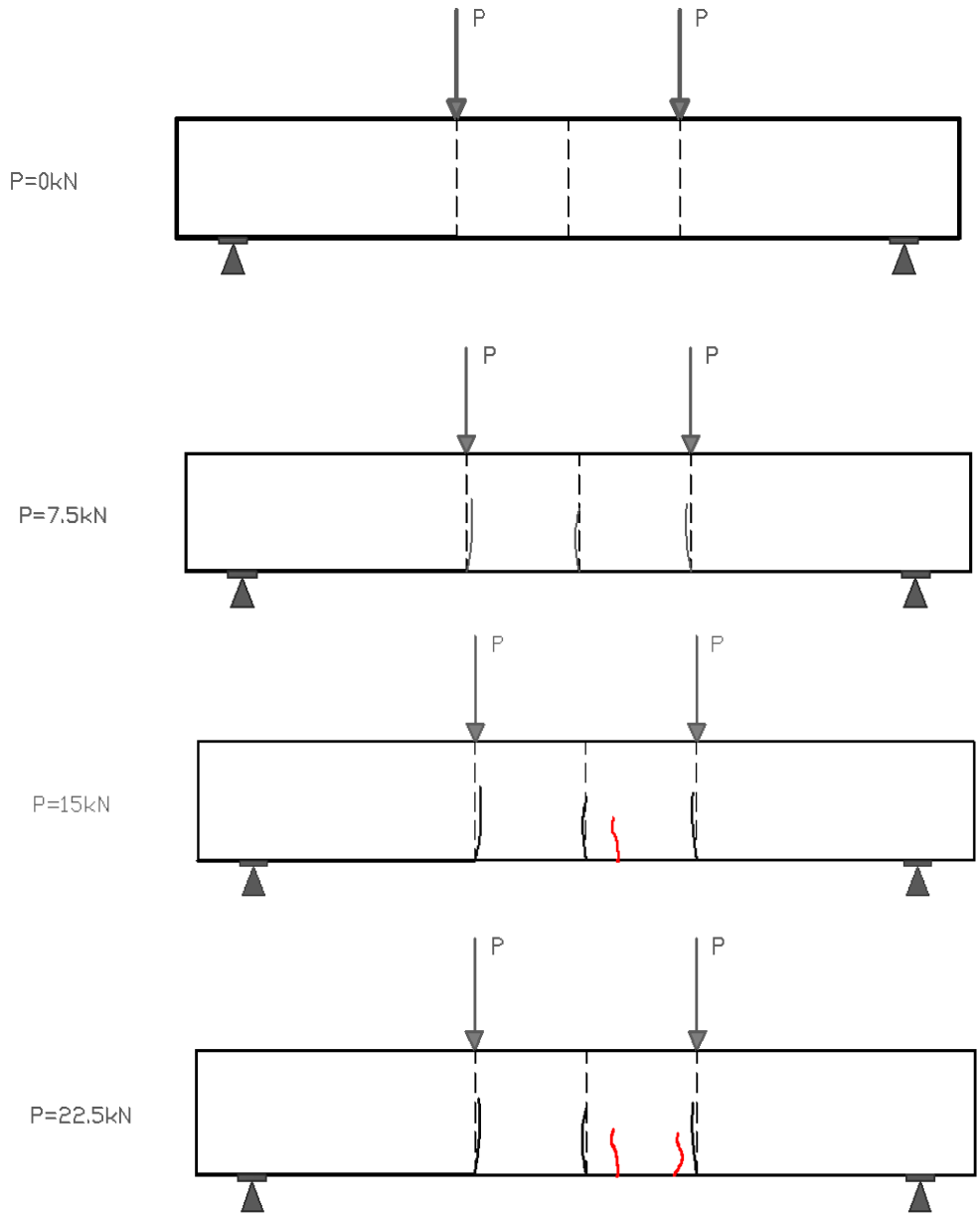
kN \ mm	a	b	c	d
25	**0.2**	**0.1**	**0.1**	**0.4**
35	**0.5**	**0.3**	**0.2**	**0.5**
55	**0.6**	**0.7**	**0.6**	**0.7**
70	**0.8**	**1**	**1**	**1.1**

Δοκιμή Δοκού με Οπλισμό CFRP

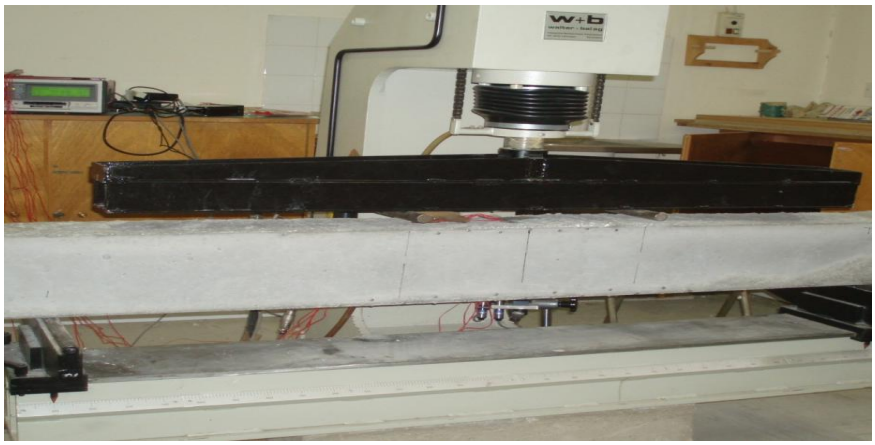
Η πειραματική δοκός με οπλισμό CFRP φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Κατά τη δοκιμή, όταν το εξωτερικό φορτίο P πάρει την τιμή P=7.5 kN, δημιουργούνται οι τρεις πρώτες καμπτικές ρωγμές στη δοκό και για τις οποίες καταγράφονται οι τιμές του εύρους και του μήκους τους. Οι δύο ρωγμές αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς τον άξονα συμμετρίας της δοκού και στα όρια της περιοχής καθαρής κάμψης, δηλαδή κάτω από τα σημεία επιβολής των εξωτερικών δυνάμεων. Η τρίτη ρωγμή δημιουργείται στον άξονα συμμετρίας της δοκού. Στα 15 kN δημιουργήθηκε μία ακόμα ρωγμή, που βρισκόταν στην περιοχή της καθαρής κάμψης. Επίσης, μία τέταρτη ρωγμή δημιουργήθηκε στη στάθμη των 22.5 kN, στην ίδια περιοχή της δοκού. Παράλληλα, με κάθε διακοπή της φόρτισης, μετριόταν το εύρος και το μήκος των νέων ρωγμών καθώς και η εξέλιξη των ήδη υπαρχουσών ρωγμών. Επίσης, μετρήσεις των έγιναν στα 32.5 kN και στα 37.5kN. Στο φορτίο αυτό διακόπηκε για τελευταία φορά η φόρτιση της δοκού για να καταγραφεί η εξέλιξη των ρωγμών, αφού η βύθιση της δοκού ήταν αρκετά μεγάλη και προμηνυόταν πιθανή αστοχία της. Το πειραματικό δοκίμιο αστόχησε στα 50 kN. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά τα 22.5 kN δεν παρατηρήθηκαν νέες ρωγμές στη δοκό.

Στο Σχήμα 3-9 δείχνεται σχηματικά η εξέλιξη ρηγμάτωσης της δοκού για τα διάφορα επίπεδα φόρτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

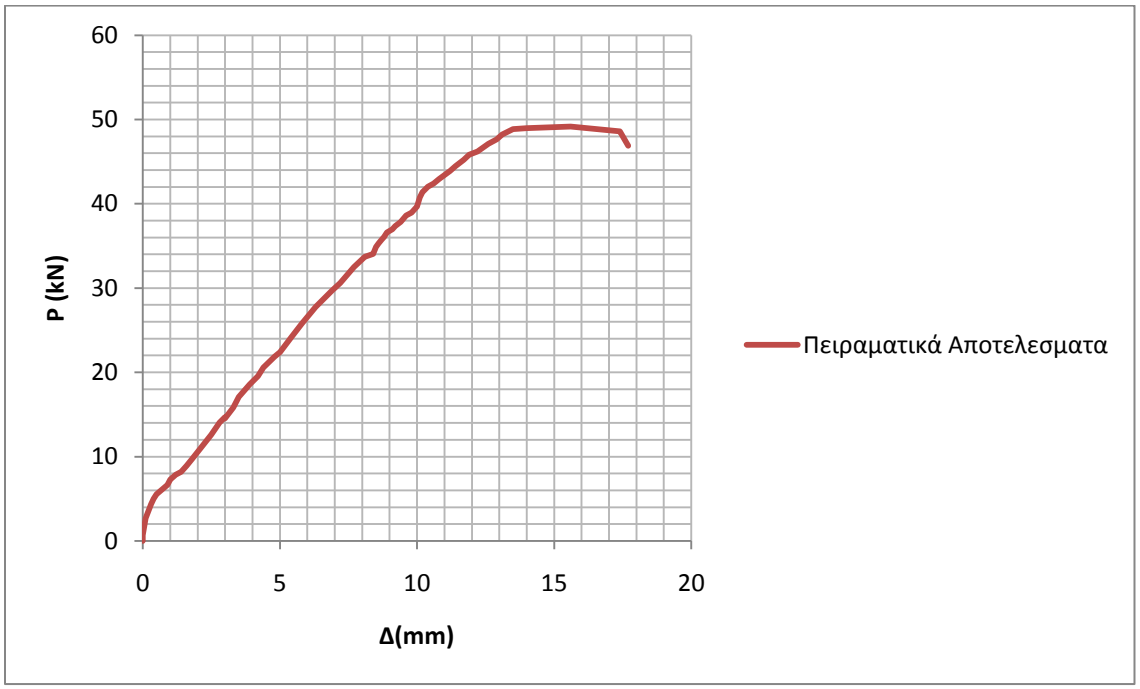
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις για τη βύθιση του πειραματικού δοκιμίου στις διάφορες τιμές του φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 3-7. Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει το διάγραμμα Φορτίο (P)-Βύθιση (Δ) της δοκού με οπλισμό CFRP 12.7 του Σχήματος 3-10.



Σχήμα 3-9 Εξέλιξη της καμπτικής ρηγμάτωσης της δοκού



Σχήμα 3-10 Η πειραματική δοκός CFRP πριν την έναρξη της δοκιμής (P=0)

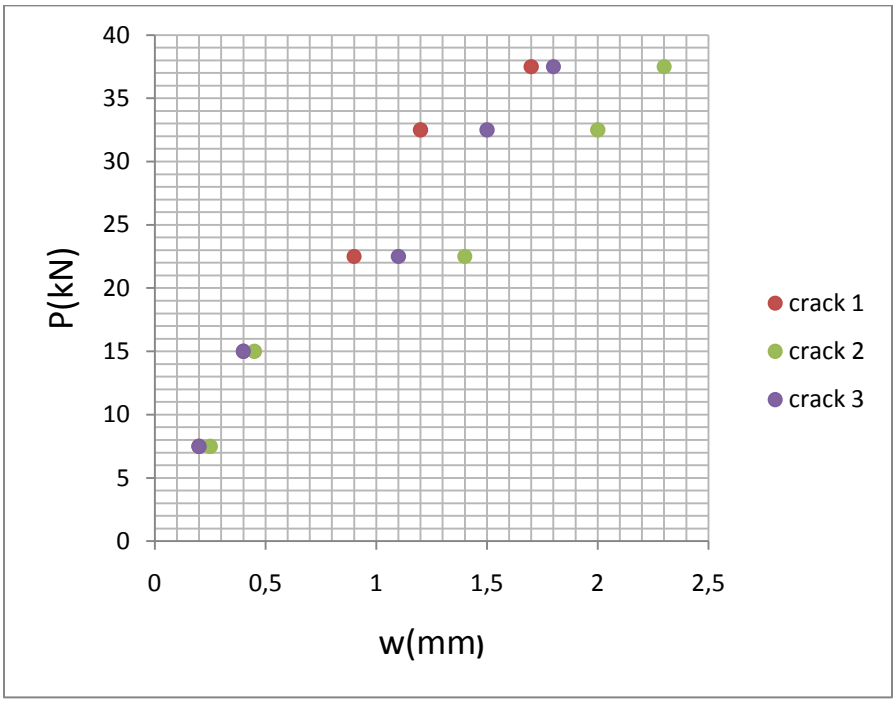


Σχήμα 3-11 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης της πειραματικής δοκού με οπλισμό CFRP 12.7

Πίνακας 3-7 Πειραματικά αποτελέσματα Φορτίου-Βύθισης της πειραματικής δοκού με οπλισμό CFRP 12.7

Πειραματικά Αποτελέσματα			
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Βύθιση (mm)**
0	**0**	**34.05**	**8.4**
0.665	**0**	**34.9**	**8.5**
2.68	**0.1**	**35.31**	**8.6**
4.355	**0.3**	**35.71**	**8.7**
5.01	**0.4**	**36.05**	**8.8**
5.525	**0.5**	**36.585**	**8.9**
6.63	**0.9**	**36.965**	**9.1**
7.27	**1**	**37.345**	**9.2**
7.87	**1.2**	**37.855**	**9.4**
8.215	**1.4**	**38.59**	**9.6**
8.92	**1.6**	**38.945**	**9.8**
9.7	**1.8**	**39.665**	**10**
12.61	**2.5**	**40.77**	**10.1**
14.04	**2.8**	**41.375**	**10.2**
14.705	**3**	**42.04**	**10.4**
14.545	**3**	**42.42**	**10.6**
15.84	**3.3**	**42.945**	**10.8**
17.07	**3.5**	**43.9**	**11.2**
18.565	**3.9**	**44.445**	**11.4**
19.54	**4.2**	**45.215**	**11.7**
20.575	**4.4**	**45.815**	**11.9**
21.855	**4.8**	**46.185**	**12.2**
22.405	**5**	**47.12**	**12.6**
24.12	**5.4**	**47.66**	**12.9**
25.76	**5.8**	**48.22**	**13.1**
27.735	**6.3**	**48.865**	**13.5**
29.715	**6.9**	**48.975**	**14**
30.615	**7.2**	**49.18**	**15.6**
32.485	**7.7**	**48.59**	**17.4**
33.705	**8.1**	**46.885**	**17.7**

Στο Σχήμα 3-12 δείχνεται σχηματικά η μεταβολή του εύρους των ρωγμών του πειραματικού δοκιμίου συναρτήσει των τιμών του φορτίου P



Σχήμα 3-12 Διάγραμμα Φορτίου-Εύρους ρωγμών για τις ρωγμές της δοκού CFRP 12.7

Τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις, σχετικά το εύρος των ρωγμών κατά τη διάρκεια της φόρτισης, συνοψίζονται στον Πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-8:Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών της δοκού CFRP 12.7

mm / kN	a	b	c
7.5	0.2	0.25	0.2
15	0.4	0.45	0.4
22.5	0.9	1.4	1.1
32.5	1.2	2	1.5
37.5	1.7	2.3	1.8

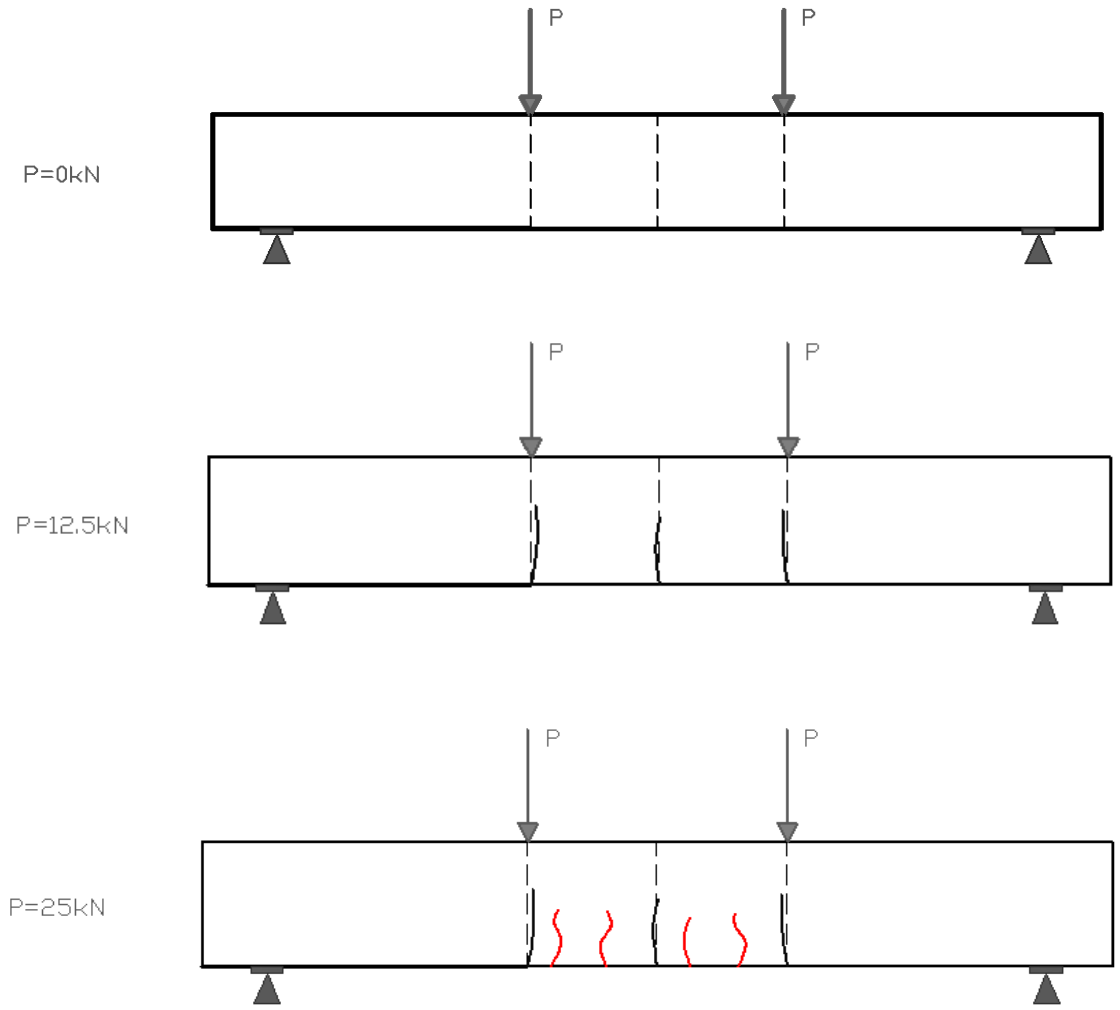
Δοκιμή Δοκού με Οπλισμό Από Χάλυβα

Στη δοκιμή αυτή, η δοκός που χρησιμοποιήθηκε είχε τις ίδιες διαστάσεις με αυτές των δύο προηγούμενων δοκιμών και είχε οπλιστεί με δύο ράβδους από χάλυβα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ανάλογη με αυτές των δοκιμών των δοκών με οπλισμό FRP. Στα 12.5 kN δημιουργήθηκαν οι τρεις πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο. Οι δύο εμφανίστηκαν κάτω από τα σημεία επιβολής των εξωτερικών δυνάμεων, ενώ η τρίτη στο μέσο της πειραματικής δοκού. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε η δημιουργία τεσσάρων νέων ρωγμών όταν το φορτίο P έφτασε στα 15 kN, ενώ παράλληλα από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν, διαπιστώθηκε αύξηση του μήκους και του εύρους των ήδη υπαρχουσών. Οι νέες ρωγμές ήταν ανά δύο συμμετρικές ως προς τον άξονα συμμετρίας της δοκού. Διακοπή της αύξησης του φορτίου πραγματοποιήθηκε στα 25 kN και στα 32.5 kN προκειμένου να καταγραφεί η εξέλιξη των ρωγμών. Για τις στάθμες αυτές του φορτίου δεν δημιουργήθηκαν νέες ρωγμές. Η αστοχία του δοκιμίου συνέβη στα 46 kN περίπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι ρωγμές εκτείνονταν ως τα όρια της θλιβόμενης ζώνης της δοκού καθώς επίσης και το ότι ήταν κατακόρυφες, δηλαδή, κάθετες στην διεύθυνση των κύριων εφελκυστικών τάσεων, που αναπτύσσονταν στο τμήμα καθαρής κάμψης της δοκού.

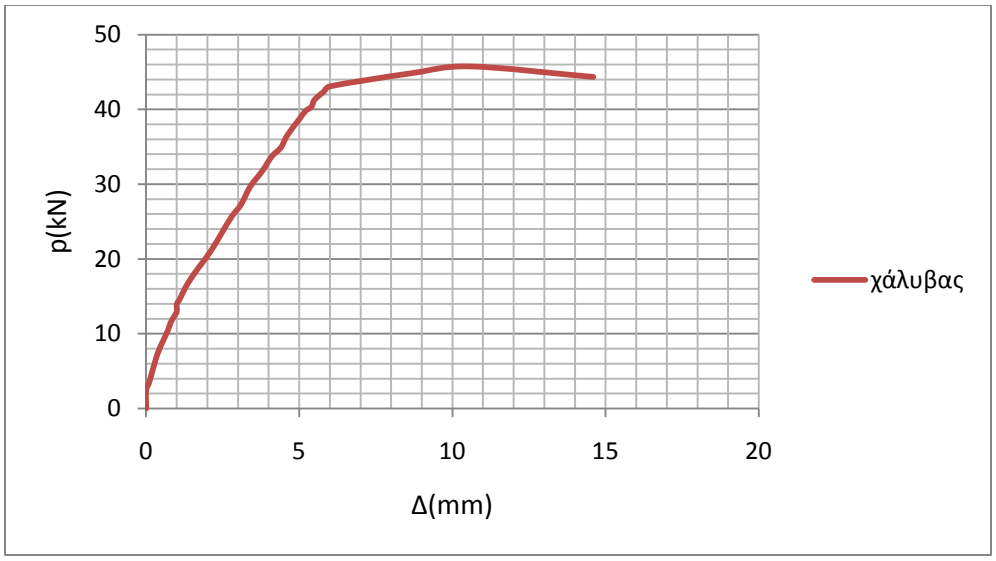
Η εξέλιξη της ρηγμάτωσης της πειραματικής δοκού με οπλισμό από χάλυβα κατά τη διάρκεια της τρίτης δοκιμής παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3-13.

Ο Πίνακας 3-9 συντίθεται από τις τιμές της κατακόρυφης μετατόπισης του δοκιμίου για τις διάφορα επίπεδα φόρτισης.

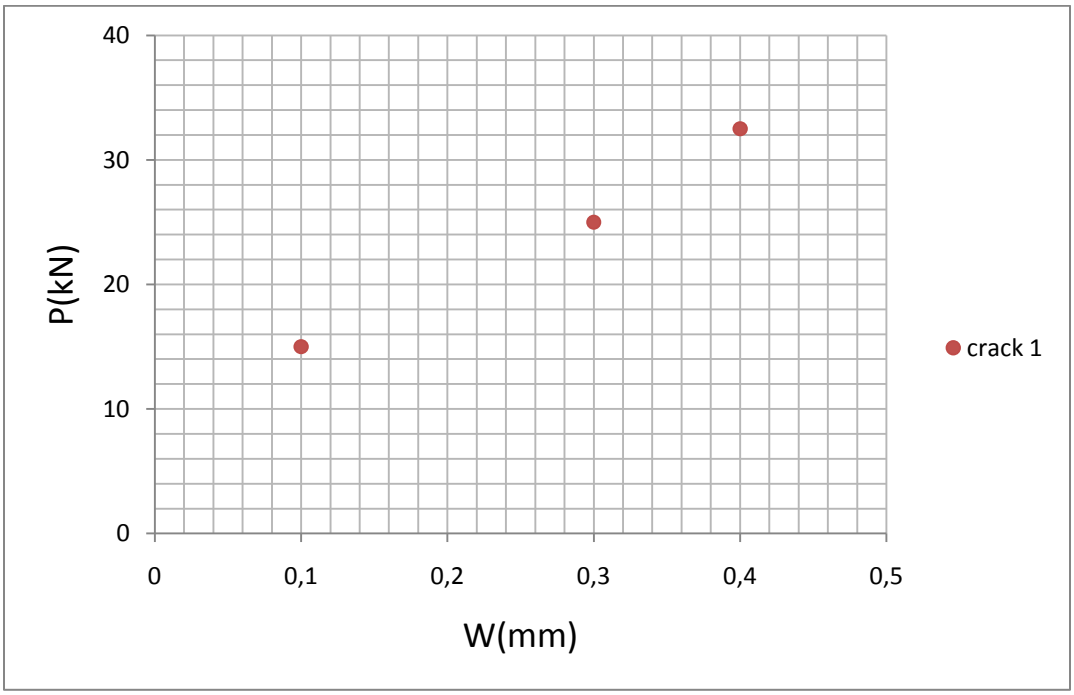
Από τα στοιχεία του πίνακα αυτού προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 3-14 στο οποίο δείχνεται η καμπύλη φορτίου (P)-βύθισης (Δ) για το πειραματικό δοκίμιο με οπλισμό από χάλυβα



Σχήμα 3-13 Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών της δοκού με οπλισμό από χάλυβα με την αύξηση του φορτίου.



Σχήμα 3-14 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης για το πειραματικό δοκίμιο με οπλισμό από χάλυβα S-12



Σχήμα 3-15 Διάγραμμα Φορτίου-Εύρους ρωγμών (μέσος όρος) για την πειραματική δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Στο Σχήμα 3-15 παρουσιάζεται σχηματικά η εξέλιξη του μέσου όρου του εύρους των κύριων ρωγμών του δοκιμίου με την αύξηση του εξωτερικού φορτίου P.

Πίνακας 3-9 Πειραματικά αποτελέσματα Φορτίου-Βύθισης της πειραματικής δοκού με οπλισμό από χάλυβα

Πειραματικά αποτελέσματα			
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Βύθιση (mm)**
0	**0**	**27.285**	**3.1**
0.275	**0**	**29.665**	**3.4**
2.44	**0**	**31.79**	**3.8**
3.465	**0.1**	**33.685**	**4.1**
4.965	**0.2**	**34.885**	**4.4**
7.625	**0.4**	**36.47**	**4.6**
10.35	**0.7**	**38.675**	**5**
11.48	**0.8**	**39.745**	**5.2**
12.21	**0.9**	**40.355**	**5.4**
12.985	**1**	**41.28**	**5.5**
13.955	**1**	**42.35**	**5.8**
14.64	**1.1**	**43.065**	**6**
16.3	**1.3**	**44.84**	**8.7**
18.195	**1.6**	**45.725**	**10.6**
20.975	**2.1**	**44.32**	**14.6**
23.69	**2.5**	**42.28**	**22**

3.3.3 Το βέλος κάμψης, το εύρος των καμπτικών ρωγμών και η καμπτική αντοχή της δοκού

Στο Σχήμα 3-16, παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες ροπών-καμπυλοτήτων των δοκών με οπλισμό *GFRP, CFRP* και χάλυβα, που έχουν το ίδιο ποσοστό οπλισμού. Οι τρεις δοκοί έχουν την ίδια γεωμετρία και την ίδια ποιότητα σκυροδέματος, και συνεπώς, επιδεικνύουν την ίδια, σχεδόν, τιμή της ροπής ρηγμάτωσης. Επίσης, για την ίδια ροπή

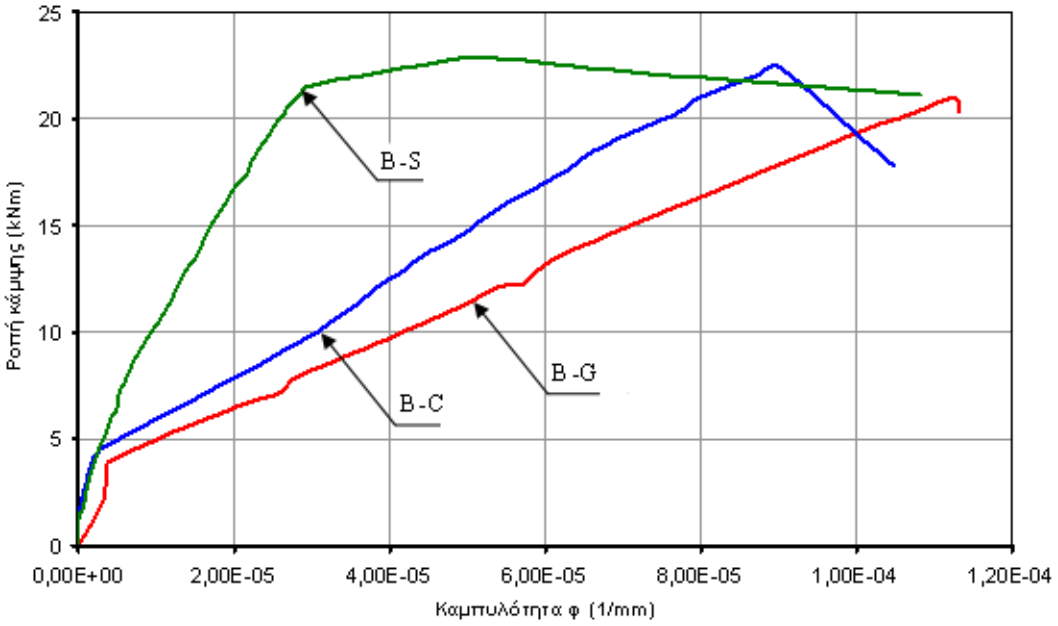
Μ, η δοκός με οπλισμό *GFRP* εμφανίζει την μεγαλύτερη καμπυλότητα επειδή διαθέτει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες αυτές καταγράφηκαν ψηφιακά για όλη την ιστορία φόρτισης των δοκών, δηλαδή από την έναρξη της φόρτισης μέχρι την τελική αστοχία τους. Σημειώνεται επίσης ότι η αστοχία όλων των πειραματικών δοκών συνέβη από τον θρυμματισμό του σκυροδέματος, που εκδηλωνόταν με τον διαχωρισμό της θλιβόμενης ζώνης από την δοκό και συνοδευόταν με έντονη παρουσία οριζόντιων ρωγμών. Όλες οι δοκοί είχαν σχεδιασθεί με την ίδια γεωμετρία, με τη ίδια ποιότητα σκυροδέματος, με την ίδια διάμετρο ράβδων οπλισμού και διέφεραν μόνο ως προς το υλικό. Προκειμένου οι δοκοί να αστοχήσουν από θρυμματισμό σκυροδέματος, το ποσοστό οπλισμού που είχε τεθεί ξεπερνούσε το ποσοστό οπλισμού που αντιστοιχούσε στην ισόρροπη διατομή. Οι καμπύλες Ρ-Δ που καταγράφηκαν πειραματικά μετασχηματίσθηκαν σε καμπύλες ροπών-καμπυλοτήτων Μ-φ μέσω των σχέσεων

$$M = Pa\,,\quad \phi = \frac{24}{3L^2 - 4a^2}\Delta \tag{3.1}$$

όπου τα γεωμετρικά μεγέθη α, L αναφέρονται στα στοιχεία που σημειώνονται στη δοκό του Σχήματος 3-1 ($\alpha = 0.50\,\mathrm{m}$, $\mathrm{L} = 1.44\,\mathrm{m}$).

Οι καμπύλες $\mathrm{M} - \varphi$, παρουσιάζουν τρία διακριτά τμήματα. Το πρώτο τμήμα αντιστοιχεί στο μη ρηγματωμένο στάδιο της δοκού (Στάδιο Ι), είναι σχετικά μικρό και μπορεί να προσεγγισθεί γραμμικά. Το δεύτερο τμήμα αντιστοιχεί στο ρηγματωμένο στάδιο της δοκού (Στάδιο ΙΙ) είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πρώτο τμήμα, και γενικά είναι ένα καμπύλο τμήμα με τα κοίλα προς τα πάνω. Στις καμπύλες των δοκών με οπλισμό FRP, που αποκτήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής έρευνας, το τμήμα αυτό προκύπτει σχεδόν γραμμικά. Η κλίση του τμήματος αυτού είναι μικρότερη από την

σταθερή κλίση του πρώτου τμήματος. Το τρίτο τμήμα της καμπύλης αντιστοιχεί στο στάδιο εκείνο της δοκού, όπου το σκυρόδεμα έχει εμφανίσει έντονες μη γραμμικές παραμορφώσεις στην θλιβόμενη περιοχή που συνοδεύονται με αντίστοιχες μεγάλες διαμήκεις εφελκυστικές παραμορφώσεις. Το γεγονός αυτό αντιστοιχεί σε μεγάλες καμπυλότητες των διατομών της δοκού για μικρές μεταβολές της ροπής. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί στην περιοχή, όπου επίκειται ο θρυμματισμός του σκυροδέματος, με την ροπή να παίρνει την μέγιστη τιμή της. Όταν η ροπή ξεπεράσει την μέγιστη τιμή της, εμφανίζεται ένας κατερχόμενος κλάδος, που αντιστοιχεί σε μια ασταθή κατάσταση της δοκού.



Σχήμα 3-16 Πειραματικές καμπύλες ροπής-καμπυλότητας σε δοκούς με ίσο ποσοστό οπλισμού για ράβδους οπλισμού από χάλυβα, GFRP και CFRP ίδιας διαμέτρου.

Οι μετρήσεις του εύρους των καμπτικών ρωγμών, που σχηματίσθηκαν στις πειραματικές δοκούς έγιναν στις καμπτικές ρωγμές που σχηματίσθηκαν στο μέσο των δοκών, και αφορούν το εύρος των ρωγμών στην κάτω εξωτερική επιφάνεια των δοκών.

Όπως προαναφέρθηκε, οι τρεις δοκοί είχαν σχεδιασθεί να αστοχήσουν από θρυμματισμό σκυροδέματος, γεγονός που επιβεβαιώθηκε πειραματικά για όλες τις δοκούς. Από τα διαγράμματα $M-\phi$, προσδιορίζεται η μέγιστη ροπή που μπορεί να καταπονήσει την δοκό. Η ροπή αυτή αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο που επιφέρει τον θρυμματισμό του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης της δοκού και έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη κατάρρευση της δοκού. Οι πειραματικές τιμές που καταγράφηκαν για τις τρεις δοκιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

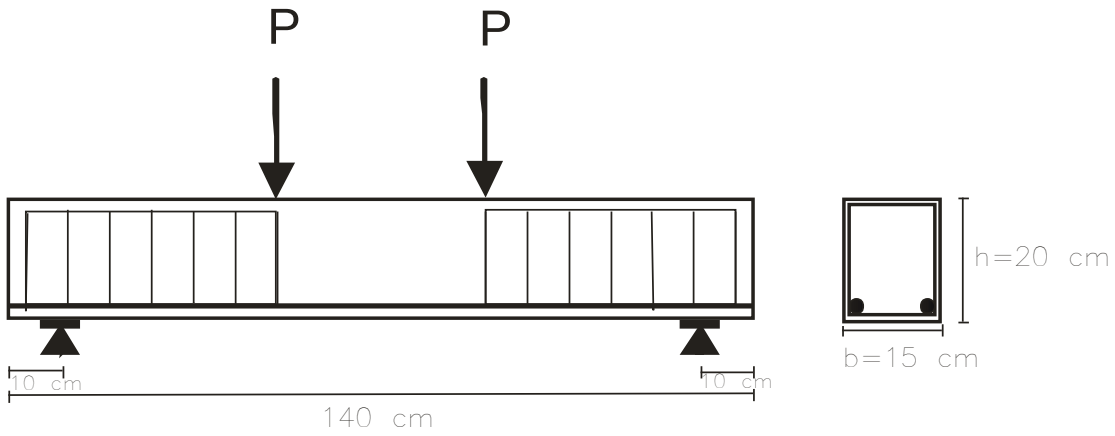
Στο κεφάλαιο αυτό, οι δοκοί που εξετάσθηκαν πειραματικά προηγούμενα αναλύονται με πεπερασμένα στοιχεία. Ο σκοπός της ανάλυσης που γίνεται είναι να εκτιμηθούν οι παραδοχές που υιοθετούνται στην περιγραφή της καμπτικής συμπεριφοράς δοκών σκυροδέματος με οπλισμό FRP, και αφορούν τη γεωμετρία της δοκού, τον νόμο συμπεριφορας του σκυροδέματος και το νόμο συμπεριφοράς της διεπιφάνειας. Η ανάλυση γίνεται με το λογισμικό εμπορικό πρόγραμμα ANSYS, είναι τρισδιάστατη, και λαμβάνει υπόψιν την εμφάνιση των ρωγμών στις δοκους.

4.2 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ

4.2.1 Προσομοίωση της γεωμετρίας και των φορτίων των δοκών

Οι δοκοί προσομοιώνονται ως τρισδιάστατα παραμορφώσιμα στερεά σώματα που αποτελούνται από δύο διακριτές φάσεις και έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες: το

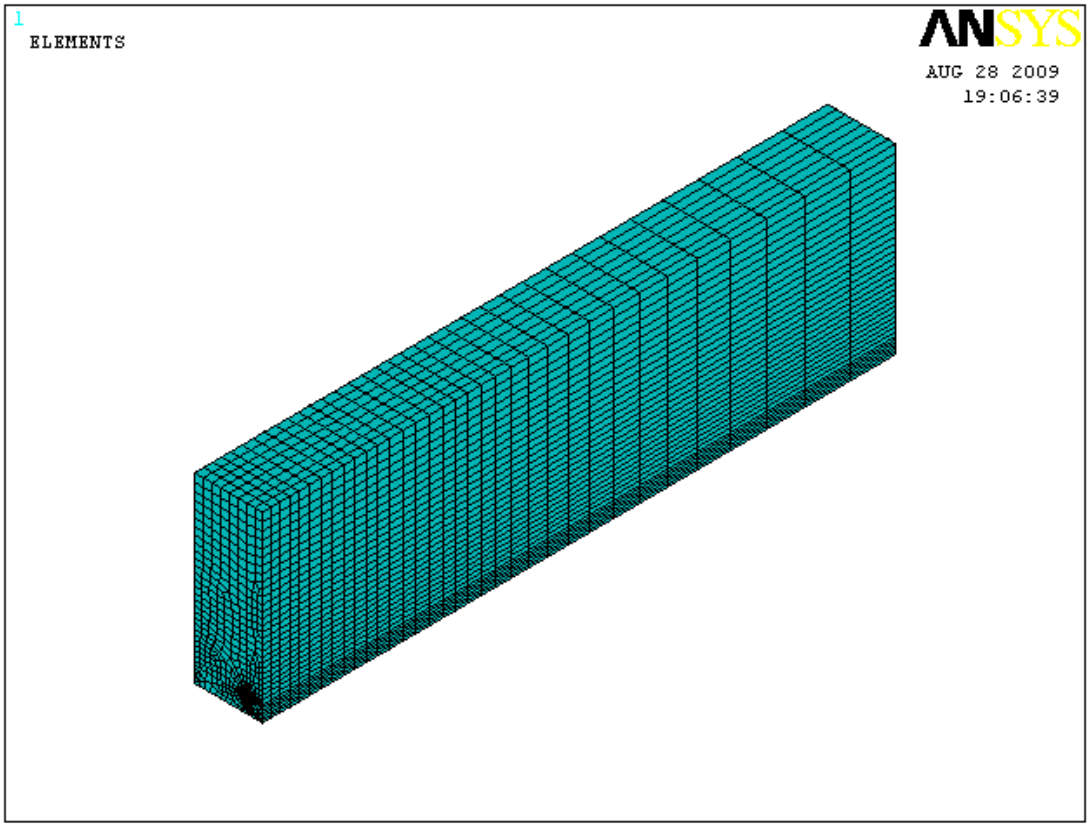
σκυρόδεμα και τον οπλισμό FRP. Οι διαστάσεις των δοκών που προσομοιώνονται είναι αυτές που δείχνονται στο Σχήμα 4-1 και αντιπροσωπεύουν τις πειραματικές δοκούς.



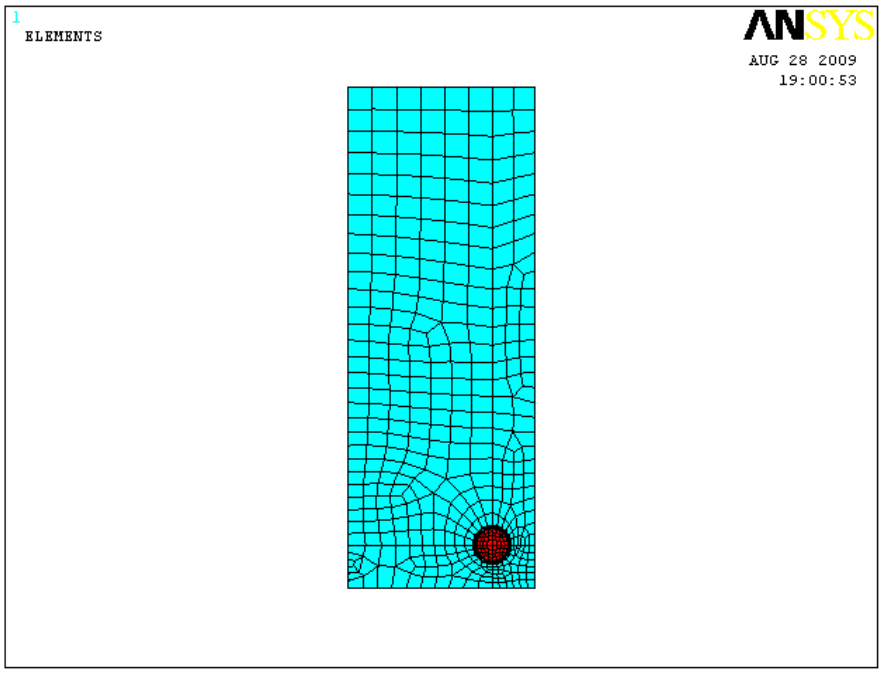
Σχήμα 4-1 Η γεωμετρία των πειραματικών δοκών

Στην ανάλυση που γίνεται δεν λαμβάνεται υπόψιν ο διατμητικός οπλισμός της δοκού, παίρνεται υπόψη, μόνο, ο διαμήκης οπλισμός FRP. Σε κάθε δοκό ο οπλισμός αυτός αποτελείται από δύο ράβδους, που είναι τοποθετημένες σε απόσταση 1.5 cm από την κάτω επιφάνεια των δοκών. Η προσομοίωση του σκυροδέματος γίνεται και για τις δύο διαφορετικές παραμορφωσιακές καταστάσεις των πειραματικών δοκών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στη μη ρηγματωμένη κατάσταση (Στάδιο I), το σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ένα συνεχές μέσο με γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Όταν η μέγιστη τάση στο σκυρόδεμα πλησιάσει τη τιμή $f_{ct} = 2.9\,\text{MPa}$, εμφανίζονται οι καμπτικές ρωγμές στη δοκό. Στην ανάλυση που θα γίνει, σε κάθε δοκό, θα θεωρηθεί ο αριθμός των ρωγμών που εμφανίζονται στις πειραματικές δοκούς κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε μια μέση απόσταση ρωγμών ίση με 10 cm. Στο μοντέλο πειραματικών στοιχείων που θα θεωρηθεί, οι ρωγμές θα προσομοιωθούν ως επίπεδες επιφάνειες ασυνέχειας του υλικού, κάθετες στο άξονα της δοκού, που θα ξεκινουν από την κάτω επιφάνεια και θα τερματίζουν στην θλιβόμενη ζωνη της δοκού. Τα φορτία, που θα θεωρηθούν, θα είναι δύο ίσα συγκεντρωμένα φορτία, που θα εξασκούνται σε απόσταση 50 cm από τα στηρίγματα και θα αυξάνονται μονότονα μέχρι την τελική αστοχία της δοκού.

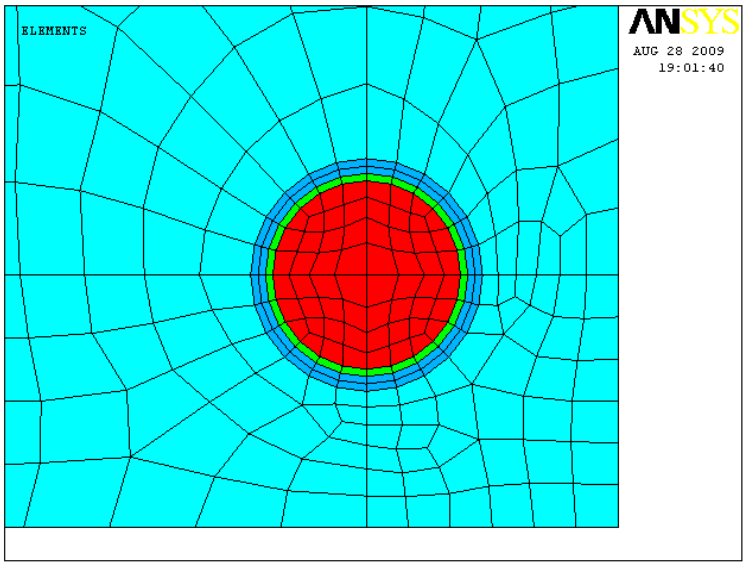
Ο κάναβος της δοκού δείχνεται στο Σχήμα 4.2. Λόγω της συμμετρίας στη γεωμετρία και στη φόρτιση προσομοιώνεται μόνο το ¼ της πειραματικής δοκού, χρησιμοποιώντας το τρισδιάστατο στοιχείο SOLID 45 του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 4-3 δείχνεται μια λεπτομέρεια του κανάβου σε ενδιάμεση διατομή της δοκού όπου επικρατεί καθαρή κάμψη, και στο Σχήμα 4-4 μια λεπτομέρεια του κανάβου κοντά στον οπλισμό FRP.



Σχήμα 4-2 Ο κάναβος των πειραματικών δοκών



Σχήμα 4-3 Ο κάναβος στη διατομή των δοκών στην περιοχή της καθαρής κάμψης (προσομοίωση του ½ της διατομής)



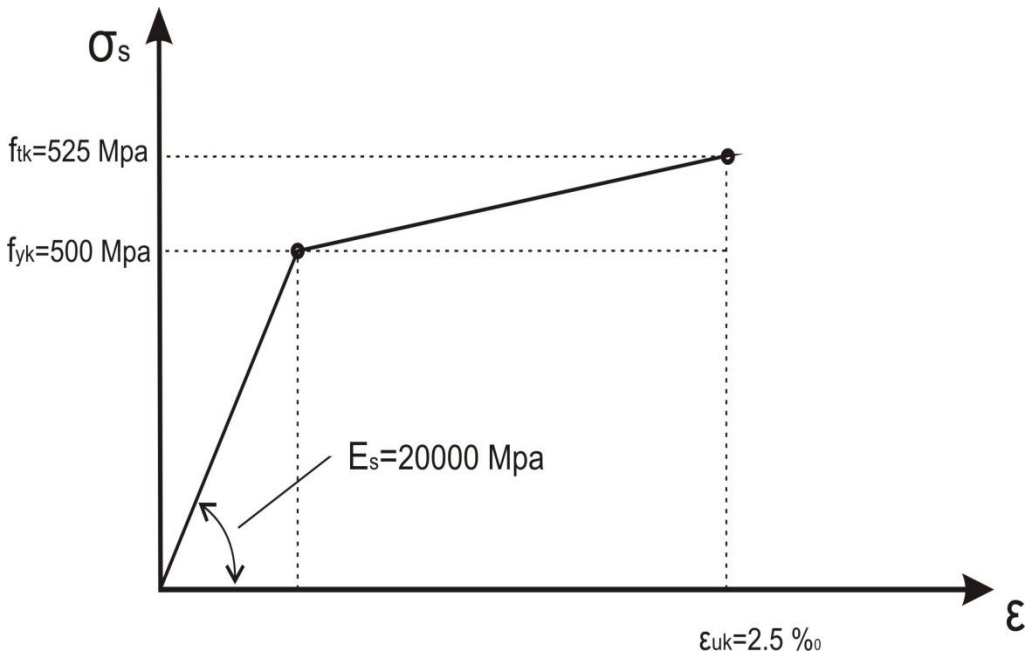
Σχήμα 4-4 Λεπτομέρεια κανάβου σε διατομή στην περιοχή οπλισμού

Στην τελευταία λεπτομέρεια φαίνεται η προσομοίωση που έχει γίνει, για τη σύνδεση των δύο υλικών που είναι μια ελαστική στρώση με κατάλληλο πάχος και συμπεριφορά, προκειμένου να περιγράψει τον μη γραμμικό καταστατικό νόμο της σύνδεσης.

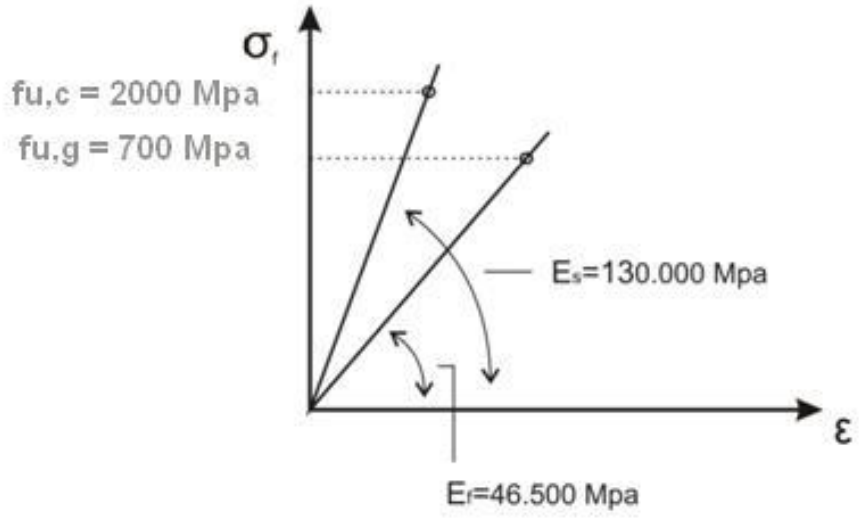
4.2.2 Προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και της διεπιφανειακής συμπεριφοράς της σύνδεσης

Οι ράβδοι FRP προσομοιώνονται ως δύο κυλινδρικά στοιχεία κυκλικής διατομής διαμέτρου 12.7 mm με γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Το μέτρο ελαστικότητας που θεωρείται στην ανάλυση είναι $E_f = 46700\,\text{MPa}$ για τις ράβδους GFRP και $E_f = 130000$ MPa για τις ράβδους CFRP. Οι εφελκυστικές αντοχές για της ράβδους FRP λαμβάνονται ίσες με 2000 MPa για το CFRP και 700 MPa για το GFRP. Οι ράβδοι οπλισμού από χάλυβα προσομοιώνονται ως κυλινδρικά στοιχεία με ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Ο ελαστικός κλάδος αντιστοιχεί σε ένα μέτρο ελαστικότητας $E_s = 200000\,\text{MPa}$ και σε μια τάση διαρροής ίση με $f_y = 500\,\text{MPa}$. Η κλίση του πλαστικού κλάδου του διαγράμματος σ-ε λαμβάνεται να αντιστοιχεί στην τιμή εφελκυστικής τάσεως $f_{tk} = 525\ \text{MP}a\ (= 1.05 f_{yk} = 1.05 \times 500)$ και στην τιμή παραμόρφωσης $\varepsilon_{uk} = 25‰$.

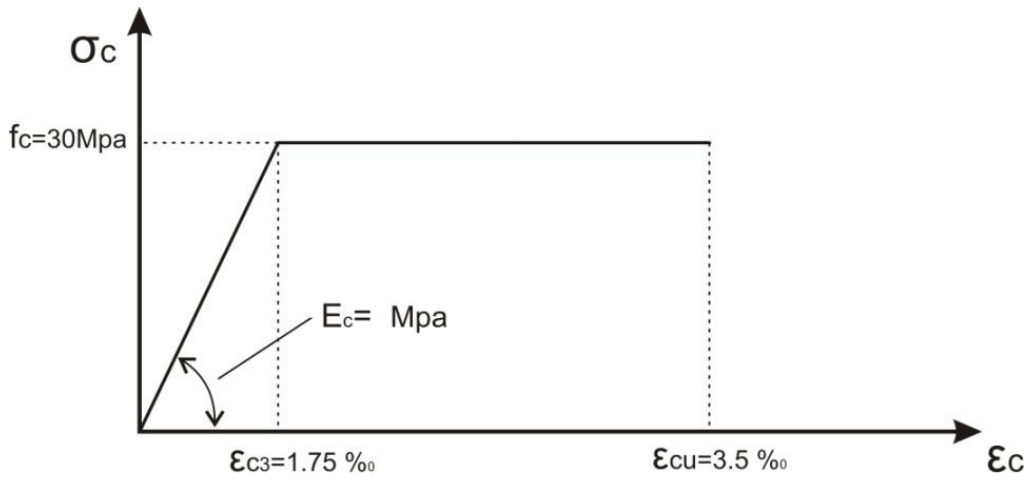
Η συμπεριφορά του σκυροδέματος προσομοιώνεται με ένα γραμμικό ελαστικό κλάδο στον εφελκυσμό, και ως ελαστοπλαστική στη θλίψη. Στην περίπτωση του εφελκυσμού, η τάση στο σκυρόδεμα μπορεί να αυξηθεί μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή $f_{ct} = 2.9\,\text{MPa}$, ενώ πέρα από αυτήν την τιμή η τάση στο σκυρόδεμα μηδενίζεται. Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος προσομοιώνεται με το διγραμμικό διάγραμμα που δείχνεται στο Σχήμα 4-5. Η συμπεριφορά αυτή προτείνεται από τον EC2, ως μία εναλλακτική μορφή του παραβολικού-ορθογωνικού διαγράμματος. Ο οριζόντιος κλάδος στο διάγραμμα αυτό, θεωρείται ότι έχει μια μικρή κλίση ως προς τον άξονα των παραμορφώσεων για να μη δυσχεραίνεται η αριθμητική ανάλυση που θα γίνει.



Σχήμα 4-5 Η προσομοίωση της εφελκυστικής συμπεριφορας των ράβδων χάλυβα στη δοκό BS



Σχήμα 4-6 Η προσομοίωση της εφελκυστικής συμπεριφοράς των ράβδων οπλισμού FRP στη δοκό



Σχήμα 4-7 Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος

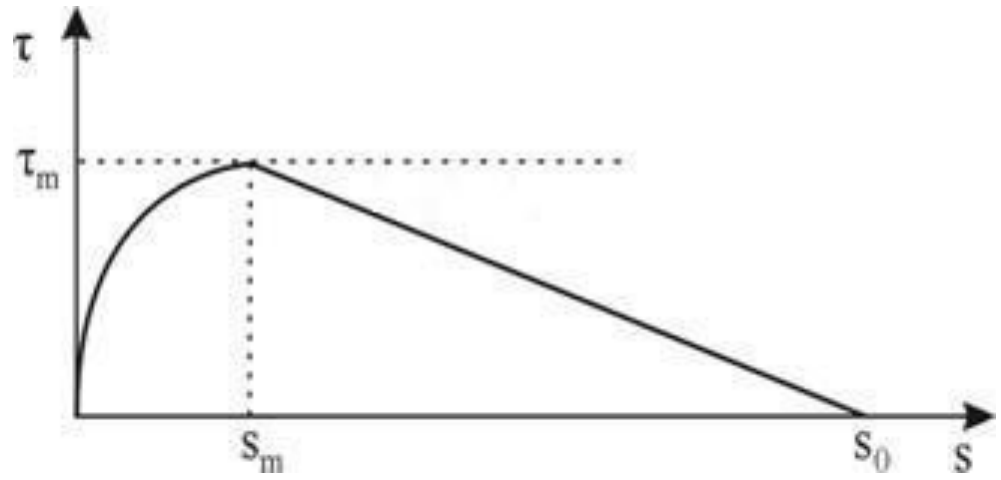
Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας, η σύνδεση των δύο υλικών της δοκού θεωρείται ότι είναι ελατηριακή που περιγράφεται με τον μη γραμμικό νόμο των Eligehausen-Bertero-Popov που δείχνεται στο Σχήμα 4-7. Ο νόμος αυτός μαθηματικά εκφράζεται με την σχέση

$$\tau = \begin{cases} \tau_m \left(\dfrac{s}{s_m} \right)^a, \text{ότανν } 0 \le s \le s_{\max} \\ \tau_m \left[1 + p - p \dfrac{s}{s_m} \right], \text{ότανν } s_{\max} \le s \le s_0 \end{cases}$$

Στην ανάλυση η προσέγγιση του νόμου αυτού γίνεται θεωρώντας την διεπιφάνεια ως μια τρίτη φάση πάχους t_{int} με τον ακόλουθο καταστατικό νόμο

$$\tau = \begin{cases} \tau_m \left[\dfrac{t_{\text{int}}}{s_m} \right]^\alpha \gamma^\alpha \quad \text{αν} \quad s = \gamma t_{\text{int}} \le \text{s}_\text{m} \\ \tau_m \left[1 + p - p \dfrac{\gamma t_{\text{int}}}{s_m} \right] \quad \text{αν} \quad \text{s}_\text{m} \le s = \gamma t_{\text{int}} \le \text{s}_0 \\ 0 \quad \text{αν} \quad \text{s} > \text{s}_0 \end{cases}$$

όπου γ είναι η γωνιακή παραμόρφωση. Οι τιμές t_{int} και γ επιλέγονται καταλλήλως όταν δίνονται οι πειραματικές τιμές $p, a, \tau_{\max}, s_o, s_{\max}$ που υπεισέρχονται στη σχέση αυτή.



Σχήμα 4-8 Ο νόμος συνάφειας ολίσθησης

Στο μοντέλο της δοκού οι ρωγμές λαμβάνονται ως ασυνέχειες της δοκού στις θέσεις εκείνες που εμφανίζονται στις δοκιμές και ενεργοποιούνται στη συγκεκριμένη τιμή του φορτίου που εμφανίζονται στο πείραμα. Το ίδιο ισχύει και για το μήκος των ρωγμών. Λόγω μη γραμμικότητας στη συμπεριφοράς, η φόρτιση των δοκών γίνεται βηματικά, με βήμα φόρτισης 1 kN. Σε κάθε βήμα φόρτισης υπολογίζεται, τόσο το βέλος κάμψης της δοκού, όσο και το μέγιστο άνοιγμα κάθε ρωγμής.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΣΤΗ ΜΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ΣΤΑΔΙΟ Ι)

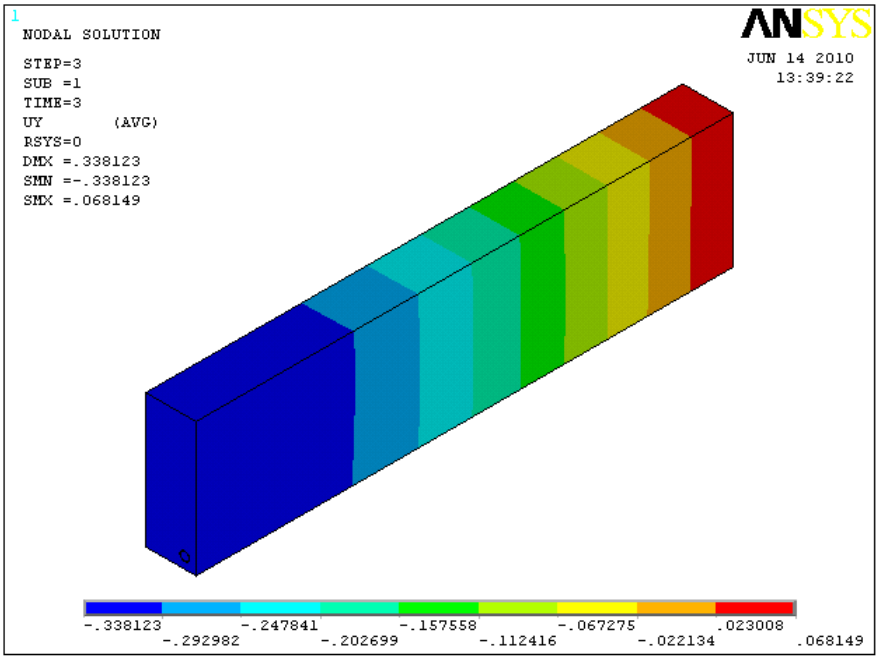
4.3.1 Ο σκοπός της ανάλυσης

Οι πειραματικές δοκοί, μέχρι μια συγκεκριμένη στάθμη του επιβαλλόμενου εξωτερικού φορτίου P_{cr}, βρίσκονταν στο Στάδιο Ι, δηλαδή στη μη ρηγματωμένη κατάσταση. Στο στάδιο αυτό, η δοκός συμπεριφέρεται ως γραμμικό ελαστικό μέσο και η ανάλυση της μπορεί να γίνει με τις γνωστές μεθόδους της αντοχής υλικών. Στην ενότητα αυτή θα γίνει ανάλυση των πειραματικών δοκών με πεπερασμένα στοιχεία θεωρώντας την τρισδιάστατη φύση του προβλήματος, υποθέτοντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά, τόσο του σκυροδέματος, όσο και του οπλισμού FRP. Ο σκοπός της τρισδιάστατης αυτής ανάλυσης είναι:

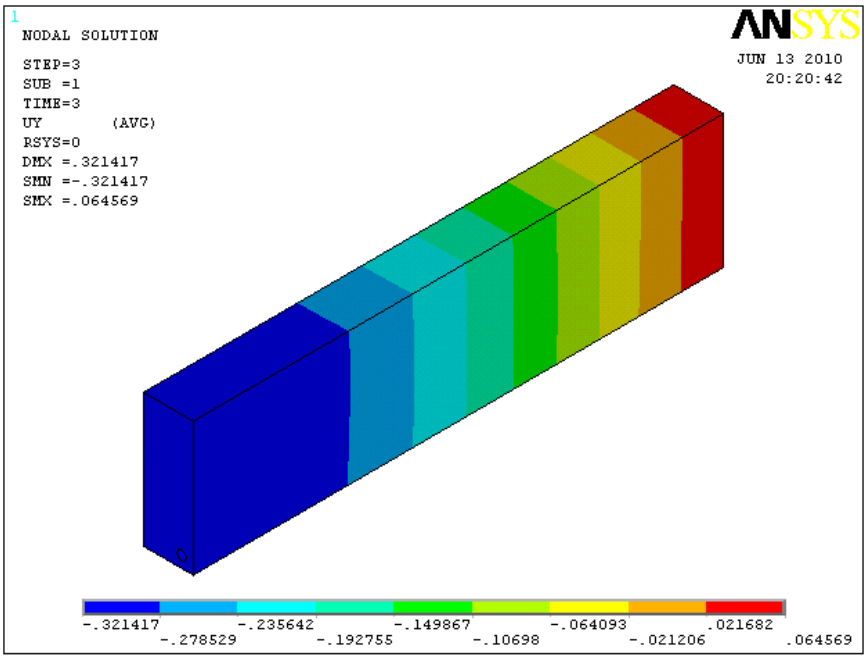
- Να ελεγχθούν οι υποθέσεις και οι παραδοχές που υιοθετούνται για το στάδιο αυτό σχετικά με τη συμπεριφορά και τη γεωμετρία των δοκών σκυροδέματος με οπλισμό FRP, και
- Να συγκριθούν τα αποτελέσματα που παρέχει η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για την κατακόρυφη μετατόπιση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

4.3.2 Η κατακόρυφη μετατόπιση της πειραματικής δοκού

Στο Σχήμα 4.9(α) δείχνεται η βύθιση της δοκού με οπλισμό GFRP που προκύπτει από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στη στάθμη φορτίου P=12.5kN που αντιπροσωπεύει την κατάσταση της δοκού, ακριβώς πριν τη ρηγμάτωση.



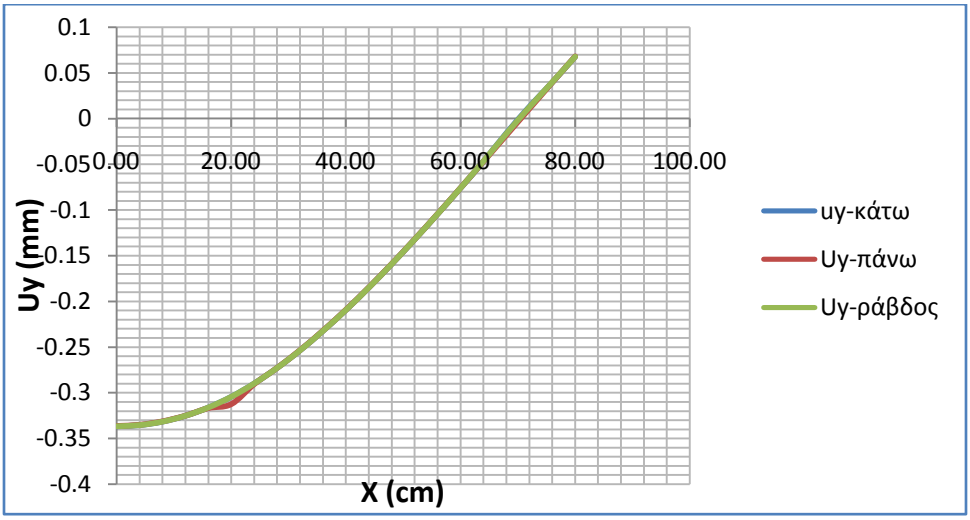
(a)



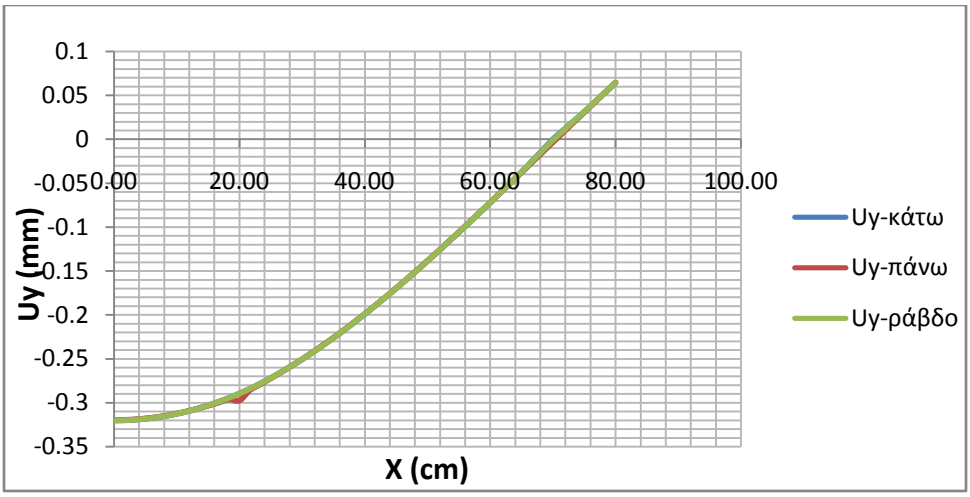
(b)

Σχήμα 4-9 Κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων για το δοκίμιο με οπλισμό GFRP (a) και CFRP (b)

Όπως αναμένεται, η κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο μέσο του ανοίγματος, ενώ στο σημείο της στήριξης η βύθιση είναι μηδενική. Επίσης, στο εξωτερικά των στηρίξεων, οι μετατοπίσεις που προκαλούνται είναι θετικές, που σημαίνει ότι το τμήμα αυτό ανυψώνεται σε σχέση με την αρχική του θέση. Το Σχήμα 4-9 (b) δείχνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την ανάλυση της δοκού με οπλισμό CFRP.



(a)



(b)

Σχήμα 4-10 Μεταβολή των βυθίσεων της κάτω ίνας, της πάνω ίνας και του οπλισμού για την δοκό (a) με οπλισμό GFRP και (b) με οπλισμό CFRP . Η απόσταση μετριέται από το κέντρο της δοκού.

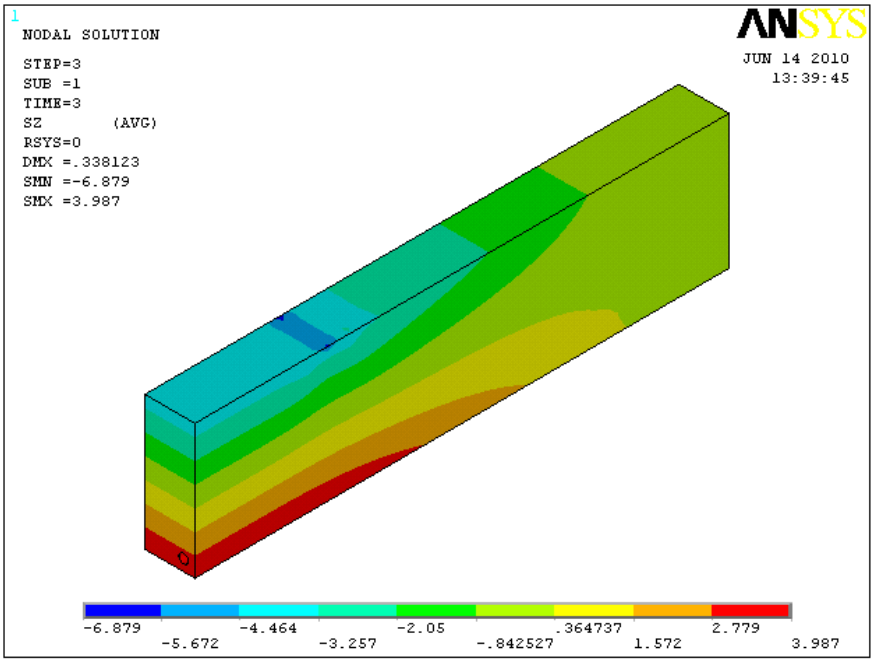
Στο Σχήμα 4-10 (a) και (b) δείχνονται οι κατανομές των κατακόρυφων βυθίσεων της κάτω εξωτερικής ίνας, της πάνω εξωτερικής ίνας, καθώς και της κεντρικής ίνας για τις δοκούς με οπλισμό GFRP και CFRP αντίστοιχα. Το γεγονός ότι και οι τρεις καμπύλες πρακτικά συμπίπτουν, επιβεβαιώνει την υπόθεση που γίνεται στην ανάλυση των δοκών σκυροδέματος, ότι οι δοκοί δεν παραμορφώνονται στη διεύθυνση του πάχους τους.

4.3.3 Κατανομή Τάσεων

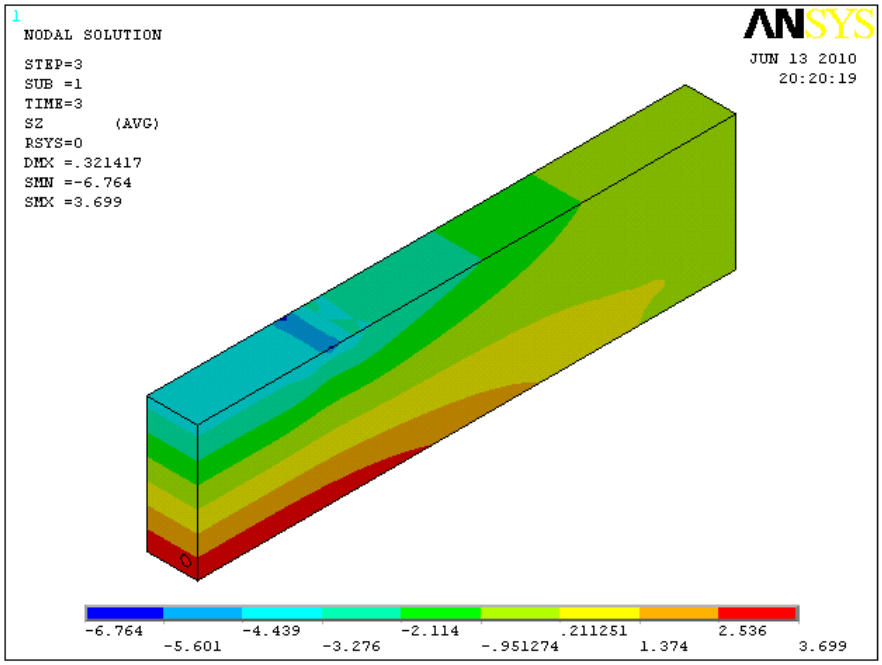
Στο Σχήμα 4-11(a) δείχνεται η διανομή των ορθών τάσεων στην δοκό με οπλισμό GFRP για το φορτίο P=12.5 kN, που αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση της δοκού ακριβώς πριν τη ρηγμάτωση. Το σχήμα 4-11(b) δείχνει την ίδια διανομή για τη δοκό με οπλισμό CFRP.

Οι διανομές των ορθών τάσεων στο σκυρόδεμα για τις ίδιες περιπτώσεις, παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα που οφείλεται στα κοινά γεωμετρικά στοιχεία και μηχανικές ιδιότητες των δύο δοκιμίων. Απόκλιση παρατηρείται στις ορθές τάσεις στις ράβδους οπλισμού λόγω των διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας που έχουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανομή των ορθών τάσεων σε μια διατομή της δοκού είναι σχεδόν γραμμική, όπως προκύπτει από τη τεχνική θεωρία κάμψης που εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα.

Στα Σχήματα 4-12(a) και 4-12(b) παρουσιάζονται οι κατανομές των ορθών τάσεων στη μεσαία διατομή σε τρεις χαρακτηριστικές κατακόρυφες ίνες για τα δύο δοκίμια.

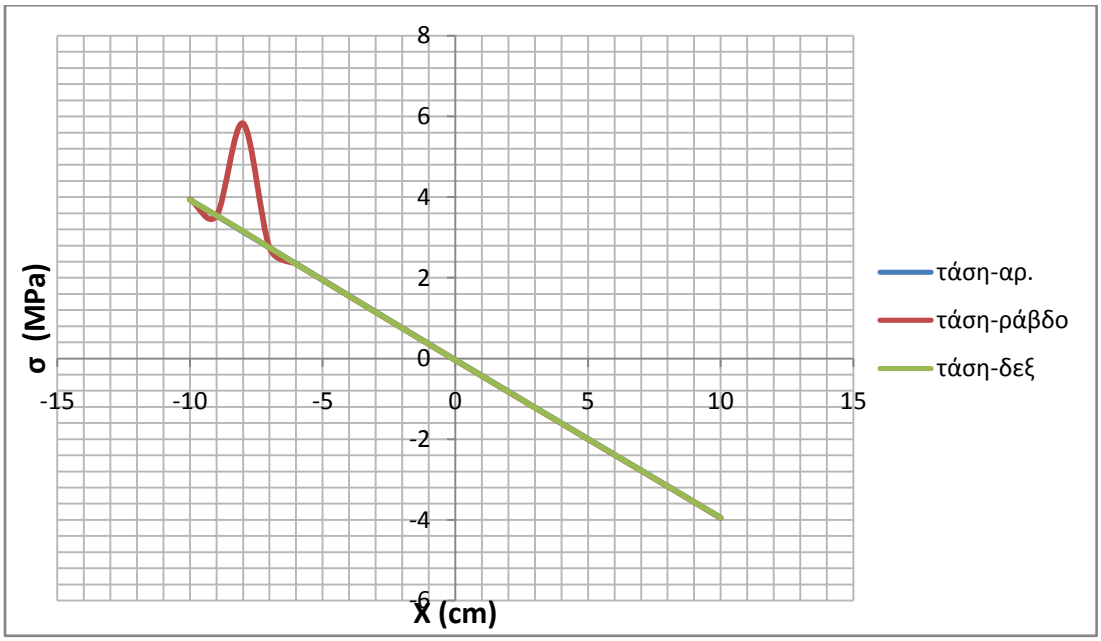


(a)

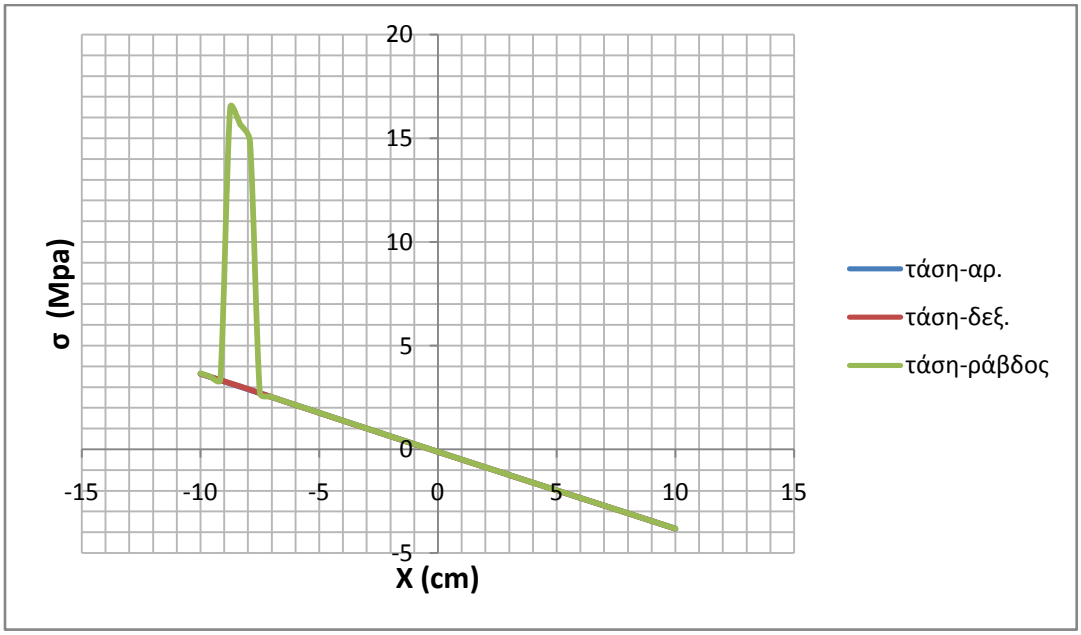


(b)

Σχήμα 4-9 Η διανομή των ορθών τάσεων της δοκού (a) με οπλισμό και (b) με οπλισμό C-FRP



(a)



(b)

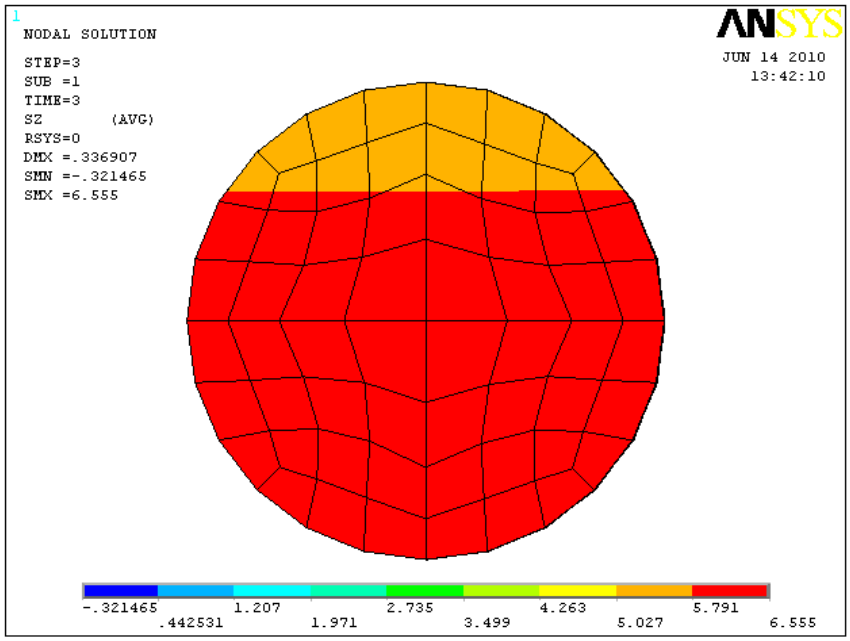
Σχήμα 4-12 Η διανομή των ορθών τάσεων σε τρεις θέσεις στη μεσαία διατομή μιας δοκού (a) GFRP και (b) CFRP

Και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρείται μια γραμμική κατανομή των τάσεων στη διατομή. Απόκλιση παρατηρείται κατά τη δεύτερη περίπτωση στη διατομή που δείχνεται από τον οπλισμό. Στην διατομή αυτή, στη θέση του οπλισμού, παρατηρείται τοπικά μια απότομη αύξηση των εφελκυστικών τάσεων.

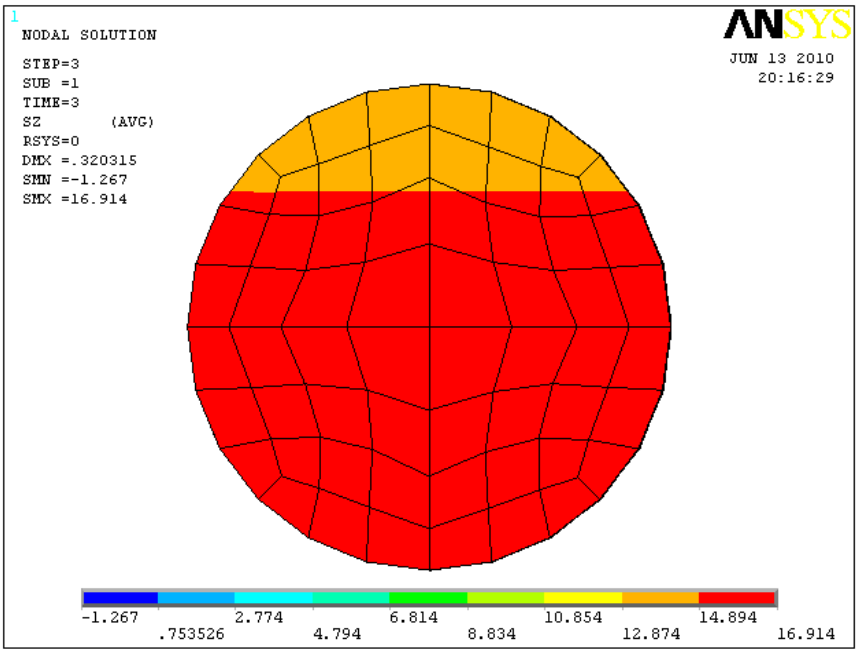
Στα Σχήματα 4-13 (a), (b) δείχνεται η κατανομή των ορθών τάσεων στη μεσαία διατομή των ράβδων οπλισμού GFRP και CFRP αντίστοιχα. Παρατηρείται, ότι και στις δύο περιπτώσεις, οι ράβδοι οπλισμού εφελκύονται σε όλη την επιφάνεια της διατομής, σχεδόν ομοιόμορφα, γεγονός που συμφωνεί με την υπόθεση της καμπτικής θεωρίας που εφαρμόζεται στην ανάλυση των δοκών Ο/Σ. Η μεγάλη διαφορά των τιμών των τάσεων, που ασκούνται στα δύο διαφορετικά είδη ράβδων, οφείλεται στα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας των δύο υλικών.

Στα Σχήματα 4-14 (a), (b) δείχνονται οι κατανομές των ορθών τάσεων κατά μήκος των ράβδων. Οι κατανομές δε παρουσιάζουν διαφορά στη μορφή, παρά μόνο ποσοτική διαφορά, που οφείλεται στο διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας των δύο οπλισμών.

Στα Σχήματα 4-15 (a), (b) δείχνεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων στις διατομές οπλισμού που βρίσκονται στη μεσαία διατομή, και στα Σχήματα 4-16 (a), (b) η κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος των ράβδων οπλισμού. Οι διατμητικές τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές στις ενδιάμεσες περιοχές, όπου επικρατούν συνθήκες καθαρής κάμψης, ενώ κοντά στις στηρίξεις και στα σημεία επιβολής εξωτερικού φορτίου, εμφανίζονται τοπικά να παίρνουν μικρές τιμές.

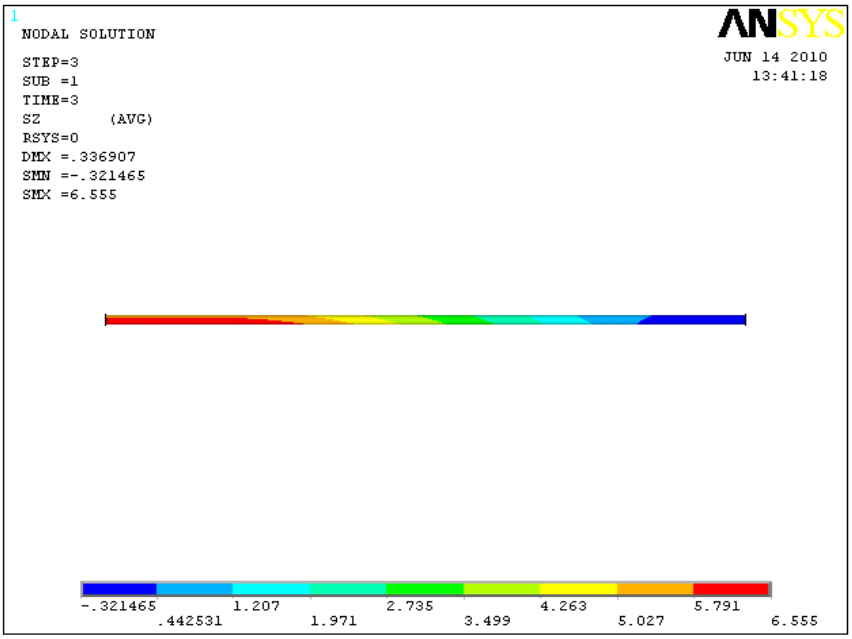


(a)

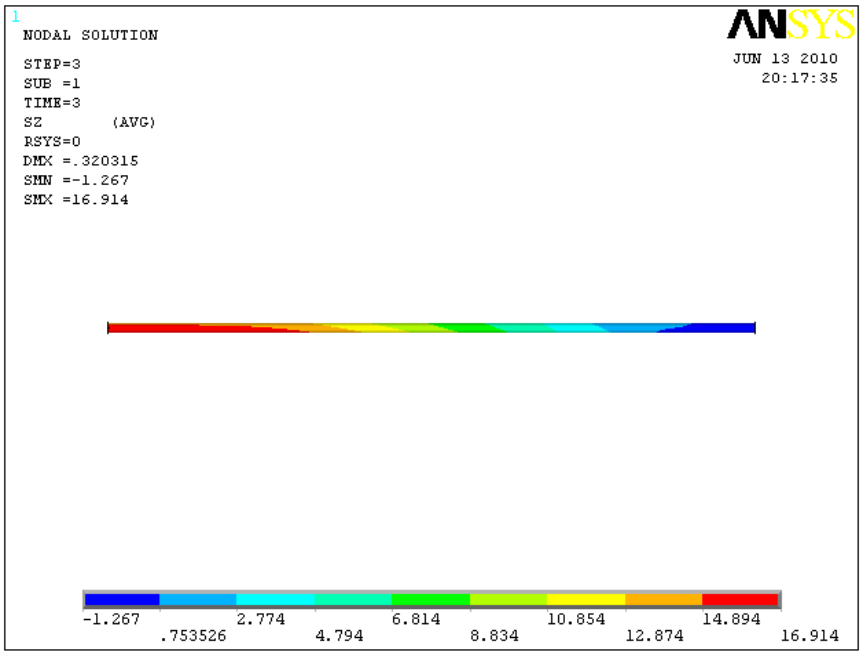


(b)

Σχήμα 4-13 Οι ορθές τάσεις στη διατομή του οπλισμού στη μεσαία διατομή της δοκού με (a) οπλισμό GFRP και (b) με οπλισμό CFRP

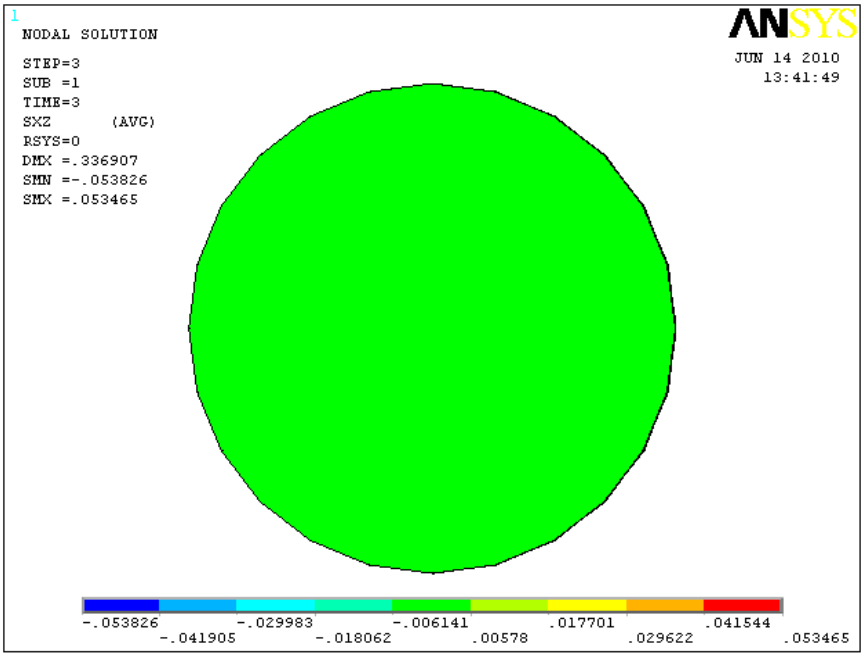


(a)

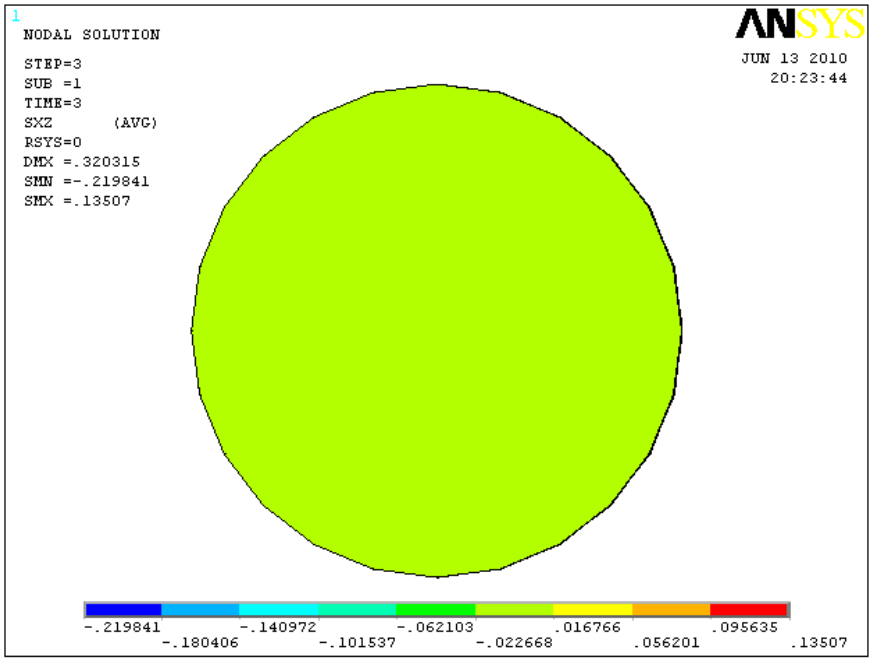


(b)

Σχήμα 4-14 Οι ορθές τάσεις κάμψης της ράβδου οπλισμού (a) GFRP και (b) CFRP

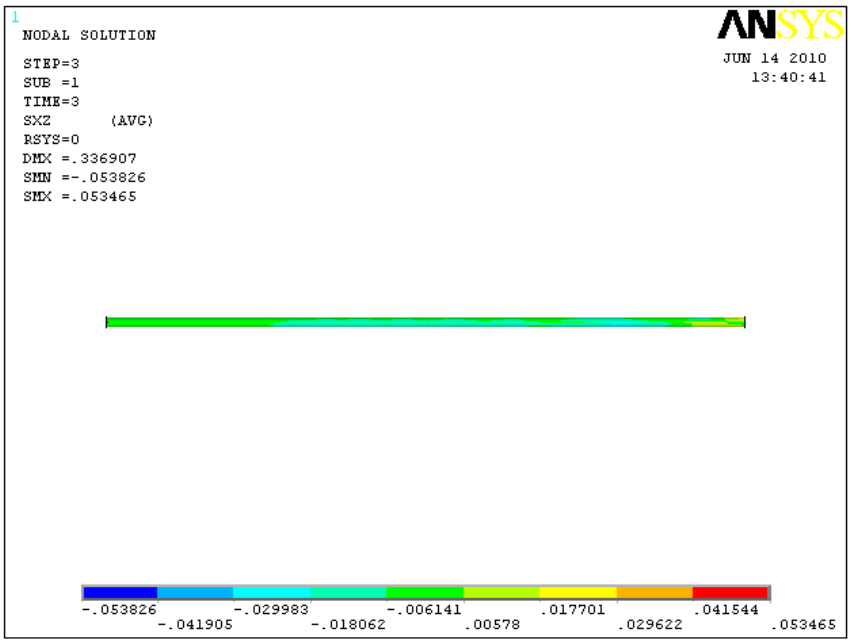


(a)

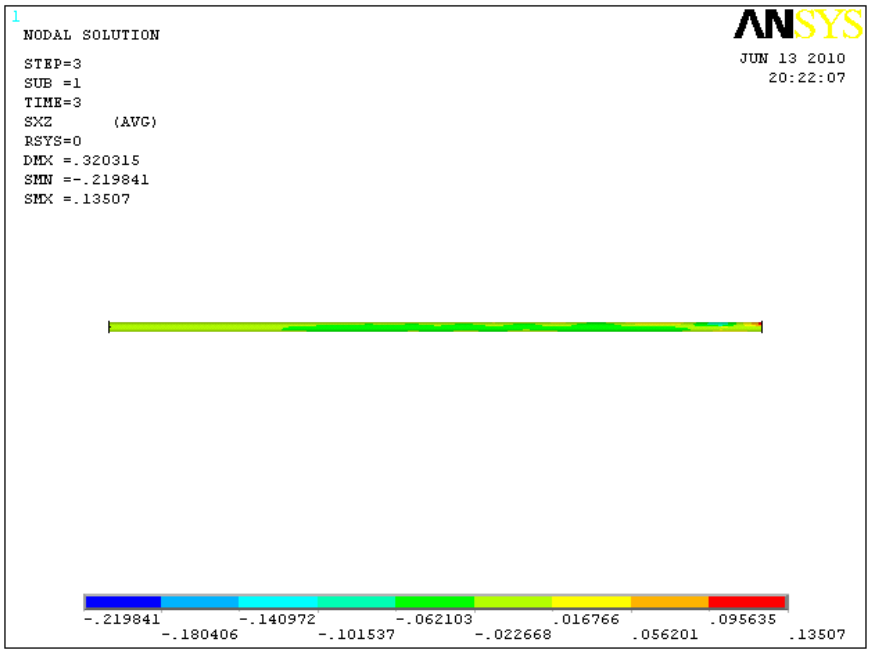


(b)

Σχήμα 4-15 Οι διατμητικές τάσεις στη διατομή της ράβδου για τη μεσαία διατομή της δοκού για (a) GFRP και (b)CFRP



(a)



(b)

Σχήμα 4-16 Οι διατμητικές τάσεις κατά μήκος της ράβδου οπλισμού (a) GFRP και (b) CFRP

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΣΤΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ΣΤΑΔΙΟ ΙΙ)

4.4.1 Σκοπός της ανάλυσης

Στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που θα ακολουθήσει, θα γίνει προσομοίωση της γεωμετρίας των πειραματικών δοκών παίρνοντας υπόψη την ιστορία σχηματισμού των ρωγμών. Η παραμορφωσιακή κατάσταση των δοκών που ενδιαφέρει τον σχεδιασμό, αναφέρεται στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας των δοκών, που σχετίζεται με τα πρώτα επίπεδα φόρτισης στη ρηγματωμένη τους κατάσταση. Στα επίπεδα αυτά, για την περίπτωση του οπλισμού FRP, και τα δύο υλικά «δουλεύουν» στην ελαστική περιοχή. Συνεπώς, επαλληλία των διαδοχικών ρηγματωμένων καταστάσεων στη ρηγματωμένη δοκό μπορεί να γίνει αποδεκτή. Ο βασικός σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η επίδραση των ρωγμών στην μακροσκοπική καμπτική παραμορφωσιακη συμπεριφορά των δοκών. Οι βασικοί παράμετροι της παραμορφωσιακης κατάστασης, που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό, είναι η βύθιση των δοκών, ο αριθμός και το εύρος των σχηματιζόμενων ρωγμών. Για την περίπτωση του οπλισμού FRP, ο αριθμός και η διαδοχή των σχηματιζόμενων ρωγμών έχει ήδη διερευνηθεί πειραματικά. Ο αριθμός των πρωτευουσών ρωγμών σε μια δοκό, που καταπονείται μέχρι να αστοχήσει, σταθεροποιείται έχοντας την μεταξύ τους απόσταση σχεδόν σταθερή. Η απόσταση αυτή είναι γνωστή ως απόσταση ρηγμάτωσης (crack spacing) και αποτελεί μια παράμετρο της παραμορφωσιακής καμπτικής κατάστασης των δοκών. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα σενάρια προκειμένου να ερμηνευθεί αυτό το φαινόμενο. Από τις πειραματικές και θεωρητικές έρευνες, που έχουν διεξαχθεί μέχρι τώρα, έχει διαπιστωθεί ότι, μαζί με τη δημιουργία μιας ρωγμής, δημιουργούνται δεξιά και αριστερά των επιφανειών της ρωγμής και κατά μήκος του οπλισμού, δυο αδυνατισμένες διεπιφανειακές ζώνες. Στις αδυνατισμένες αυτές ζώνες, έχει καταλυθεί η συνέχεια των τάσεων και μετατοπίσεων, που αντιστοιχεί στην «υγιή» κατάσταση της διεπιφάνειας. Στη ζώνες αυτές, λόγω καταστροφής των διεπιφανειακών δεσμών, προξενείται μια σχετική ολίσθηση των δύο συνδεδεμένων επιφανειών, που είναι συνάρτηση της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης

κατά του οπλισμού στις ζώνες αυτές. Η διεπιφανειακή αυτή συμπεριφορά περιγράφεται με το νόμο συνάφειας-ολίσθησης, που έχει συζητηθεί προήγουμενα. Η μορφή του νόμου αυτού επηρεάζει σημαντικά, τόσο τη βύθιση της δοκού όσο και το εύρος των ρωγμών. Ένα από τα βασικά αντικείμενα της ανάλυσης που γίνεται παρακάτω, είναι να διερευνηθεί η επίδραση του νόμου αυτού, τόσο στη βύθιση των δοκών, όσο και στο εύρος των ρωγμών.

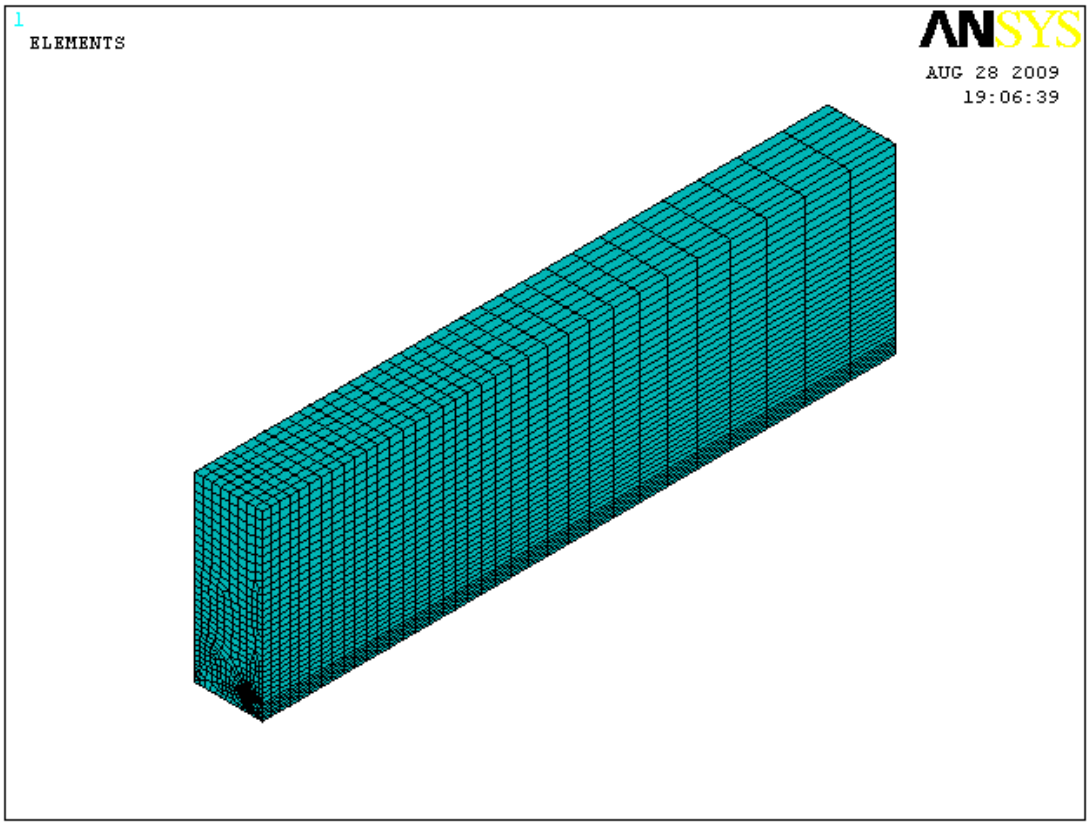
4.4.2 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της πειραματικής δοκού με οπλισμό GFRP

Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού των ρωγμών

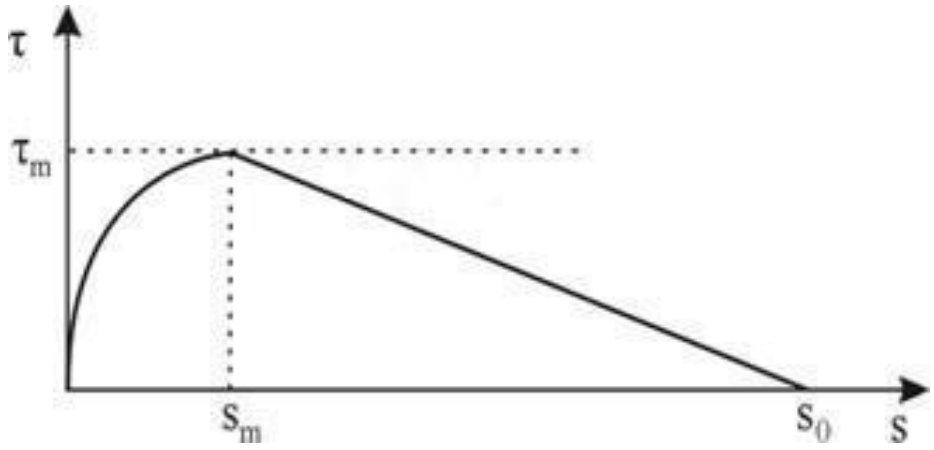
Όταν η εξωτερική φόρτιση των πειραματικών δοκών ξεπέρασε την κρίσιμη τιμή P_{cr}=12.5 kN, τότε στις δοκούς εμφανίστηκαν οι τέσσερις καμπτικές ρωγμές, που είναι κάθετες στον άξονα της δοκού και διαδόθηκαν ψαθυρά μέχρι να συναντήσουν τη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος. Οι δύο ρωγμές εμφανίστηκαν κοντά στα όρια της καθαρά καμπτόμενης περιοχής της δοκού, κάτω δηλαδή από τις επιβαλλόμενες εξωτερικές δυνάμεις, ενώ οι άλλες δύο στο καθαρά καμπτόμενο τμήμα της δοκού. Οι ρωγμές που σχηματίστηκαν ήταν ανά δύο συμμετρικές ως προς το μέσο της δοκού. Στη συνέχεια, με την αύξηση του εξωτερικού φορτίου, οι ρωγμές αυτές αυξήθηκαν σε μήκος και σε εύρος, μέχρι τα 27.5 kN, όπου δημιουργήθηκε μια νέα ρωγμή αριστερά του δοκιμίου, ανάμεσα στις δύο που ήδη υπάρχουν.

Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων

Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων της πειραματικής δοκού που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα ανάλυση δείχνεται στο Σχήμα 4-25



Σχήμα 4-105 Ο κάναβος της πειραματικής δοκού



Σχήμα 4-26 Ο νόμος συνάφειας ολίσθησης

Οι ρωγμές προσομοιώθηκαν με ασυνεχείς επίπεδες επιφάνειες μέσα στη δοκό, που ήταν κάθετες στον άξονα της δοκού. Οι επίπεδες αυτές επιφάνειες εκτείνονταν σε όλο το πλάτος της δοκού, ήταν κάθετες στον άξονά της και είχαν κάθε φορά συγκεκριμένο ύψος που καθοριζόταν από το ύψος της θλιβόμενης ζώνης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρόπος μοντελοποίησης των ρωγμών που επιλέχθηκε, έγινε επειδή το συγκεκριμένο λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε δεν μπορούσε να κάνει αυτόματη εισαγωγή των ρωγμών. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, η διεπιφάνεια οπλισμού FRP-σκυροδέματος μοντελοποιήθηκε με ένα λεπτό στρώμα υλικού, προκειμένου να εισαχθεί ο καταστατικός νόμος συνάφειας που δείχνεται στο Σχήμα 4-26. Στη παρούσα περίπτωση ο νόμος αυτός εισήχθηκε με τις παρακάτω παραμέτρους.

$$s_m = 0.253\ mm,\ \tau_{\max} = 4.65 MPa,\ a = 0.245,\ p = 0.128$$

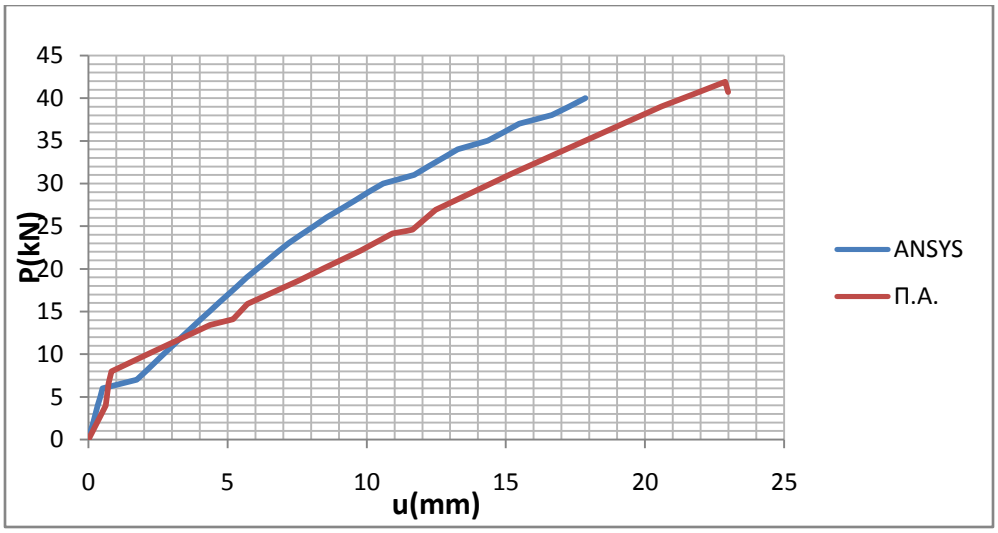
Η δοκός αυτή στο Στάδιο ΙΙ, αναλύθηκε για μία κατάσταση ρηγμάτωσης. Έτσι, εισήχθησαν τέσσερις ρωγμές προκειμένου να προσομοιωθεί η κατάσταση της δοκού μεταξύ των φορτίων P_{cr}=12.5 kN και P=40 kN. Για την κατάσταση αυτή προσδιορίσθηκαν το εύρος των ρωγμών και η κατακόρυφη βύθιση της δοκού.

Προσδιορισμός της βύθισης της δοκού

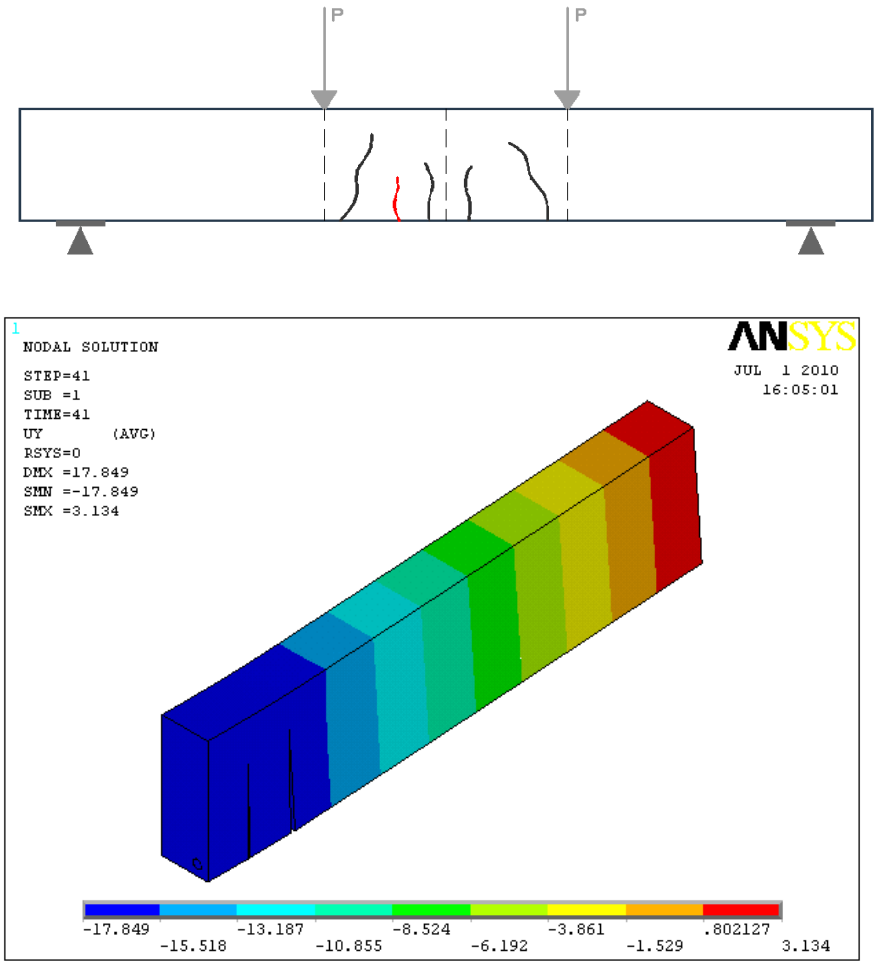
Με την παραπάνω προσομοίωση, έγινε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της πειραματικής δοκού για ένα εύρος μεταβολής του εξωτερικού φορτίου μεταξύ των τιμών 12.5 και 40 kN. Το βήμα μεταβολής του φορτίου ήταν 1 kN. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη βύθιση, από την ανάλυση που έγινε, δείχνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4-13. Στο ίδιο διάγραμμα έχουν τοποθετηθεί και οι αντίστοιχες τιμές που έχουν προκύψει από το πείραμα. Από τη σύγκριση των τιμών προκύπτει ότι υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως και στο Στάδιο Ι, η απόκριση της δοκού στο Στάδιο ΙΙ, στη ρηγματωμένη δηλαδή κατάσταση, είναι σχεδόν γραμμική. Με άλλα λόγια, το διάγραμμα P-Δ μιας δοκού με οπλισμό FRP είναι ένα διγραμμικό διάγραμμα.

Πίνακας 4-1 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για την βύθιση της δοκού GFRP-12.7

Θεωρητικά αποτελέσματα			
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Βύθιση (mm)**
0	**0**	**20**	**6.06**
1	**0.085**	**21**	**6.432**
2	**0.169**	**22**	**6.809**
3	**0.253**	**23**	**7.196**
4	**0.338**	**24**	**7.63**
5	**0.422**	**25**	**8.107**
6	**0.507**	**26**	**8.556**
7	**1.74**	**27**	**9.057**
8	**2.055**	**28**	**9.576**
9	**2.377**	**29**	**10.074**
10	**2.698**	**30**	**10.585**
11	**3.02**	**31**	**11.704**
12	**3.344**	**32**	**12.222**
13	**3.673**	**33**	**12.738**
14	**4.005**	**34**	**13.261**
15	**4.34**	**35**	**14.342**
16	**4.678**	**36**	**14.909**
17	**5.012**	**37**	**15.473**
18	**5.351**	**38**	**16.648**
19	**5.692**	**39**	**17.255**



Σχήμα 4-11 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης (kN-mm) για GFRP



Σχήμα 4-12 Κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων για το δοκίμιο GFRP

Εύρη ρωγμών

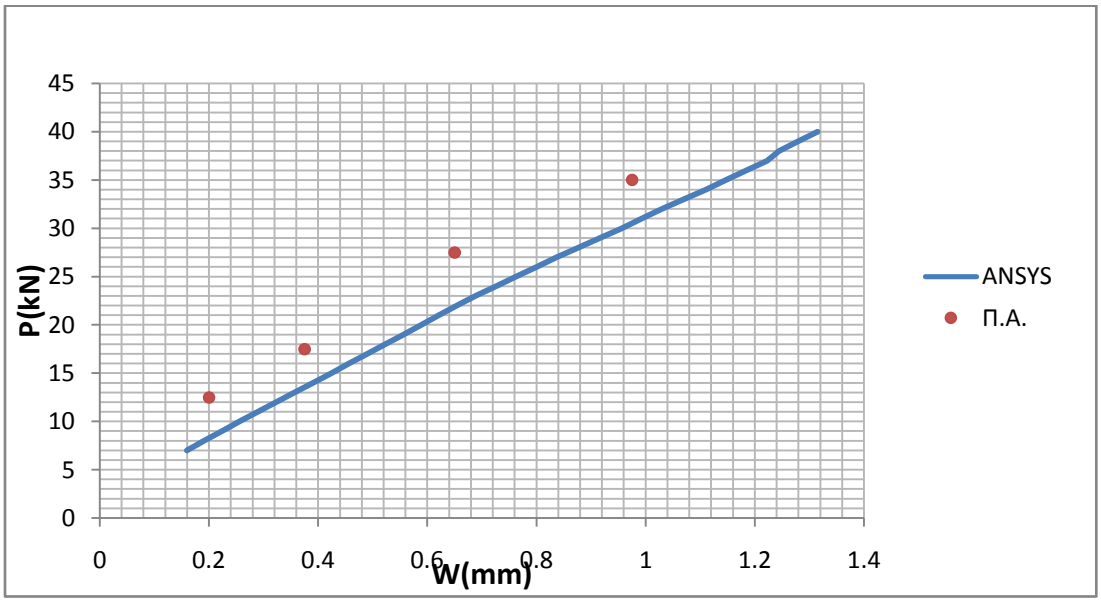
Τα θεωρητικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση για τα εύρη ρωγμών, δείχνονται γραφικά στο Σχήμα 4-15 και καταχωρούνται αριθμητικά στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-2 Φορτίο-Άνοιγμα ρωγμών από ανάλυση με ANSYS

Αποτελέσματα ANSYS			
Φορτίο (kN)	**Άνοιγμα (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Άνοιγμα (mm)**
0	**0**	**21**	**0.621**
1	**0**	**22**	**0.654**
2	**0**	**23**	**0.688**
3	**0**	**24**	**0.725**
4	**0**	**25**	**0.762**
5	**0**	**26**	**0.799**
6	**0**	**27**	**0.837**
7	**0.159**	**28**	**0.877**
8	**0.19**	**29**	**0.916**
9	**0.223**	**30**	**0.956**
10	**0.256**	**31**	**0.991**
11	**0.289**	**32**	**1.03**
12	**0.323**	**33**	**1.069**
13	**0.356**	**34**	**1.11**
14	**0.39**	**35**	**1.146**
15	**0.423**	**36**	**1.184**
16	**0.457**	**37**	**1.222**
17	**0.49**	**38**	**1.244**
18	**0.523**	**39**	**1.279**
19	**0.556**	**40**	**1.315**
20	**0.588**		

Πίνακας 4-3 Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου κατά την εκτέλεση του πειράματος

Πειραματικά Αποτελέσματα				
load	**crack1**	**crack2**	**crack3**	**crack4**
12.5	**0.2**	**0.1**	**0.1**	**0.4**
17.5	**0.5**	**0.3**	**0.2**	**0.5**
27.5	**0.6**	**0.7**	**0.6**	**0.7**
35	**0.8**	**1.0**	**1**	**1.1**

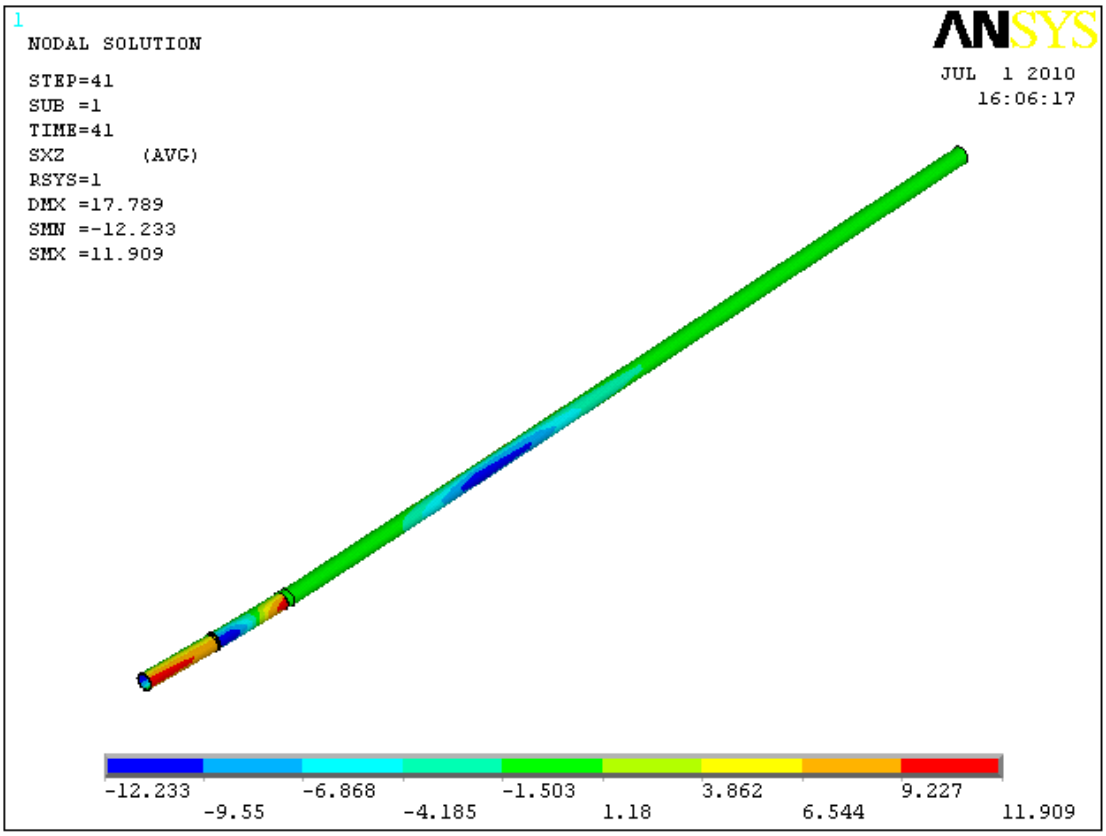


Σχήμα 4-13 Διάγραμμα Φορτίου-Εύρους ρωγμών για το GFRP 12.7 (ANSYS-Πειραματικά αποτελέσματα)

Το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι από κάποιες τιμές του εξωτερικού φορτίου και για επιπλέον αύξηση του, το εύρος των κεντρικών ρωγμών μεγαλωσε. Το γεγονός αυτό προκαλεί περιορισμό της αύξησης του εύρους των άλλων ρωγμών, και σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλεί τη μείωσή του.

Τασικό πεδίο

Στο Σχήμα 4-16 παρουσιάζεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά μήκος της ράβδου οπλισμού.

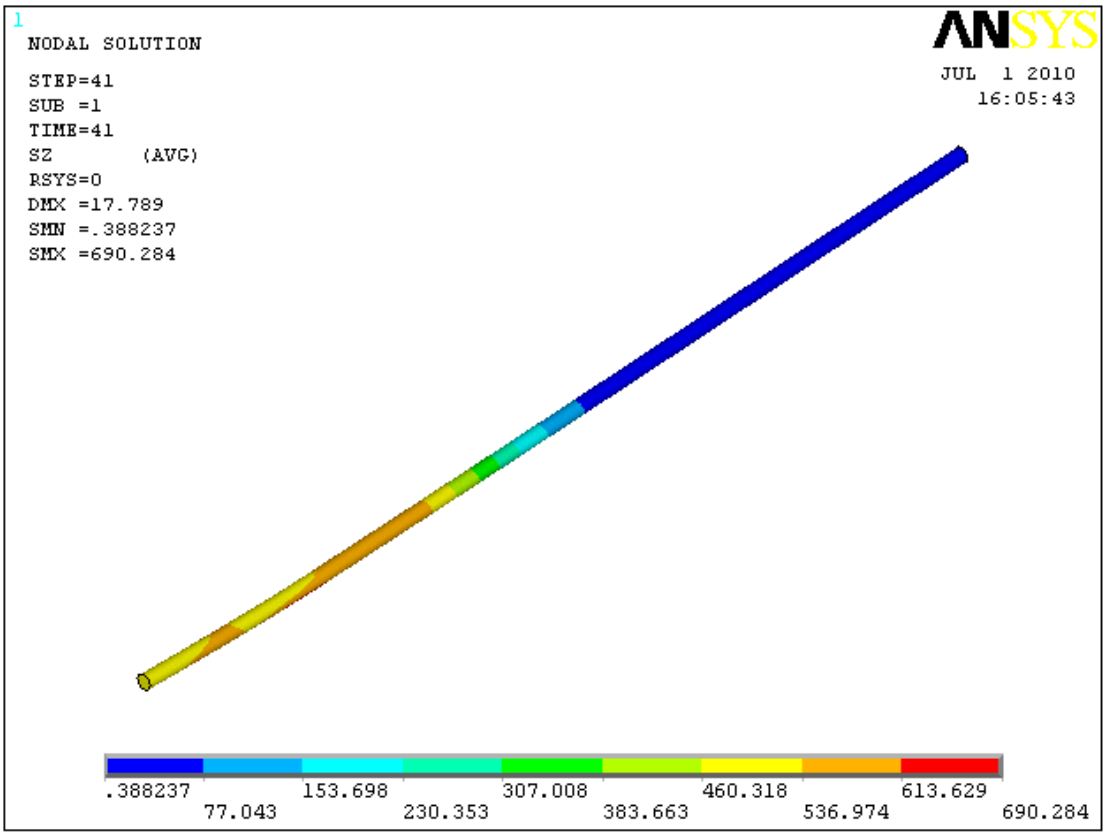


Σχήμα 4-16 Κατανομή διατμητικών τάσεων στη ράβδο GFRP 12.7

Αντίθετα από ότι συμβαίνει στο Στάδιο Ι, οι διατμητικές τάσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της ράβδου αλλά υπάρχει συγκέντρωση διατμητικών τάσεων γύρω από τις ρωγμές, οι οποίες έχουν ίσες σχεδόν τιμές αλλά αντίθετο πρόσημο. Αυτό οφείλεται στη σχετική ολίσθηση της διεπιφάνειας σκυροδέματος-οπλισμού GFRP, η οποία είναι και η αιτία της αύξησης του εύρους των ρωγμών.

Σε ότι αφορά την κατανομή των ορθών τάσεων στη ράβδο GFRP, που δείχνεται στο Σχήμα 4-17, παρατηρείται ότι σε αντίθεση με το Στάδιο Ι, δεν λαμβάνουν σε κανένα σημείο της ράβδου αρνητική τιμή, δεν υπάρχουν δηλαδη θλιπτικές τάσεις. Επίσης, όπως

και στο Στάδιο Ι, οι διατομές που βρίσκονται στο μέσο του δοκιμίου, είναι αυτές που εφελκύονται περισσότερο.



Σχήμα 4-17 Κατανομή ορθών τάσεων στη ράβδο GFRP 12.7

4.4.3 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της πειραματικής δοκού με οπλισμό CFRP

Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού των ρωγμών

Με παρόμοιο τρόπο ρηγματώθηκε και το δοκίμιο με οπλισμό CFRP. Στη τιμή P=7.5 kN του εξωτερικού φορτίου, δημιουργήθηκαν τρεις ρωγμές. Οι δύο από αυτές βρίσκονταν στα όρια της καθαρά καμπτόμενης περιοχής και κάτω από τα σημεία επιβολής των φορτίων, και η τρίτη στο μέσο του δοκιμίου. Καθώς αυξανόταν το φορτίο, οι ρωγμές

αυξάνονταν σε μήκος και σε εύρος μέχρι τα 15 kN, όπου δημιουργήθηκε μια νέα ρωγμή δεξιά του δοκιμίου και μέσα στην καθαρά καμπτόμενη περιοχή. Επιπλέον, άλλη μία ρωγμή δημιουργήθηκε στην ίδια πλευρά του δοκιμίου όταν P= 22.5 kN.

Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων

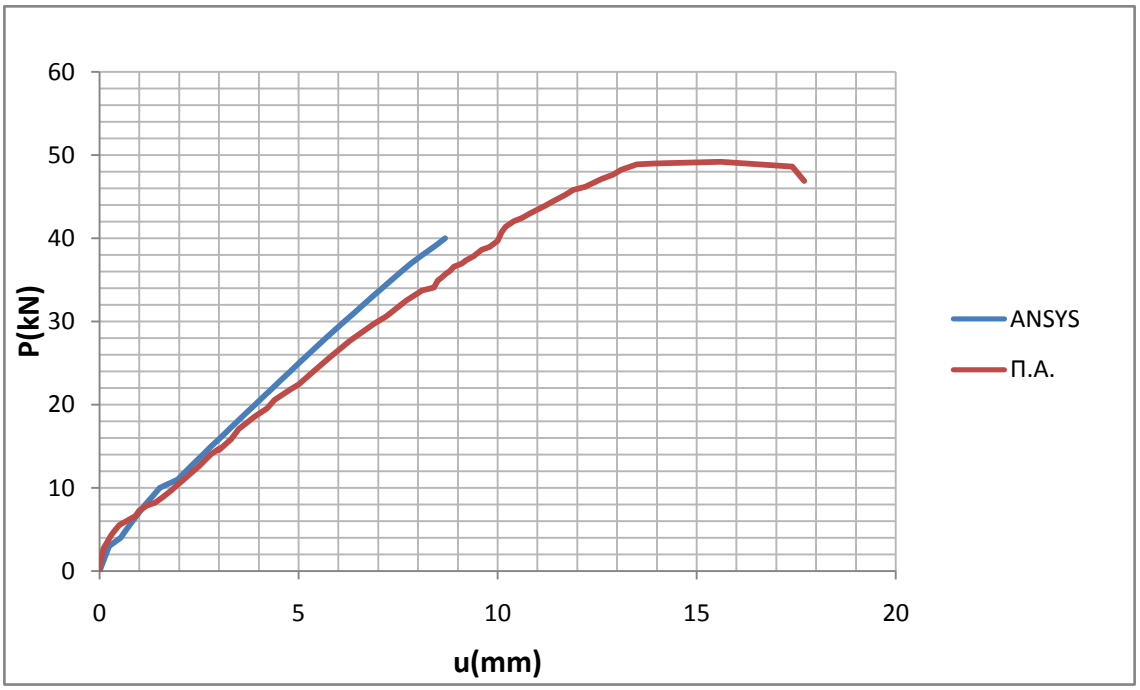
Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων της πειραματικής δοκού με οπλισμό CFRP είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική δοκό GFRP. Αντίστοιχα προσομοιώθηκαν και οι ρωγμές και η διεπιφάνεια οπλισμού CFRP-σκυροδέματος. Η δοκός CFRP, στο Στάδιο ΙΙ, αναλύθηκε για δύο καταστάσεις ρηγμάτωσης. Αρχικά, εισήχθησαν δύο ρωγμές προκειμένου να προσομοιωθεί η κατάσταση της δοκού μεταξύ των φορτίων P_{cr}=7.5 kN και P=22.5 kN. Για την κατάσταση αυτή προσδιορίσθηκαν το εύρος των ρωγμών και η κατακόρυφη βύθιση της δοκού. Στη συνέχεια, εισήχθη ακόμη μία ρωγμή, έτσι ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση μεταξύ των φορτίων P=22.5 kN και P=37.5 kN. Για τη φάση αυτή προσδιορίστηκαν το εύρος των ρωγμών, καθώς και η κατανομή της βύθισης της δοκού.

Προσδιορισμός της βύθισης της δοκού

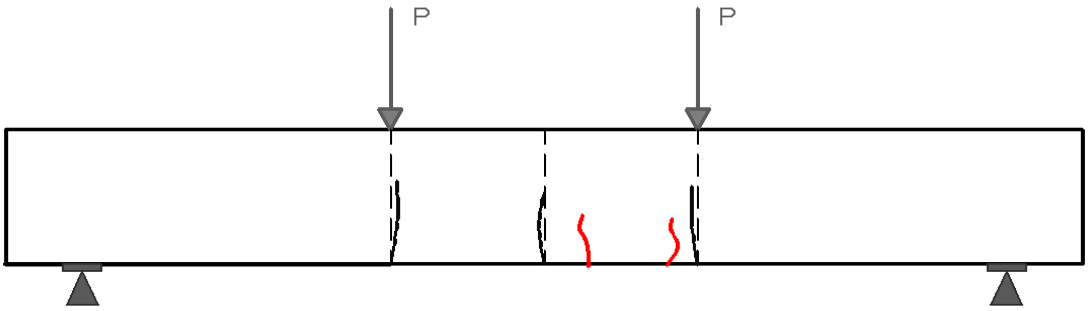
Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της πειραματικής δοκού έγινε για ένα εύρος εξωτερικού φορτίου μεταξύ των τιμών 7.5 kN και 37.5 kN. Το βήμα μεταβολής του φορτίου ήταν 1 kN. Στον Πίνακα 4-5 καταχωρήθηκαν τα αποτελέσματα της κατακόρυφης μετατόπισης του δοκιμίου με οπλισμό CFRP, για τις διάφορες τιμές του φορτίου P, μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Από τον Πίνακα 4-5 καθώς και από το διάγραμμα του σχήματος 4-17, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτά των πειραμάτων. Επίσης, και στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι η απόκριση της δοκού, στη κατάσταση είναι σχεδόν γραμμική. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών της μέγιστης βύθισης της δοκού με οπλισμό GFRP και της αντίστοιχης της δοκού με CFRP. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό, στο μέτρο ελαστικότητας του CFRP, που είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του GFRP.

Πίνακας 4-4 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για τη βύθιση της δοκού CFRP

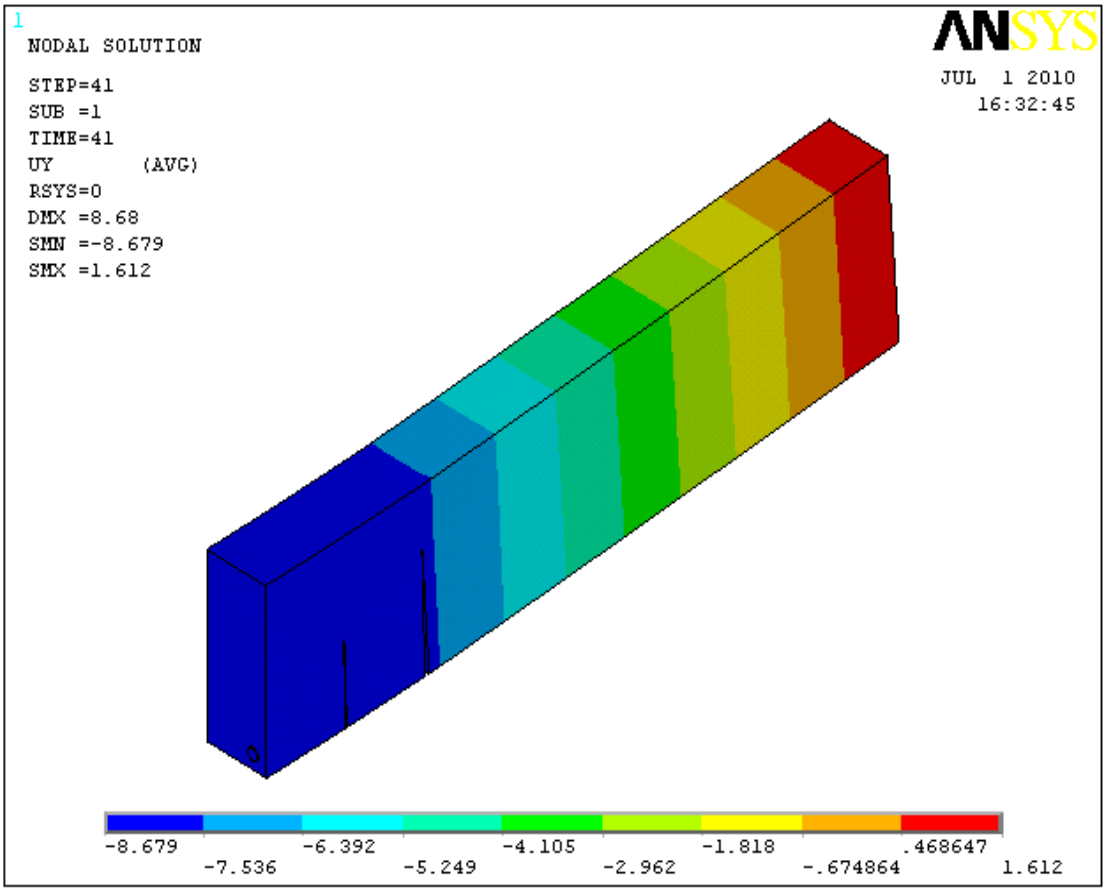
Θεωρητικά Αποτελέσματα με αριθμούς			
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Βύθιση (mm)**
0	**0**	**26**	**5.2334**
1	**0.0804**	**27**	**5.4579**
2	**0.1608**	**28**	**5.6832**
3	**0.2412**	**29**	**5.9147**
4	**0.5275**	**30**	**6.1501**
5	**0.6759**	**31**	**6.3864**
6	**0.8283**	**32**	**6.6227**
7	**0.9849**	**33**	**6.8589**
8	**1.1513**	**34**	**7.0959**
9	**1.3305**	**35**	**7.3346**
10	**1.5141**	**36**	**7.5779**
11	**1.9643**	**37**	**7.8294**
12	**2.1729**	**38**	**8.1101**
13	**2.3817**	**39**	**8.4027**
14	**2.5922**	**40**	**8.6794**
15	**2.8076**	**41**	**0**
16	**3.0268**	**42**	**0.0804**
17	**3.244**	**43**	**0.1608**
18	**3.4641**	**44**	**0.2412**
19	**3.6842**	**45**	**0.5275**
20	**3.9041**	**46**	**0.6759**
21	**4.1238**	**47**	**0.8283**
22	**4.3438**	**48**	**0.9849**
23	**4.5646**	**49**	**1.1513**
24	**4.7867**	**50**	**1.3305**
25	**5.0097**		



Σχήμα 4-14 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης (kN-mm) για CFRP



Σχήμα 4-18 Η μορφή της πειραματικής δοκού μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής



Σχήμα 4-19 Κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων για το δοκίμιο CFRP

Εύρη ρωγμών

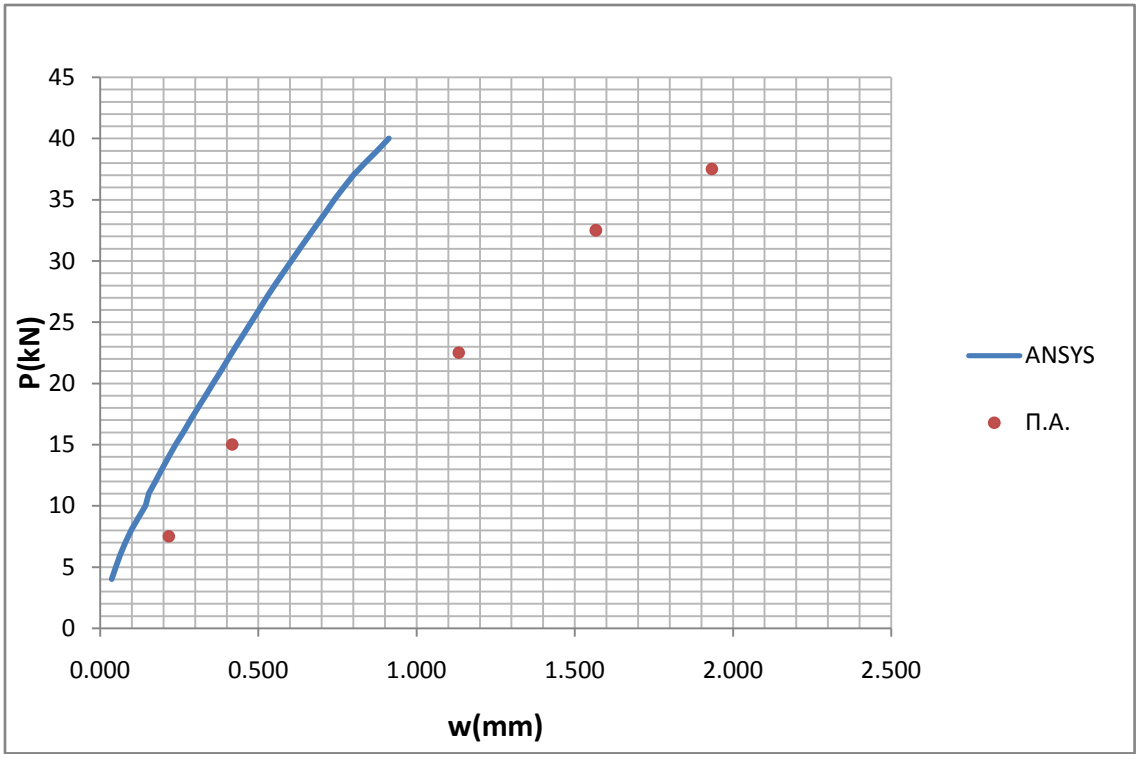
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε για τα εύρη ρωγμών παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 4-19 που καταχωρούνται αριστερά στο πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-5 Θεωρητικά αποτελέσματα για το εύρος ρωγμών της δοκού CFRP

Αποτελέσματα ANSYS της δοκού CFRP					
Φορτίο (kN)	**Εύρος ρωγμών (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Εύρος ρωγμών (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Εύρος ρωγμών (mm)**
0	**0**	**14**	**0.216**	**28**	**0.551**
1	**0**	**15**	**0.239**	**29**	**0.577**
2	**0**	**16**	**0.262**	**30**	**0.604**
3	**0**	**17**	**0.285**	**31**	**0.631**
4	**0.036**	**18**	**0.309**	**32**	**0.659**
5	**0.05**	**19**	**0.333**	**33**	**0.686**
6	**0.064**	**20**	**0.357**	**34**	**0.713**
7	**0.08**	**21**	**0.381**	**35**	**0.741**
8	**0.098**	**22**	**0.405**	**36**	**0.769**
9	**0.12**	**23**	**0.429**	**37**	**0.8**
10	**0.143**	**24**	**0.453**	**38**	**0.837**
11	**0.153**	**25**	**0.477**	**39**	**0.876**
12	**0.174**	**26**	**0.502**	**40**	**0.912**
13	**0.195**	**27**	**0.526**		

Πίνακας 4-6 Πειραματικά αποτελέσματα για τα εύρη ρωγμών της δοκού CFRP

Φορτίο	**Εύρος(1)**	**Εύρος(2)**	**Εύρος(3)**
7.5	**0.2**	**0.25**	**0.2**
15	**0.4**	**0.45**	**0.4**
22.5	**0.9**	**1.4**	**1.1**
32.5	**1.2**	**2**	**1.5**
37.5	**1.7**	**2.3**	**1.8**

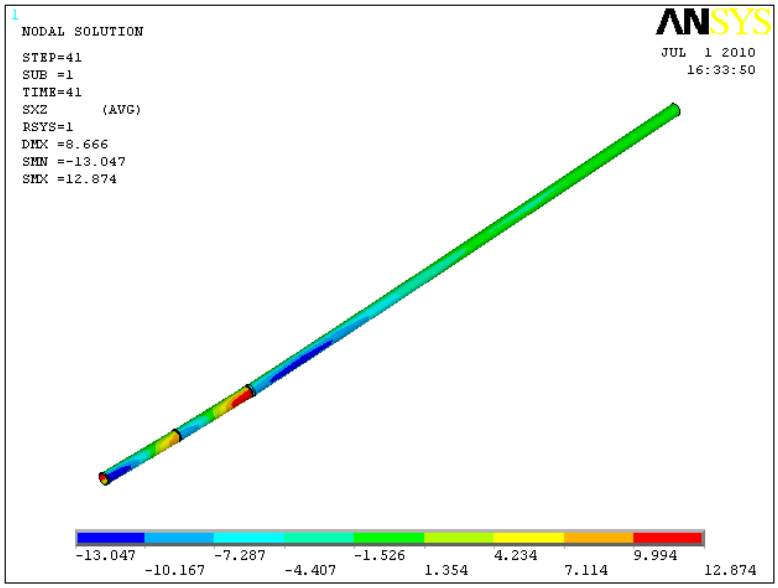


Σχήμα 4-20 Διάγραμμα φορτίου-εύρους ρωγμών (kN-mm) για CFRP

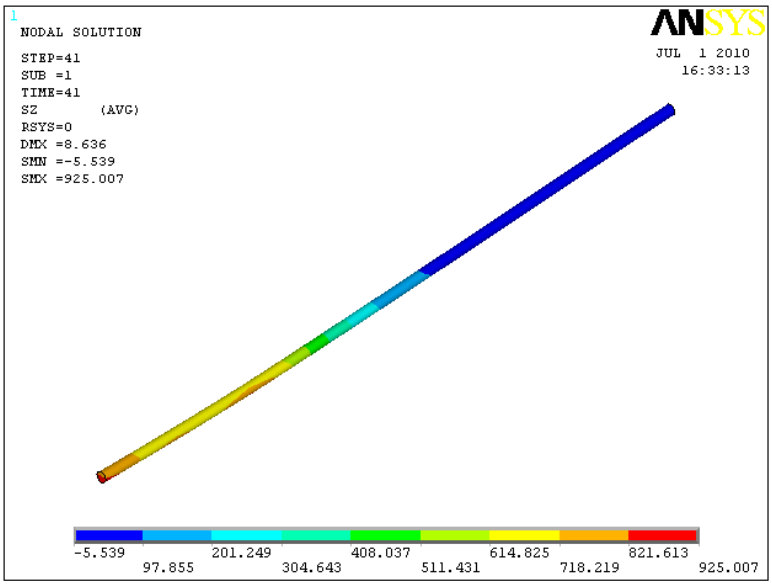
Το Σχήμα 4-20 δείχνει ότι για τιμές μεγαλύτερες των 20kN υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στην πλαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος, που δεν προσομοιώθηκε κατάλληλα στην ανάλυση..

Τασικό πεδίο

Από τα Σχήματα 4-21 και 4-22 προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα με αυτά για το δοκίμιο με οπλισμό GFRP, σε ότι αφορά τη κατανομή διατμητικών και ορθών τάσεων. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι εκατέρωθεν των θέσεων που έχουν τοποθετηθεί οι ρωγμές, υπάρχουν υψηλές διατμητικές τάσεις.



Σχήμα 4-21 Κατανομή διατμητικών τάσεων στη ράβδο CFRP



Σχήμα 4-22 Κατανομή ορθών τάσεων στη ράβδο CFRP

Αντιστοίχως, αναφορικά με την κατανομή των ορθών τάσεων, και για την περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι η ράβδος καταπονείται μόνο από εφελκυστικές τάσεις, σε αντίθεση με το στάδιο I (Σχήμα 4-22).

4.4.4 Πειραματική δοκός με οπλισμό από χάλυβα

Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού των ρωγμών

Όταν η εξωτερική φόρτιση των πειραματικών δοκών ξεπέρασε την κρίσιμη τιμή P_{cr}=12.5 kN, τότε στη δοκό με οπλισμό χάλυβα εμφανίστηκαν οι τρεις πρώτες καμπτικές ρωγμές, που ήταν κάθετες στον άξονα της δοκού και διαδόθηκαν ψαθυρά μέχρι να συναντήσουν τη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος. Οι δύο από αυτές εμφανίστηκαν κοντά στα όρια της καθαρά καμπτόμενης περιοχής της δοκού, κάτω δηλαδή από τις επιβαλλόμενες εξωτερικές δυνάμεις, ενώ η τρίτη στο μέσο της δοκού. Στη συνέχεια, με την αύξηση του φορτίου P οι ρωγμές αυτές αυξήθηκαν σε μήκος και σε εύρος μέχρι τα 15 kN, όπου δημιουργήθηκαν τέσσερις νέες ρωγμές, δύο αριστερά και δύο δεξιά, συμμετρικές ως προς το μέσο της δοκού και μέσα στην καμπτόμενη περιοχή.

Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων

Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων της πειραματικής δοκού με οπλισμό από χάλυβα είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στις δύο προηγούμενες δοκούς. Με τον ίδιο τρόπο προσομοιώθηκαν και οι ρωγμές, καθώς και η διεπιφάνεια χάλυβα όπλισης-σκυροδέματος.

Η δοκός με οπλισμό από χάλυβα στο Στάδιο ΙΙ, αναλύθηκε για δύο καταστάσεις ρηγμάτωσης. Έτσι, εισήχθησαν τρεις ρωγμές προκειμένου να προσομοιωθεί η κατάσταση της δοκού μεταξύ των φορτίων P_{cr}=12.5 kN και P=15 kN. Για την κατάσταση αυτή προσδιορίστηκαν το εύρος των ρωγμών και η κατακόρυφη βύθιση της δοκού. Στη συνέχεια, εισήχθησαν τέσσερις ακόμα ρωγμές έτσι ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση μεταξύ των φορτίων P=15 kN και P=32.5 kN. Αντίστοιχα, στη φάση αυτή προσδιορίσθηκαν το εύρος των ρωγμών, καθώς και η κατανομή της βύθισης της δοκού.

Προσδιορισμός της βύθισης της δοκού

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της πειραματικής δοκού έγινε αυτή τη φορά για ένα εύρος του εξωτερικού φορτίου μεταξύ των τιμών 12.5 kN και 32.5 kN. Το βήμα

μεταβολής του φορτίου ήταν και για τη δοκιμή αυτή 1 kN. Στον Πίνακα 4-8 παρατίθενται τα αποτελέσματα της κατακόρυφης μετατόπισης του δοκιμίου με οπλισμό από χάλυβα για τις διάφορες τιμές του εξωτερικού φορτίου \στο Στάδιο ΙΙ. Από το διάγραμμα του Σχήματος 4-23, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία συμφωνούν πολύ καλά με τα πειραματικά δεδομένα για τις τιμές του φορτίου P που είναι μικρότερες από τα 25 kN. Για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται απόκλιση των δύο διαγραμμάτων.

Πίνακας 4-7 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για τη βύθιση της δοκού με οπλισμό από χάλυβα

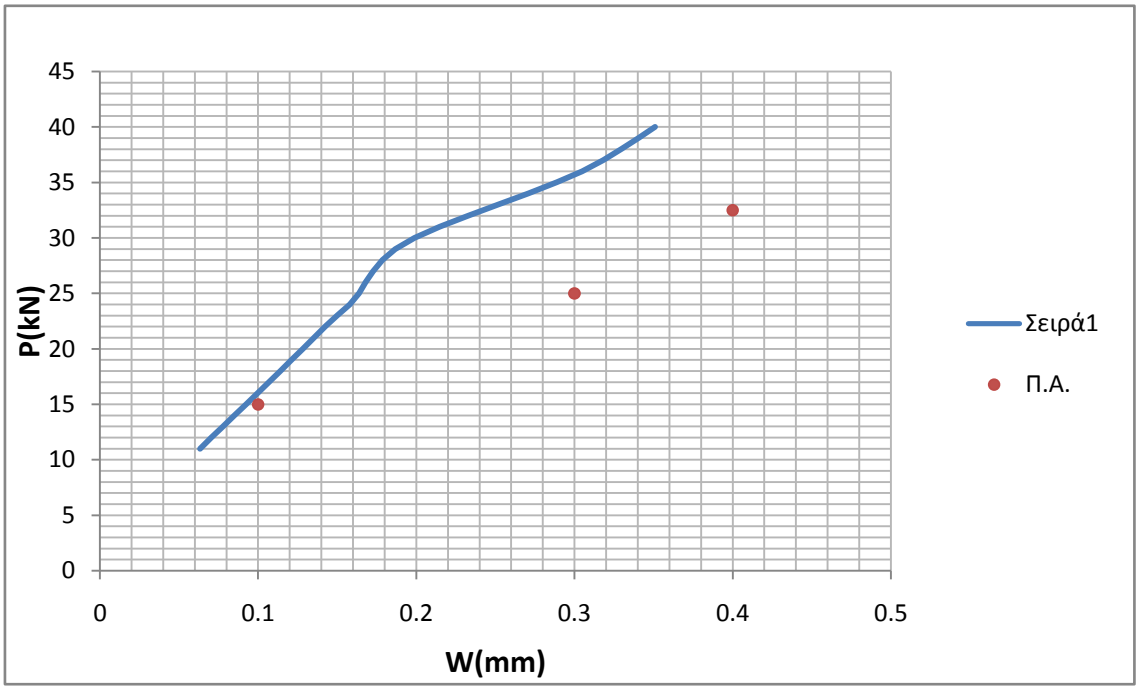
Θεωρητικά Αποτελέσματα			
Φορτίο (kN)	**Βύθιση (mm)**	**Φορτίο (kN)**	**Βύθιση (mm)**
0	**0**	**21**	**3.0493**
1	**0.0774**	**22**	**3.2099**
2	**0.1548**	**23**	**3.3731**
3	**0.2323**	**24**	**3.5582**
4	**0.3097**	**25**	**3.8972**
5	**0.3871**	**26**	**4.347**
6	**0.4645**	**27**	**4.868**
7	**0.542**	**28**	**5.4074**
8	**0.6194**	**29**	**5.9673**
9	**0.6968**	**30**	**6.5371**
10	**0.7742**	**31**	**7.1084**
11	**1.2347**	**32**	**7.6778**
12	**1.3558**	**33**	**8.2584**
13	**1.4774**	**34**	**8.8435**
14	**1.961**	**35**	**9.4291**
15	**2.1117**	**36**	**10.042**
16	**2.2635**	**37**	**10.6674**
17	**2.4169**	**38**	**11.3079**
18	**2.5725**	**39**	**11.9722**
19	**2.7301**	**40**	**12.6609**
20	**2.8892**		

Πίνακας 4-8 Φορτίο-Άνοιγμα ρωγμών από ανάλυση με ANSYS για χάλυβα 12 mm

Αποτελέσματα ANSYS			
Φορτίο	**Εύρος**	**Φορτίο**	**Εύρος**
0	**0.000**	**21**	**0.135**
1	**0.000**	**22**	**0.142**
2	**0.000**	**23**	**0.150**
3	**0.000**	**24**	**0.158**
4	**0.000**	**25**	**0.164**
5	**0.000**	**26**	**0.168**
6	**0.000**	**27**	**0.173**
7	**0.000**	**28**	**0.179**
8	**0.000**	**29**	**0.187**
9	**0.000**	**30**	**0.199**
10	**0.000**	**31**	**0.215**
11	**0.063**	**32**	**0.233**
12	**0.070**	**33**	**0.252**
13	**0.078**	**34**	**0.271**
14	**0.085**	**35**	**0.289**
15	**0.092**	**36**	**0.305**
16	**0.100**	**37**	**0.318**
17	**0.107**	**38**	**0.330**
18	**0.114**	**39**	**0.341**
19	**0.121**	**40**	**0.351**
20	**0.128**		

Πίνακας 4-9 Εξέλιξη του εύρους των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου κατά την εκτέλεση του πειράματος (χάλυβας 12mm)

Φορτίο	Εύρος
15	0.1
25	0.3
32.5	0.4

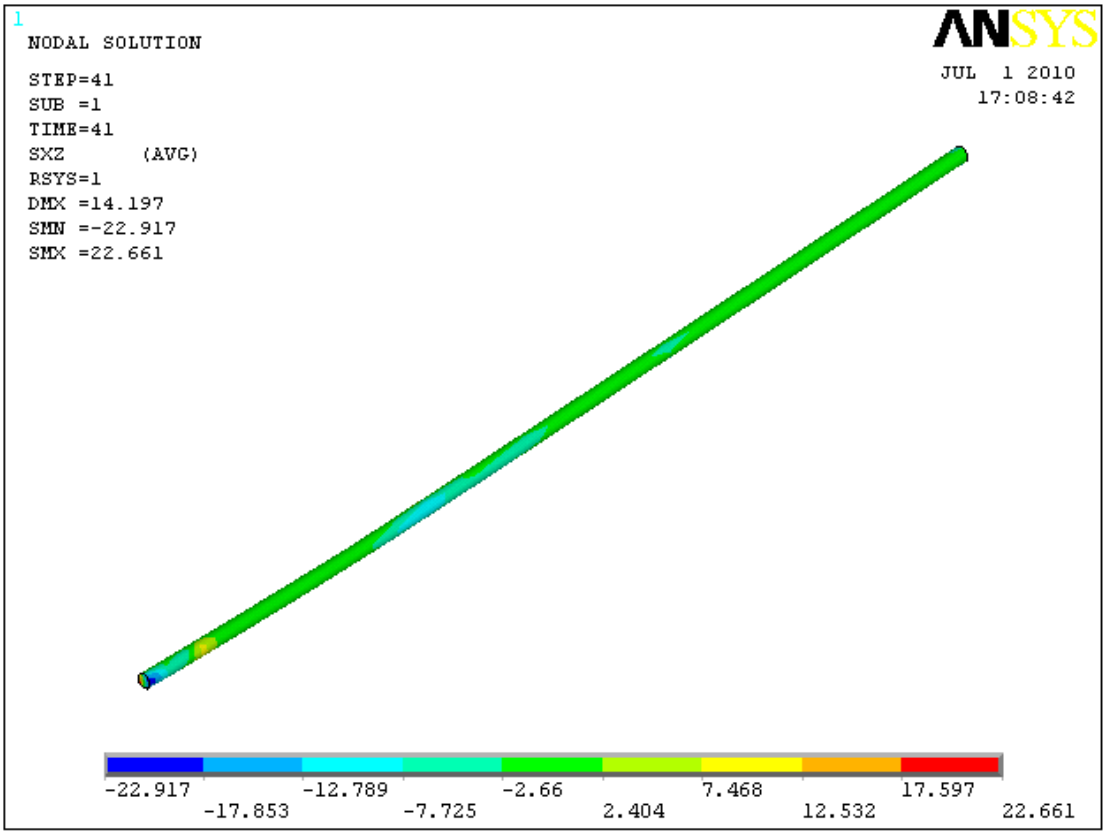


Σχήμα 4-25 Διάγραμμα Φορτίου-Εύρους ρωγμών (kN-mm) για χάλυβα 12mm

Από το Σχήμα 4-25 προκύπτει ότι για τις τιμές του φορτίου P που είναι μικρότερες από τα 15 kN οι πειραματικές τιμές του εύρους των ρωγμών συμφωνούν καλώς με τις θεωρητικές. Για τις μεγαλύτερες τιμές του φορτίου, παρατηρείται μια μικρή απόκλιση, παρόλο που οι κλίσεις των διαγραμμάτων παραμένουν παραπλήσιες.

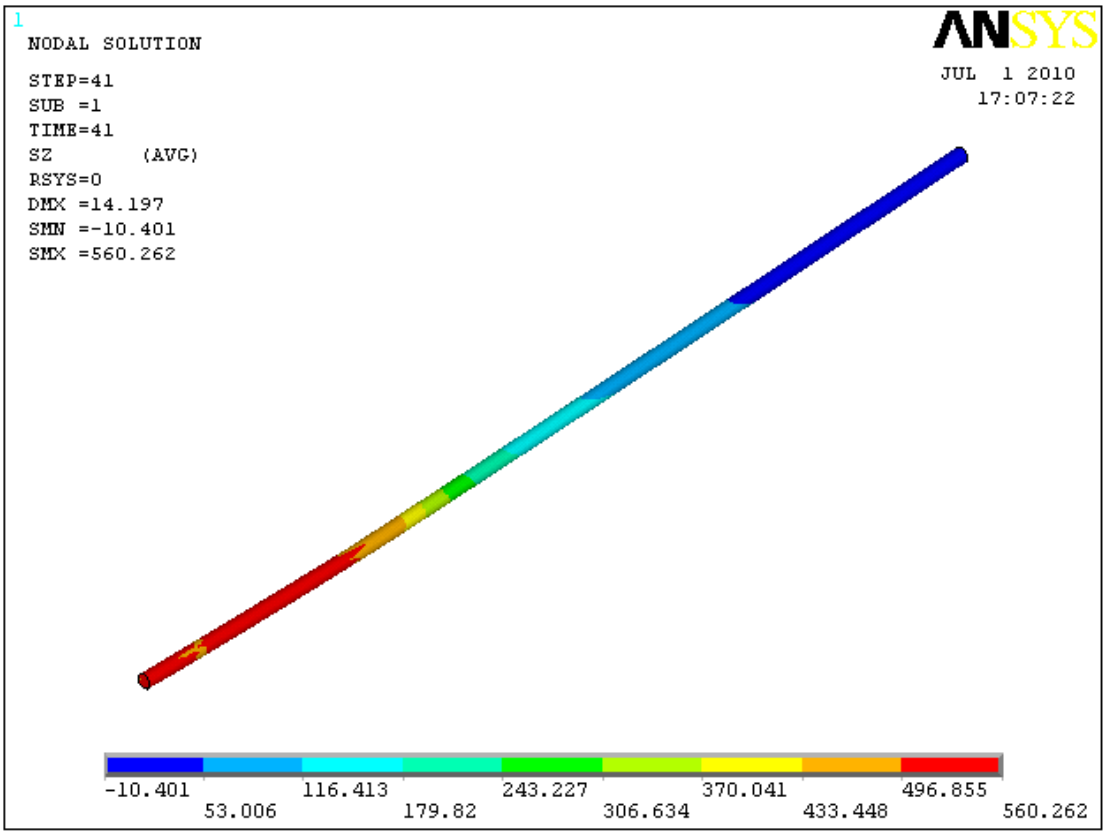
Τασικό πεδίο

Στο σχήμα 4-26 φαίνεται πως οι διατμητικές τάσεις παρουσιάζουν σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή, καθώς επίσης και ότι δεν παρουσιάζουν αυξημένες τιμές στα σημεία όπου σχηματίζονται οι ρωγμές, αντίθετα με ότι συμβαίνει στις δοκούς με οπλισμό FRP.



Σχήμα 4-26 Κατανομή διατμητικών τάσεων στη ράβδο από χάλυβα

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4-27, σε αντίθεση με τις προηγούμενες δοκιμές, στη ράβδο οπλισμού από χάλυβα δεν ασκούνται μόνο εφελκυστικές τάσεις, αλλά εμφανίζονται και θλιπτικές τάσεις με μικρές τιμές. Οι θλιπτικές αυτές τάσεις εμφανίζονται κοντά στις στηρίξεις.



Σχήμα 4-27 Κατανομή ορθών τάσεων στη ράβδο από χάλυβα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διεξήχθησαν τρεις πειραματικές δοκιμές με κάμψη τεσσάρων σημείων σε δοκούς σκυροδέματος είχαν ίδιο ποσοστό αλλά διαφορετικό τύπο οπλισμού. Στις δοκιμές αυτές καταγράφηκαν:

- Το φορτίο που προκάλεσε την έναρξη της ρηγμάτωσης.
- Η ιστορία και ο τύπος σχηματισμού της ρηγμάτωσης κατά την διάρκεια της εξέλιξης των δοκιμών μέχρι την τελική αστοχία των δοκών.
- Το βέλος κάμψης ή η μέγιστη βύθιση των δοκών σαν συνάρτηση του φορτίου των δοκών.
- Το εύρος των ρωγμών σα συνάρτηση του φορτίου καταπόνησης των δοκών.

Από τις καταγραφές αυτές προέκυψαν τα εξής:

- Η ροπή που αντιστοιχεί στη ρηγμάτωση (M_{cr}) είναι περίπου η ίδια και για τις τρείς δοκούς, που σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από το ποσοστό και από τον τύπο οπλισμού. Είναι μια τιμή που εξαρτάται αποκλειστικά από την θλιπτική αντοχή και από τη γεωμετρία της διατομής της δοκού, όπως προβλέπεται και από τη θεωρία κάμψης της αντοχής υλικών που εφαρμόζεται στο σχεδιασμό.
- Ο τύπος σχηματισμού των ρωγμών, που συμβαίνει στις δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP, είναι ο ίδιος ποιοτικά με τον τύπο σχηματισμού ρωγμών σε δοκούς με οπλισμό από χάλυβα. Κατά την ιστορία της φόρτισης σχηματίζεται

μια διαδοχή ρωγμών, η οποία κάποια στιγμή σταθεροποιείται σε αριθμό και σε απόσταση. Οι ρωγμές που σχηματίστηκαν στις πειραματικές δοκούς ήταν κατακόρυφες, δηλαδή ήταν κάθετες στη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα της δοκού. Μέσα σε μια καθαρά καμπτόμενη περιοχή της δοκού η τελική κατάσταση της ρηγμάτωσης αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο αριθμό ρωγμών, που καθορίζεται από τη μεταξύ τους απόσταση, που αποτελεί μια παράμετρο της ρηγμάτωσης και είναι γνωστή ως απόσταση ρωγμών (crack spacing). Στις δύο δοκούς με οπλισμό FRP που μελετήσαμε, η μέση απόσταση των ρωγμών που σχηματίστηκαν ήταν περίπου 10 cm, ενώ στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα ήταν γύρω στα 7 cm. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύουν άλλα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει πάνω στο ζήτημα αυτό για το χάλυβα, και είναι συμβατά με τις θεωρητικές ερμηνείες που έχουν γίνει στις αντίστοιχες δημοσιευμένες μελέτες πάνω στο θέμα αυτό.

- Τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης των δοκών με οπλισμό FRP, για όλη την ιστορία φόρτισης των δοκών, εμφανίζουν μια διγραμμική μορφή, σε αντίθεση με το διάγραμμα φορτίου-βύθισης της δοκού με οπλισμό από χάλυβα. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να επιβεβαιωθεί με παραπέρα δοκιμές και θα πρέπει να δοθεί και η σχετική θεωρητική ερμηνεία για το γεγονός αυτό. Μια πρώτη ερμηνεία που θα μπορούσε να δοθεί είναι ότι η γραμμική μακροσκοπική απόκριση των δοκών με οπλισμό FRP οφείλεται κυρίως στη γραμμική συμπεριφορά του οπλισμού FRP.

- Το εύρος των ρωγμών εξαρτάται δραστικά από τον τύπο οπλισμού. Θα πρέπει να γίνουν περισσότερες δοκιμές προκειμένου να βρεθεί η επίδραση που έχει πάνω στο εύρος των ρωγμών, ο διεπιφανειακός νόμος συνάφειας-ολίσθησης, το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού και το ποσοστό οπλισμού.

- Η σχεδόν γραμμική συμπεριφορά της απόκρισης των δοκών με οπλισμό FRP εμφανίζεται μέχρι την αστοχία των δοκών, που χαρακτηρίζονταν από θρυμματισμό σκυροδέματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τύπος αυτής της

αστοχίας αντιστοιχεί σε υπεροπλισμένες δοκούς και σχηματιζόταν μια επιφάνεια «αποκόλλησης» της θλιβόμενης ζώνης των δοκών.

- Από τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων που προέκυψαν για τις πειραματικές δοκούς με οπλισμό GFRP, CFRP και χάλυβα, προκύπτει ότι η δοκός με GFRP εμφανίζει τη μεγαλύτερη καμπυλότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαθέτει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας.

Η θεωρητική ανάλυση της παρούσας εργασίας περιελάμβανε τη μελέτη των πειραματικών δοκών με πεπερασμένα στοιχεία προσομοιώνοντας κατάλληλα τη γεωμετρία, τα υλικά των δοκών και τη διεπιφανειακή σύνδεση σκυροδέματος-οπλισμού. Η μελέτη περιελάμβανε την ανάλυση των δοκών σε δύο φάσεις: τη μη ρηγματωμένη φάση (Στάδιο I) και τη ρηγματωμένη φάση (Στάδιο II). Από την θεωρητική μελέτη της μη ρηγματωμένης κατάστασης προέκυψαν τα παρακάτω:

- Στο στάδιο αυτό η θεωρητική βύθιση και των τριών δοκών ταυτίζεται σχεδόν με αυτή που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο, με τις τρεις δοκιμές.

- Η διανομή των ορθών τάσεων στις διατομές των δοκών είναι σχεδόν γραμμική, όπως προβλέπεται από τη σχετική καμπτική θεωρία που εφαρμόζεται στο Ο/Σ για το στάδιο αυτό.

- Οι τιμές των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια οπλισμού-σκυροδέματος σε σχέση με τις ορθές τάσεις είναι πάρα πολύ χαμηλές.

- Στο στάδιο αυτό, οι ορθές τάσεις στον οπλισμό είναι πολύ μεγαλύτερες στη περίπτωση του CFRP, απ’ ότι στην περίπτωση του GFRP. Αριθμητικά, οι τιμές που προέκυψαν είναι πολύ κοντά σε αυτές που παρέχει η απλοποιημένη καμπτική θεωρία που εφαρμόζεται στο σχεδιασμό.

Στη ρηγματωμένη κατάσταση, δηλαδή στο Στάδιο II, η θεωρητική καμπύλη βύθισης-φορτίου βρίσκεται πολύ κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες των δοκών. Μικρή απόκλιση παρατηρείται για τιμές του φορτίου κοντά στην αστοχία.

- Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι, κατά το σχεδιασμό, για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, όπου και τα δύο υλικά «δουλεύουν» γραμμικώς ελαστικά, μπορούν να υιοθετηθούν διγραμμικά διαγράμματα βύθισης-φορτίου, ή διαφορετικά, διγραμμικά διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει για την περίπτωση του χάλυβα.

- Σύμφωνα με τα διαγράμματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, παρατηρήθηκαν αυξημένες διατμητικές τάσεις γύρω από της ρωγμές οι οποίες είχαν σχεδόν την ίδια τιμή αλλά αντίστροφο πρόσημο. Η τοπική αυτή ανύψωση των διατμητικών τάσεων επιβεβαιώνει την τοπική βλάβη που έχει υποστεί η διεπιφανειακή σύνδεση στις περιοχές αυτές και εκδηλώνεται με την ανάπτυξη της σχετικής ολίσθησης.

- Τα διαγράμματα εύρους ρωγμών-φορτίου φαίνεται να συμφωνούν αρκετά καλά για την περίπτωση του GFRP, και να αποκλίνουν σημαντικά για την περίπτωση του CFRP. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων για τη συγκεκριμένη περίπτωση, για το νόμο συνάφειας-ολίσθησης χρησιμοποιήθηκαν ενδεικτικά τιμές των παραμέτρων του νόμου αυτού, από τη βιβλιογραφία. Θα πρέπει να διερευνηθεί παραπέρα θεωρητικά και πειραματικά η επίδραση του νόμου συνάφειας-ολίσθησης πάνω στο εύρος των ρωγμών, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα πάνω στο θέμα αυτό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Concrete Institute (ACI). (2003), ‘‘Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with *FRP* Bars’’, 440.1R-03, American Concrete Institute Committee 440, Farmington Hills, Michigan, 2006.

American Concrete Institute (ACI). (2004), ‘‘Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with *FRP* Bars’’, Proposed Revisions, American Concrete Institute Committee 440, Farmington Hills, Michigan.

American Concrete Institute (ACI). (1999). ‘‘Building code requirements for structural concrete. ’’ Standard pp 318-99, ACI, Farmington Hills, Michigan

Alsayed S.H. Flexural Behaviour of concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. Journal of Cement and Concrete Composites, V 20, 1998, pp. 1-11..

Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R. (1996), “Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with *FRP* Reinforcing Bars.” ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 2, 1996, pp. 46–55.

Branson, D. E. (1965). “Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Beams,” HPR Rep. No. 7, Part 1, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Montgomery, Alabama, 1965.

Branson, D. E. (1977), Deformation of concrete structures, McGraw-Hill, New York

Brown, V.L., and Bartholomew, C.L. (1996), “Long-term deflections of GFRP-reinforced concrete beams.’’ Proc, ICCI, Tucson, Ariz., pp 389-400.

Canadian Standards Association (CSA) (1998). Concrete design hand-book: Canadian Standard A23.3-94, 2nd Ed.CSA, Rexdale, Ont., Canada

Canadian Standards Association (CSA) (2002), "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," Concrete design handbook: Canadian Standard S806-02, Toronto, pp. 177.

Faza, S.S., and GangaRao, H. V. S. (1992). "Pre- and postcracking deflection behavior of concrete beams reinforced with fibre-reinforced plastic rebars". *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, K. W. Neale and P. Labossiere, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp 151-160.

Gergely P. and Lutz L.A. (1968), "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members,'' Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete (SP-20), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1968, pp. 87-117, cited in ACI Committee 224 (2001).

ISIS Canada (2001), ''Reinforcing Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymers,'' Design Manual No. 3, ISIS Canada Corporation, Manitoba, Canada, 2001.

Masmoudi R, Theriault M, Benmokrane B. (1998), ''Flexural behavior of Concrete Beams Reinforced with Deformed Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Rods,'' ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 6, Nov.-Dec. 1998.

Nawy, E. G., and Neuwerth, G. E. (1997). "Fiberglass reinforced concrete slabs and beams."*J.Struct.Div. ASCE*, 103(2), pp 421-440

Tighiouart B., Benmokrane B., and Gao D. (1998), ''Investigation of Bond in Concrete Member with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars,'' Construction and Building Materials, Vol. 12,1998, pp. 453-462.

Razaqpur, A.G., Svecova, D., and Cheung, M. S. (2000). “Rational method for calculating deflection of fiber-reinforced polymer reinforced beams.”*ACI Struct. J.*, 97(1), pp 175-184.

Rizakalla, S., and Mufti, A. (2001). Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers-Design manual No. 3, ISIS Canada, Winnipeg, Man., Canada.

Scanlon, A., Lee, J. C., and Bischoff, P. H. (2004).”Tension stiffening models for analysis of concrete structures with steel and FRP reinforcement.” *5th Structural Specialty Conf. of the Canadian Society for Civil Engineering* (CD-Rom), CSCE, Saskatoon, Canada, ST 049 pp 1-8.

Toutanji H. and Saafi M. (2000), ‘‘Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (*GFRP*) Bars.,’’ ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 712-719.

Washa, G. W., and Fluck, P.G. (1952).”Effect of compressive reinforcement on the plastic flow of reinforced concrete beams.” *ACI J.*, 49(8), pp 89-108.

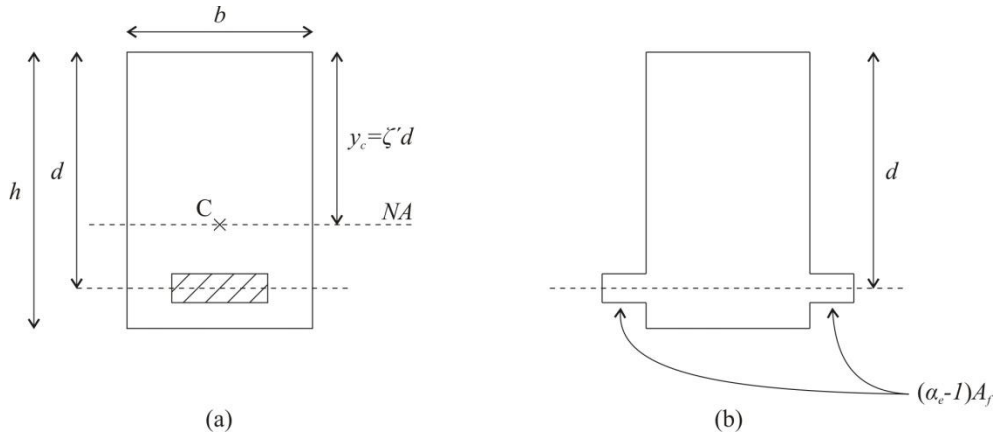
Yost, J. R., Gross, S.P., and Dinehart, D. W. (2003).”Effective moment of inertia for glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete beams.” *ACI J.*, 100(6), pp 732-739.

Yu, W.-W., and Winter, G. (1960). “Instantaneous and long-time deflections of reinforced concrete under working loads.” *ACI J.*, 57(1), pp 29-50.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Α.1.1 **Μη ρηγματωμένη διατομή**



Σχήμα Α - 1 (a) Η διατομή των δοκών, (b) η ισοδύναμη μετασχηματισμένη διατομή

Θέση κέντρου βάρους :

$$y_c = \zeta' d\ ,\ \zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (a_e - 1)\rho_f}{h/d + (a_e - 1)\rho_f}\ , \qquad \text{(A-1)}$$

όπου

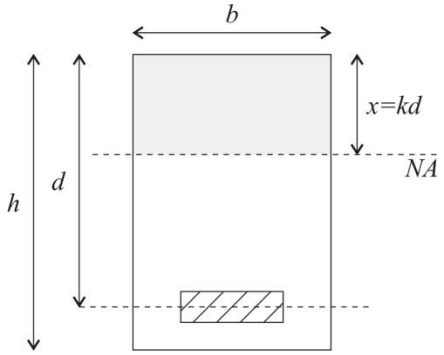
$$\alpha_e = \frac{E_f}{E_c}\ ,\ \rho_f = \frac{A_f}{bd}\ . \qquad \text{(A-2)}$$

Ροπή αδράνειας ως προς άξονα NA:

$$I_{ut} = \frac{bh^3}{12} + \left(0.5 - \zeta' \frac{d}{h}\right)^2 bh^3 + (1 - \zeta')^2 (\alpha_e - 1) A_f d^2$$

(A-3)

A.1.2 **Ρηγματωμένη διατομή**



Σχήμα A - 2 Η διατομή της ρηγματωμένης δοκού

Πάχος θλιβόμενης ζώνης:

$$x = kd\,, \quad k = \sqrt{(\rho_f \alpha_e)^2 + 2\rho_\rho \alpha_e} - \rho_f \alpha_e \qquad \text{(A-4)}$$

Ροπή αδράνειας ως προς άξονα NA:

$$I_{ct} = \frac{1}{3} b d^3 h^3 + \alpha_e A_f d^2 (1-h)^2 \qquad \text{(A-5)}$$

A.1.3 **Λόγος ροπών αδράνειας** I_{ct} / I_{ut}

$$\frac{I_{ct}}{I_{ut}} = \frac{\frac{1}{3} k^3 + (1-h)^2 \alpha_e \rho_f}{\frac{1}{12}\left(\frac{h}{d}\right)^3 + \left(0.5 + \zeta' \frac{d}{h}\right)^2 \left(\frac{h}{d}\right)^3 + (1-\zeta')^2 (\alpha_e - 1)\rho_f} \qquad \text{(A-6)}$$

A.1.4 **Ροπή ρηγμάτωσης και τάση οπλισμού μετά τη ρηγμάτωση**

Ροπή ρηγμάτωσης:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct}\, \mathrm{I_g}}{\mathrm{y_t}}\,, \qquad \text{(A-7)}$$

όπου f_{ct} είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, που βρίσκεται από την εμπειρική σχέση

$$f_{ct} = f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3}, \quad \text{(A-8)}$$

Το f_{ck} δηλώνει την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και το y_t την απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ακραία εφελκυόμενη ίνα της διατομής, και

$$I_g = \frac{b\,h^3}{12}, \quad \text{(A-9)}$$

Η τάση στον οπλισμό *FRP* μετά το σχηματισμό της ρηγμάτωσης:

$$\sigma_{fr} = \frac{M_{cr}}{A_f\ J\ d}, \quad \text{(A-10)}$$

όπου A_f είναι το εμβαδόν του οπλισμού, d το στατικό ύψος της διατομής, και

$$J = 1 - \frac{k}{3}, \quad \text{(A-11)}$$

με

$$k = \sqrt{(\rho_f\ \alpha_e)^2 + 2\,\alpha_e\ \rho_f} - \rho_f\ \alpha_e, \quad \text{(A-12)}$$