



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ**  
**ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

---

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ**  
**ΝΟΜΟΥ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ**  
**ΟΠΛΙΣΜΟΥ FRP-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΠΗΓΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2010**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτήν, με τίτλο «Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ FRP-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ» παρουσιάζονται ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία αποκτήθηκαν στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π., πάνω στη διεπιφανειακή συμπεριφορά ράβδων οπλισμού- σκυροδέματος για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Επίσης, παρουσιάζονται και συζητιούνται οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την συνάφεια του οπλισμού FRP με το σκυρόδεμα, όταν τα σύνθετα αυτά υλικά χρησιμοποιούνται ως κύριος οπλισμός σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Στο πρώτο μέρος, γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών και των πειραμάτων που έχουν δημοσιευτεί και πραγματεύονται την συνάφεια μεταξύ οπλισμού FRP και σκυροδέματος.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται μια νέα πειραματική δοκιμή δοκού για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη και ανακυκλιζόμενη αξονική καταπόνηση της ράβδου, που στηρίζεται στην κάμψη δοκού τεσσάρων σημείων. Η δοκιμή αυτή έχει αναπτυχθεί πρόσφατα στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. Η πειραματική ανάπτυξη της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης βασίζεται στις μετρήσεις παραμορφώσεων που γίνονται κατά μήκος των εμπηγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου και στη μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού με το φορτίο δοκιμής. Σε αντίθεση με την κλασική δοκιμή δοκού, η άρθρωση των δύο τμημάτων της δοκού δοκιμίου της προτεινόμενης δοκιμής θα

πρέπει να παραλαμβάνει και εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτό επιτυγχάνεται με μια μηχανική άρθρωση που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για αυτό τον σκοπό. Το υλικό, οι διαστάσεις και η αγκύρωση της μηχανικής άρθρωσης στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου επιλέχθηκαν, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της αγκύρωσης κατά τον εφελκυσμό της άρθρωσης και η αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος. Για την εκτέλεση της δοκιμής κατασκευάστηκε κατάλληλη διάταξη επιβολής των φορτίων στη δοκό-δοκίμιο, η οποία προσαρμόστηκε στην μηχανή κάμψης τριών σημείων του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π..

Στο τρίτο μέρος της εργασίας, η δοκιμή δοκού που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόζεται για την απόκτηση της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης για δύο συγκεκριμένους τύπους *FRP* του εμπορίου για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Διεξήχθησαν δύο πειραματικές δοκιμές, για ράβδους GFRP και CFRP διαμέτρου 12.7 mm και 7.8 mm αντίστοιχα. Σκοπός των πειραματικών δοκιμών του παρόντος κεφαλαίου ήταν να δειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής της νέας μεθόδου, στην ανάπτυξη τοπικών νόμων συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

## SUMMARY

In this essay, titled “The new beam test for the definition of bond stress-slip law of the interface of Frp reinforcing bars-concrete for recycling load”, some experimental results are presented, which were conducted during researches of the Laboratory of Structural Mechanics and Engineering Structures of School of Rural and Surveying Engineering of N.T.U.A., on the interfacial behaviour of reinforcement bars-concrete for recycling load.

Furthermore, this essay presents and discusses the basic factors, which affect the bond behavior of FRP reinforcement-concrete when the complex materials are used as main reinforcement in structural concrete elements. In the first part, there is an extended bibliographical survey on the researches and the experiments that have been published and deal with the bond behavior between FRP reinforcement and concrete.

In the second part of the essay, a new experimental beam test is introduced in order to define the bond stress-slip curve for a monotonous and recycling axle strain of beam, which is upheld on the 4-spots beam bending. This test has been recently developed in the Laboratory of Structural Mechanics and Engineering Structures of School of Rural and Surveying Engineering of N.T.U.A.. The experimental development of the bond stress-slip curve, is based on the measurements occurred along the embedded parts of reinforcement bars, in the two parts of the test beam and on the transmutation of the distance of the two parts between the beam and the test load. In contradiction with the traditional beam tests, the joint of the two parts of the test beam, in the proposed test, should receive tensile loads too. This can be achieved with a mechanical joint, which was designed and constructed for that purpose. The materials, the dimensions and the embedment of the mechanical joint in the two parts of the test beam were selected in order to avoid the embedment failure during the tensile of the joint and the failure due to the shattered concrete. A suitable load enforcement design on the test beam was constructed for the implementation of the test, which was adjusted to the three spots

bending machine the Laboratory of Structural Mechanics and Engineering Structures of School of Rural and Surveying Engineering of N.T.U.A.

In the third part of the essay, the test bema presented in the previous chapter is used so as to define the bond stress-slip for two specific commercial FRP types for recycling load. Two experimental tests were conducted for GFRP and CFRP bars of 12.7 mm and 7.8 mm respectively. The purpose of the experimental test in the present chapter was to show the possibility of application of the new method in the development of topical bond stress-slip laws for recycling load.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>ΤΟΠΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....</b>	<b>12</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
2.2	ΕΡΕΥΝΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ .....	14
2.2.1	Αντοχή συνάφειας και παράγοντες της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων που επηρεάζουν την συνάφεια .....	14
2.2.2	Η επίδραση της αντοχής σκυροδέματος και άλλων παραμέτρων στην ανοχή συνάφειας.....	23
2.2.3	Συμπεριφορά της συνάφειας σε φόρτιση μακράς διάρκειας .....	29
2.3	ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΣΗ ΑΠΟΣΧΙΣΗΣ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ FRP .....	32
2.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΡΑΒΔΩΝ FRP ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	36
2.4.1	Μοντελοποίηση τοπικής συνάφειας .....	37
2.4.2	Γενική μοντελοποίηση συνάφειας .....	41
2.5	ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑ.....	47
2.5.1	Συνάφεια υπό παρατεταμένη φόρτιση-Δοκιμές ερπυσμού.....	47
2.5.2	Επιπτώσεις της θερμοκρασίας .....	48
2.5.3	Εύρος ρωγμών και συρρίκνωση.....	50
2.5.4	Ολκιμότητα.....	50
2.5.5	Κόπωση και καταστροφή των εμπηγμένων ράβδων FRP.....	52
2.5.6	Επίδραση του περιβάλλοντος στην συνάφεια.....	53

2.6	ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΑΛΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ .....	57
2.6.1	Συνάφεια πλέγματος οπλισμού στο FRP.....	57
2.6.2	Συνάφεια των υφασμάτων σε κατασκευές σκυροδέματος.....	59
2.6.3	Δοκοί με οπλισμό από πλαστικό προφίλ.....	60
2.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	60
<b>3</b>	<b>Η ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. ΤΟΥ Ε.Μ.Π.....</b>	<b>64</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	64
3.2	Η ΝΕΑ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. ΤΟΥ Ε.Μ.Π.....	65
3.2.1	Περιγραφή της νέας δοκιμής .....	65
3.2.2	Οι διαστάσεις της δοκού δοκιμίου για την δοκιμή δοκού .....	69
3.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	70
3.3.1	Προσδιορισμός της ολίσθησης.....	70
3.3.2	Προσδιορισμός της τάσης συνάφειας.....	75
<b>4</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....</b>	<b>78</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	78
4.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ .....	79
4.2.1	Ο τύπος και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων FRP της δοκιμής .....	79
4.2.2	Η σύνθεση του σκυροδέματος της πειραματικής δοκιμής.....	81
4.2.3	Κατασκευή δοκιμίων και εκτέλεση πειραματικών δοκιμίων .....	82

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	84
4.3.1 Πειραματική μεθοδολογία .....	84
4.3.2 Οι πειραματικές καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση (καταγραφή διαγραμμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις).....	85
4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	88
<b>4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>90</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ασφαλής χρήση των ράβδων FRP ως εναλλακτικού οπλισμού σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος αξιώνει συνδυασμένη πειραματική και θεωρητική έρευνα για την διασαφήνιση της μηχανικής απόκρισης των δομικών τους στοιχείων στα φορτία που θα τις καταπονήσουν κατά την διάρκεια της ζωής τους. Στην κατεύθυνση αυτή, ένα από τα βασικότερα αντικείμενα έρευνας είναι η διασαφήνιση και η περιγραφή του μηχανισμού μεταβίβασης των δυνάμεων από το σκυρόδεμα στις ράβδους οπλισμού FRP και αντίστροφα. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία που διαφοροποιούν την συμπεριφορά των ράβδων FRP σε σχέση με αυτήν των ράβδων του χάλυβα είναι το μικρό μέτρο ελαστικότητας των ράβδων FRP, η γραμμική συμπεριφορά τους μέχρι την θραύση, και, σε ορισμένους τύπους, η απουσία νευρώσεων στην εξωτερική τους επιφάνεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά, διαφοροποιούν ποιοτικά την μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP σε σχέση με αυτή που επιδεικνύουν, όταν έχουν οπλιστεί με ράβδους χάλυβα.

Σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, που καταπονούνται με μεγάλα εξωτερικά φορτία, η μεταβίβαση δυνάμεων μεταξύ των ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος γίνεται κυρίως μέσω των διατμητικών δεσμών της διεπιφάνειας. Η περιγραφή της συμπεριφοράς των δεσμών αυτών γίνεται με μια σχέση που συνδέει την διατμητική τάση (συνάφεια)

που αναπτύσσεται σε μια θέση στην διεπιφάνεια, με την σχετική μετατόπιση (ολίσθηση) δύο συνδεδεμένων επιφανειών που παρατηρείται στην ίδια θέση. Η μεταφορά των δυνάμεων μέσω της τάσης συνάφειας είναι βασικής σημασίας σε πολλές πλευρές της συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος, γι' αυτό και η επίτευξη ικανοποιητικής συνάφειας είναι βασικός στόχος στις λεπτομέρειες οπλισμού των δομικών στοιχείων. Η σχέση τάσης συνάφειας – ολίσθησης αποτελεί τον καταστατικό νόμο της διεπιφάνειας και προσδιορίζεται πειραματικά από διάφορα προτεινόμενα μοντέλα.

Στην εργασία αυτήν παρουσιάζονται ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία αποκτήθηκαν στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π., πάνω στη διεπιφανειακή συμπεριφορά ράβδων οπλισμού- σκυροδέματος για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Επίσης, παρουσιάζονται και συζητιούνται οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την συνάφεια του οπλισμού FRP με το σκυρόδεμα, όταν τα σύνθετα αυτά υλικά χρησιμοποιούνται ως κύριος οπλισμός σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Στο πρώτο μέρος, γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών και των πειραμάτων που έχουν δημοσιευτεί και πραγματοποιούνται την συνάφεια μεταξύ οπλισμού FRP και σκυροδέματος.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται μια νέα πειραματική δοκιμή δοκού για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη και ανακυκλιζόμενη αξονική καταπόνηση της ράβδου, που στηρίζεται στην κάμψη δοκού τεσσάρων σημείων. Η δοκιμή αυτή έχει αναπτυχθεί πρόσφατα στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. Η πειραματική ανάπτυξη της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης βασίζεται στις μετρήσεις παραμορφώσεων που γίνονται κατά μήκος των εμπηγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου και στη μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού με το φορτίο δοκιμής. Σε αντίθεση με την κλασική δοκιμή δοκού, η άρθρωση των δύο τμημάτων της δοκού δοκιμίου της προτεινόμενης δοκιμής θα

πρέπει να παραλαμβάνει και εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτό επιτυγχάνεται με μια μηχανική άρθρωση που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για αυτό τον σκοπό. Το υλικό, οι διαστάσεις και η αγκύρωση της μηχανικής άρθρωσης στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου επιλέχθηκαν, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της αγκύρωσης κατά τον εφελκυσμό της άρθρωσης και η αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος. Για την εκτέλεση της δοκιμής κατασκευάστηκε κατάλληλη διάταξη επιβολής των φορτίων στη δοκό-δοκίμιο, η οποία προσαρμόστηκε στην μηχανή κάμψης τριών σημείων του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π..

Στο τρίτο μέρος της εργασίας, η δοκιμή δοκού που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόζεται για την απόκτηση της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης για δύο συγκεκριμένους τύπους *FRP* του εμπορίου για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Διεξήχθησαν δύο πειραματικές δοκιμές, για ράβδους GFRP και CFRP διαμέτρου 12.7 mm και 7.8 mm αντίστοιχα. Σκοπός των πειραματικών δοκιμών του παρόντος κεφαλαίου ήταν να δειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής της νέας μεθόδου, στην ανάπτυξη τοπικών νόμων συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

# **ΤΟΠΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι πιο πρόσφατες οδηγίες σχεδιασμού και οι έρευνες που είναι προσανατολισμένες στο σχεδιασμό, έχουν υιοθετήσει και επεκτείνει τις μεθοδολογίες οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για τις κατασκευές δομικών στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με χάλυβα, στις κατασκευές με οπλισμό FRP. Παρόλα αυτά πολλές πειραματικές μελέτες απέδειξαν ότι ορισμένες βασικές ιδιότητες της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς των ράβδων FRP είναι ποιοτικά και ποσοτικά διαφορετικές από τις γνωστές ιδιότητες των ράβδων χάλυβα. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στις διαφορετικές ιδιότητες του υλικού FRP και στο διαφορετικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού FRP. Παρόλα αυτά μια ορθολογιστική προσέγγιση σχεδιασμού για κατασκευές οπλισμένες με FRP θα πρέπει να αναπτυχθεί με βάση τις θεωρίες που απορρέουν από τα υλικά FRP. Γι' αυτό το λόγο, απαιτείται μια καλύτερη κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς για να αποτιμήσουμε σωστά τους κυρίαρχους παράγοντες που την επηρεάζουν. Αυτό θα οδηγήσει στην ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων και νέων εξισώσεων σχεδιασμού.

Η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν την συμπεριφορά του οπλισμένου και του προεντεταμένου

σκυροδέματος. Στην πρώτη περίπτωση, στην λειτουργικότητα και στην οριακή κατάσταση, η μεταφορά των δυνάμεων μεταξύ των δύο υλικών εξαρτάται αυστηρά από την ποιότητα της σύνδεσης. Οι μηχανισμοί αντοχής όπως αυτοί της κάμψης, της διάτμησης και της στρέψης είναι όλοι συνδεδεμένοι με την ανάπτυξη επαρκούς συνάφειας. Επίσης, πολλοί έλεγχοι λειτουργικότητας, όπως ο έλεγχος του εύρους ρωγμών και της παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων, περιέχει την αποτίμηση της επίδρασης της εφελκυστικής ακαμψίας, η οποία είναι ένα φαινόμενο το οποίο δημιουργείται ευθέως από την σύνδεση των δύο υλικών.

Οι οπλισμοί χάλυβα και FRP αστοχούν κατά ένα ριζικά διαφορετικό τρόπο. Η φιλοσοφία σχεδιασμού οπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα βασίζεται ολοκληρωτικά στις όλκιμες ιδιότητες του χάλυβα, γεγονός που έχει ως απώτερο αντικειμενικό σκοπό να πετύχει μια όλκιμη καμπτική αστοχία εμποδίζοντας όλους τους άλλους τρόπους αστοχίας. Με τον οπλισμό FRP δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια όλκιμη καμπτική αστοχία μέσω της διαρροής του οπλισμού. Συνεπώς, ο προτιμώμενος τρόπος αστοχίας μπορεί να είναι διαφορετικός για διάφορα στοιχεία. Αυτό σημαίνει πως η ελεγχόμενη αστοχία συνάφειας μπορεί να προτιμηθεί από τη θραύση της ράβδου. Σαφώς, απαιτείται μια διαφορετική φιλοσοφία στο σχεδιασμό η οποία αξιώνει μια περισσότερο ακριβή κατανόηση όλων των πιθανών τρόπων αστοχίας. Γι' αυτό το λόγο η τροποποίηση των συμβατικών πρακτικών σχεδιασμού δεν αρκεί στην περίπτωση του οπλισμού FRP κι αυτό είναι ιδιαίτερος έντονο στην περίπτωση της συνάφειας.

Τα τελευταία χρόνια πολλές πειραματικές μελέτες έχουν προσανατολιστεί στην διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων FRP και σκυροδέματος. Αυτές οι μελέτες στοχεύουν είτε στην κατανόηση των μηχανισμών που ενεργοποιούνται στις δοκιμές εξόλκευσης είτε στον καθορισμό των καταστατικών νόμων συνάφειας-ολίσθησης. Ένα state-of-the-art πάνω στην συμπεριφορά συνάφειας ράβδων FRP με διαφορετική επιφανειακή υφή παρουσιάζεται σ' αυτό το κεφάλαιο, ακολουθώντας χρονολογική ροή. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται ο τρόπος αστοχίας σε απόσχιση, και γίνεται μια ανασκόπηση των τοπικών και γενικών αναλυτικών μοντέλων συνάφειας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικά σημαντικά ζητήματα που επηρεάζουν την συνάφεια.

## 2.2 ΕΡΕΥΝΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

### 2.2.1 Αντοχή συνάφειας και παράγοντες της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων που επηρεάζουν την συνάφεια.

Οι Itoh, Maruyama & Nishiyama (1989) πραγματοποίησαν διάφορες πειραματικές δοκιμές σε ράβδους FRP με εξωτερική (ράβδοι άνθρακα, αραμίδιου και γυαλιού). Αυτές οι ράβδοι αρχικά επέδειξαν καλή συνάφεια αρχικά φτάνοντας σε υψηλές τιμές αντοχής συνάφειας (πάνω από 11 MPa), αλλά παρατηρήθηκε μια ψαθυρή συμπεριφορά ως αποτέλεσμα μιας ξαφνικής αστοχίας της διεπιφάνειας μεταξύ κόκκων και ράβδων.

Ο Daniali (1992) εξέτασε την συμπεριφορά των ράβδων με νευρώσεις. Οι νευρώσεις των ράβδων κατασκευάστηκαν με τύλιγμα μιας δέσμης από ίνες γυαλιού σε ένα ελικοειδές σχήμα 45 μοιρών. Εξετάστηκαν 30 δοκίμια και παρατηρήθηκαν οι αστοχίες εξόλκευσης της θραύσης της ράβδου. Στην περίπτωση της αστοχίας εξόλκευσης, το σκυρόδεμα διάτμησε τις νευρώσεις στην επιφάνεια των ράβδων FRP δημιουργώντας μεγάλη ολίσθηση και αστοχία της σύνδεσης.

Οι Terfers, Molander & Thalenius (1992), παρουσίασαν δοκιμές εξόλκευσης με μικρό μήκος αγκύρωσης ερευνώντας τη μέγιστη αντοχή συνάφειας μεταξύ των ράβδων FRP και του περιβάλλοντος σκυροδέματος και την διερεύνηση της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης. Οι δοκιμές έγιναν με 7-σύρματο τένοντα με ίνες άνθρακα (CFCC) και τένοντα 2 x 20 mm<sup>2</sup> με ίνες Arapree, και οι δύο εμποτισμένοι με εποξειδική ρητίνη. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε είχε θλιπτική αντοχή 48 Mpa. Οι σχέσεις συνάφειας-ολίσθησης που αποκτήθηκαν συγκρίθηκαν με αυτές μιας ράβδου οπλισμού με νευρώσεις και ενός 7-σύρματου τένοντα από χάλυβα. Παρατηρήθηκε ότι στις χαμηλές φορτίσεις, η ολίσθηση των ράβδων FRP ήταν μικρότερη από αυτή των ράβδων χάλυβα, αλλά για μεγαλύτερες φορτίσεις η ολίσθηση των ράβδων FRP αυξανόταν και ξεπερνούσε αυτή των ράβδων χάλυβα και των τενόντων. Οι μελετητές ανέμεναν ότι οι ράβδοι FRP θα είχαν μεγαλύτερη εγκάρσια παραμόρφωση λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας

τους σε συνδυασμό την παρόμοια τιμή του λόγου του Poisson με το χάλυβα. Αυτό δόθηκε ως εξήγηση για την χαμηλότερη μέγιστη αντοχή συνάφειας των ράβδων FRP.

Ο Faoro (1992) παρουσίασε αρκετά πειράματα εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπηξης για να συγκρίνει την συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων GFRP που η επιφάνεια τους ήταν καλυμμένη με κόκκους με αυτή των ράβδων GFRP που η επιφάνεια τους έχει υποστεί διάφορες εξωτερικές διεργασίες (π.χ. ράβδοι με επικάλυψη εποξεικής σκόνης, ράβδοι με πολυαμιδική επένδυση). Κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Η χημική πρόσφυση δεν είναι αμελητέα αλλά η αντοχή σε συνάφεια είναι υψηλότερη στην περίπτωση ράβδων που η επιφάνεια τους ήταν καλυμμένη με κόκκους.
2. Οι μέγιστες τάσεις συνάφειας εμφανίζονται σε υψηλότερες τιμές ολίσθησης σε σύγκριση με τις ράβδους από χάλυβα.
3. Οι καμπύλες τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων που η επιφάνεια τους ήταν καλυμμένη με κόκκους είναι παρόμοιες με αυτές των ράβδων χάλυβα με νευρώσεις.

Ο Machida (1993), σε ένα state-of-the-art στο περιοδικό *JSCE*, συγκέντρωσε αποτελέσματα από την Ιαπωνία πάνω σε δοκιμές εξόλκευσης όπου χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι FRP. Οι δοκιμές παρουσιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του *JSCE*. Για ράβδους με ελικοειδείς σπιράλ ίνες ως νευρώσεις στην επιφάνεια τους αναφέρθηκε ότι:

1. Η ολίσθηση του ελευθέρου άκρου των ράβδων FRP με ραβδώσεις είναι μεγαλύτερη από αυτήν των ράβδων χάλυβα με ραβδώσεις,
2. Με κατάλληλη επεξεργασία των νευρώσεων οι ράβδοι FRP είναι ικανές να εξασφαλίσουν αντοχή συνάφειας 10 Mpa και πάνω,
3. Η αντοχή συνάφειας των τενόντων που αποτελούνται από συνεχείς ίνες FRP είναι ίδια ή μεγαλύτερη από αυτή των τενόντων από χάλυβα που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές προεντεταμένου σκυροδέματος,
4. Οι ράβδοι FRP που η επιφάνεια τους είναι καλυμμένη με κόκκους έχουν καλή συμπεριφορά συνάφειας στο αρχικό στάδιο, αλλά η διεπιφάνεια μεταξύ των κόκκων άμμου και των ράβδων αποσπάται απότομα, με αποτέλεσμα η συνάφεια να μηδενίζεται,

5. Οι ράβδοι FRP με νευρώσεις από ίνες σε σπирάλ μορφή δείχνουν διαφορετικές αντοχές συνάφειας που εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο οι σπирάλ ίνες είναι τυλιγμένες και σχηματοποιημένες. Παρόλα αυτά η απόσπαση της διεπιφάνειας μεταξύ των ράβδων και των σπирάλ ινών υποβαθμίζουν την συνάφεια ολοκληρωτικά.

Εξήχθη επίσης ότι η τάση συνάφειας σχεδιασμού δεν θα πρέπει να υπολογίζεται βασισόμενη πάνω στην τάση συνάφειας που προκύπτει σε μια μικρή ολίσθηση της τάξης του 0,002Φ ή 0,005Φ, όπως στην περίπτωση των ράβδων από χάλυβα, αφού η ολίσθηση των ράβδων FRP είναι μεγαλύτερη. Η σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης των τενόντων (CFCC) ποικίλει ανάλογα με το μήκος έμπηξης αλλά η ευαισθησία στην μεταβολή ήταν μικρότερη από αυτή των καλωδίων από χάλυβα. Έρευνα έχει γίνει επίσης πάνω στις πλέξεις από ράβδους FRP με ή χωρίς επικάλυψη άμμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι καλυμμένες με άμμο ράβδοι είχαν αρχικά αντοχή σε συνάφεια όμοια ή μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα, αλλά η τάση συνάφειας δεν αυξανόταν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Ράβδοι χωρίς επικάλυψη άμμου παρουσίασαν αύξηση της τάσης συνάφειας όσο η παραμόρφωση αυξανόταν και η οριακή τάση τελικά έφτασε σε υψηλότερες τιμές από αυτές των καλυμμένων με άμμο ράβδων.

Όταν χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές ρητίνες (1. άκαμπτη εποξειδική, 2.μαλακή εποξειδική 3. πολύ παρά φαινόλη σουλφίδιο ) για να προσδέσουν τους κόκκους άμμου στις επιφάνειες των ράβδων με ίνες φτιαγμένες από θερμοπλαστική ρητίνη και ενισχυμένες με ίνες γυαλιού ή άνθρακα, η αντοχή συνάφειας αυξήθηκε με τη σειρά 2<1<3. Όταν εξετάστηκε σε σχέση με την απουσία των κόκκων άμμου, το πλεονέκτημα της προσκόλλησης κόκκων άμμου βρέθηκε σημαντικό.

Λείες ράβδοι FRP χρησιμοποιήθηκαν επίσης για να αυξήσουν την περιοχή συνάφειας και με επιφάνειες με μικρές ανωμαλίες να αυξήσουν την συνάφεια. Το επίπεδο σχήμα φάνηκε να ευνοεί την απόσχιση του περιβάλλοντος σκυροδέματος από τις δυνάμεις συνάφειας στο επίπεδο της απόσχισης. Οι πολλές μικρές επιφανειακές ανωμαλίες φαίνεται να ευνοούν μια πολύ άκαμπτη σύνδεση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα στις



μέγιστες τάσεις συνάφειας να ευνοείτε μια προοδευτική απόσχιση του σκυροδέματος. Όταν αναπτυχθεί η ρηγμάτωση λόγω απόσχισης η αντοχή συνάφειας πέφτει λόγω των μικρών επιφανειακών ανωμαλιών, με αποτέλεσμα την απώλεια τις συνάφειας.

Οι Makitani, Irisawa & Nishiura (1993) παρουσίασαν δοκιμές συνάφειας με δοκιμές δοκού για να μελετήσουν την συμπεριφορά σε συνάφεια των ράβδων FRP σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Εξετάστηκαν διαφορετικοί τύποι ράβδων με νευρώσεις και με επικαλυμμένη άμμο στην επιφάνεια τους από άνθρακα, αραμίδιο και γυαλί (CFRP, AFRP, GFRP). Σύμφωνα με τους μελετητές η επικαλυμμένη άμμος οδηγεί σε μια αύξηση της χημικής πρόσφυσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής συνάφειας. Παρ' όλα αυτά, η μέγιστη τάση συνάφειας αναπτύσσεται σε πολύ μικρές τιμές ολίσθησης.

Η συμπεριφορά σε συνάφεια των ράβδων με νευρώσεις βρέθηκε να εξαρτάται σοβαρά από την ενεργοποίηση της μηχανικής αλληλεπίδρασης των νευρώσεων με το περιβάλλον σκυροδέμα. Η γεωμετρία της ράβδου, οι ιδιότητες του σκυροδέματος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ράβδου επηρεάζουν την μηχανική αλληλεπίδραση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ράβδοι FRP με νευρώσεις δεν αναπτύσσουν τέτοιο είδος αλληλεπίδρασης και η συμπεριφορά συνάφειας εξαρτάται μόνο από την τριβή και την πρόσφυση. Ο Kanakubo (1993) παρατήρησε μια συμπεριφορά συνάφειας τύπου τριβής σε πειράματα εξόλκευσης πλέξης ράβδων FRP. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Larralde και Silva Rodriguez (1993), στην περίπτωση ράβδων GFRP με σπιράλ περιέλιξη στην επιφάνεια τους. Στην τελευταία περίπτωση, οι μελετητές παρατήρησαν μόνο μια ελαφρά ρηγμάτωση του σκυροδέματος, και συμπέραναν ότι η πρόσφυση και η τριβή είναι τα πρωταρχικά συστατικά της συνάφειας των ράβδων FRP με το σκυροδέμα.

Ο Malvar (1994,1995) ερεύννησε πειραματικά τα χαρακτηριστικά συνάφειας διάφορων τύπων ράβδων GFRP με τις ακόλουθες διαφορετικές επιφανειακές παραμορφώσεις:

ΤΥΠΟΣ Α: οι ράβδοι είχαν ένα εξωτερικό ελικοειδές νήμα, το οποίο παρείχε μια προεξέχουσα νευρώση και μια μικρή εσοχή στην επιφάνεια της ράβδου. Ένα εξωτερικό στρώμα αποτελούμενο αποκλειστικά από πολυεστέρα ή εστέρα βινυλίου τοποθετήθηκε

γύρω από τις ίνες για επιπλέον προστασία. Το πλάτος της νεύρωσης ήταν περίπου 3.2 mm και η καθαρή απόσταση των νευρώσεων 15 mm.

ΤΥΠΟΣ Β: οι ράβδοι είχαν ένα επιφανειακή εσοχή κατά την κατασκευή κι έτσι παρατηρήθηκαν εσοχές αντί για νευρώσεις. Αυτές οι ράβδοι είχαν μεγάλες διαφορές στα επιφανειακά κοιλώματα και ποικιλία στις μηχανικές τους ιδιότητες.

ΤΥΠΟΣ Γ: οι ράβδοι είχαν τις επιφανειακές εσοχές κολλημένες πάνω στο εξωτερικό τους ώστε να δημιουργούν επιφανειακές νευρώσεις. Οι ίνες της ράβδου ήταν εξαιρετικά ευθυτενείς.

ΤΥΠΟΣ Δ: είχαν παρόμοιες εσοχές με την ράβδο ΤΥΠΟΥ Β. Οι ράβδοι είχαν ένα εξωτερικό κάλυμμα για να προστατεύουν τις ίνες.

Τα δεδομένα για τον τοπικό νόμο τάσης συνάφειας-ολίσθησης, όπως επίσης για το διάγραμμα τάσης συνάφειας-αξονικής παραμόρφωσης, τα οποία είναι αναγκαία για την κατασκευή του καταστατικού νόμου των μηχανισμών της διεπιφάνειας, αποκομίστηκαν για διαφέροντα επίπεδα της τάσης περίσφιξης. Επιπλέον στην τάση συνάφειας και η ολίσθηση, καθώς και η αξονική τάση και η αξονική παραμόρφωση θεωρήθηκαν θεμελιώδεις μεταβλητές αναγκαίες στο να εξαχθούν σχέσεις που είναι ανεξάρτητες από την γεωμετρία.

Κάθε δοκίμιο αποτελούταν από μία ράβδο GFRP των 19 mm (#6) εμπηγμένη σε ένα κύλινδρο με διάμετρο 76 mm και μήκος 102 mm με αρχική ρηγμάτωση σκυροδέματος, αρχικά ρηγματωμένο με θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 29 Μρα, που υποβαλλόταν σε ελεγχόμενη αξονοσυμμετρική τάση περίσφιξης. Η ράβδος βρισκόταν σε επαφή με το σκυρόδεμα μόνο για 67 mm (π.χ. μήκος που περιέχει πέντε νευρώσεις της ράβδου). Για κάθε τύπο ράβδου, οι σχέσεις τάσης συνάφειας-αξονικής παραμόρφωσης αποκτήθηκαν για 5 επίπεδα περίσφιξης από αξονοσυμμετρική αξονική πίεση. Αναφέρθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Βαθιές εσοχές και επακόλουθοι κόμποι στις επιμήκεις ίνες μείωναν την αντοχή της ράβδου. Οι ράβδοι διαμέτρου 19 mm που εξετάστηκαν, είχαν ο αντοχή από 448 έως 710 Μρα και μέτρο ελαστικότητας από 28 έως 48 Μρα.

2. Οι ράβδοι τύπου Α, Β και Γ παρουσίασαν έναν μηχανισμό συνάφειας που περιελάμβανε τριβή και μηχανική εμπλοκή. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η μελέτη των δοκιμίων μετά τα πειράματα αποκάλυψε και καταστροφή της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων και εκτενή διάχυση ρωγμών στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Οι ρωγμές αυτού του είδους υποδηλώνουν ότι ενεργοποιήθηκε ένας μηχανισμός αστοχίας από θλίψη του σκυροδέματος από τις νευρώσεις (αλληλεμπλοκής).
3. Μικρές νευρώσεις στην επιφάνεια, περίπου 5.4% της ονομαστικής διαμέτρου της ράβδου (παρόμοια με αυτή του χάλυβα), είναι ικανές να αποδώσουν μέγιστες τάσεις συνάφειας μέχρι 5 φορές την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, παρόμοιες με αυτές που αναπτύσσονται στις ράβδους από χάλυβα. Οι επιφανειακές παραμορφώσεις και εσοχές που δημιουργούνται με τέντωμα εξωτερικού ελικοειδούς καλωδίου είναι αποδεκτές για σκοπούς συνάφειας.
4. Για την ίδια περίσφιξη, η αντοχή συνάφειας μιας ράβδου χάλυβα είναι, κατά μέσο όρο, 1.2 έως 1.5 φορές μεγαλύτερη από την τάση συνάφειας μιας ράβδου FRP.
5. Μεγάλες αυξομειώσεις στο βάθος εσοχής οδήγησαν σε μεγάλες αυξομειώσεις στην αντοχή συνάφειας.
6. Η αντοχή συνάφειας μπορεί να αυξηθεί τρεις φορές αυξάνοντας την τάση περίσφιξης.
7. Οι επιφανειακές παραμορφώσεις που απλώς κολλούνται στην επιφάνεια δεν συνίστανται, αφού μπορεί να χαθεί η σύνδεση τους με την ράβδο με αποτέλεσμα να μην συνεισφέρουν καθόλου στην συνάφεια. Πράγματι, στην περίπτωση των παραμορφωμένων ράβδων τύπου Γ φάνηκε ότι η συμπεριφορά σε συνάφεια ήταν παρόμοια με αυτή των λείων ράβδων χωρίς μηχανική εμπλοκή. Τα πειράματα έδειξαν ότι η αστοχία συνάφειας οφείλεται στην απόσπαση του σπιδάλ, ενώ το σκυροδέμα παραμένει αρηγμάτωτο. Στην περίπτωση αυτή η συνάφεια εξαρτάται από την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και την τάση περίσφιξης.

Οι Hattori et al.(1995) ανέφεραν μια παρόμοια συμπεριφορά για πλέξεις ράβδων CFRP (7.5 mm). Η μελέτη της διεπιφάνειας μετά από δοκιμές εξόλκευσης υπέδειξε ότι η επιφάνεια του σκυροδέματος παραμένει χωρίς βλάβες ενώ η εξωτερική επιφάνεια της

ράβδου είχε καταστραφεί. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση των ελικοειδώς τυλιγμένων ράβδων αραμιδίου (6 mm), υπήρχε μια φαινομενική εξάρτηση της μέγιστης τάσης συνάφειας με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης αναφέρθηκε ότι η συμπεριφορά εξόλκευσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του μητρικού υλικού (ρητίνη) και του σκυροδέματος.

Ο Al-Zahrani (1995) μελέτησε πειραματικά την συμπεριφορά των λείων εστερικών ράβδων γυαλιού-βινυλίου αφού αφαίρεσε το καθαρό στρώμα ρητίνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια αύξηση της αντοχής συνάφειας ( 5 φορές υψηλότερη από αυτή των αμετάβλητων λείων ράβδων ) οφειλόμενη στην " επίδραση του αφαιρούμενου δέρματος, αποδεικνύοντας ότι η κατάσταση της επιφάνειας της ράβδου (σύνθεση του καθαρού επιφανειακού ρητινικού στρώματος και της λείανσης του) επηρεάζει καθαρά την πρόσφυση και την τριβή.

Οι Jerret & Ahmad (1995) εκτέλεσαν πειράματα εξόλκευσης μικρού μήκους σε ράβδους CFRP διαμέτρου 8 mm. Οι ράβδοι με μήκος έμπηξης 152 mm, 305 mm και 457 mm είχαν τοποθετηθεί κάθετα σε πλάκες σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν λείες ράβδοι και ράβδοι με νευρώσεις. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 44.8 Mpa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για την συνάφεια λείων ράβδων CFRP έδειξαν ότι η μέση αντοχή συνάφειας των 0.417 Mpa ήταν πολύ χαμηλή σε σχέση με την αντοχή της ράβδου. Η μέγιστη αντοχή συνάφειας αυξανόταν ανάλογα με το μήκος έμπηξης. Δεν υπήρχε μετατόπιση του ελεύθερου άκρου της ράβδου πριν το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης. Η συμπεριφορά των ράβδων CFRP με νευρώσεις ήταν σημαντικά καλύτερη, με 2 ως 5 φορές υψηλότερες αντοχές συνάφειας. Παρόλα αυτά, υπήρχε μια αρχική μετακίνηση του ελεύθερου άκρου σε σύγκριση με τις λείες ράβδους ακολουθούμενη από μια σημαντική αύξηση της συνάφειας. Το φορτίο στην αρχική μετακίνηση του ελεύθερου άκρου και το μέγιστο φορτίο αυξάνονταν σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του μήκους έμπηξης. Η μέση τάση συνάφειας των ράβδων με νευρώσεις στην αρχική μετατόπιση του ελεύθερου άκρου ήταν 1.63 Mpa, και η αντοχή συνάφειας ήταν 7.44 Mpa.

Οι Tamuzs et al. (1995) ερεύνησαν την συνάφεια μεταξύ ράβδων FRP και σκυροδέματος σε δοκιμές εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπηξης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ένα ειδικά σχεδιασμένο ολκιμο τύπο ράβδου με κυλινδρικό κοίλο πυρήνα και ίνες γυαλιού πλεγμένες γύρω του. Η επιφάνεια αποτελούταν από τις πλέξεις ινών καλυμμένες με πολυεστερική ρητίνη. Το σκυρόδεμα είχε θλιπτική αντοχή 48 Μpa. Η αστοχία προκλήθηκε λόγω της διάτμησης των ανομοιογενειών της ρητίνης και μερικώς εξωτερικών πλέξεων. Μετά το μέγιστο φορτίο η παραμόρφωση αυξήθηκε πολύ και η σύνδεση παρουσίασε πλαστική συμπεριφορά. Η διατμητική αστοχία συνάφειας της ρητίνης και η τριβή ολίσθησης στην διεπιφάνεια ρητίνης-σκυροδέματος θεωρούνται ευκολότερα στο να ελεγχθούν από την αντοχή συνάφειας του σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να επιτύχει τον έλεγχο της ολκιμότητας του μέλους του σκυροδέματος με τον περιορισμό της μέγιστης αντοχής συνάφειας της ράβδου εισάγοντας μια ολκιμότητα της σύνδεσης.

Οι Al-Zahrani Nanni, Al Dulaijan & Bakis (1996) χρησιμοποίησαν πειράματα άμεσης εξόλκευσης για να μελετήσουν την συμπεριφορά τυποποιημένων ράβδων γυαλιού/βινυλοεστέρα (GV), άνθρακα/βινυλοεστέρα (CV) και άνθρακα/εποξειδίου (CE) με αξονοσυμμετρικές νευρώσεις. Μετρήθηκε το φορτίο και η ολίσθηση του ελεύθερου άκρου των ράβδων FRP και η εσωτερική διανομή των τάσεων κατά μήκος της ράβδου (αξονική και δακτυλιοειδής κατεύθυνση). Μελετήθηκαν οι ράβδοι γυαλιού/βινυλοεστέρα με 5 και 10 νευρώσεις και διαφορετικά πλάτη και ύψη νευρώσεων. Αυξάνοντας το μήκος έμπηξης δεν αυξανόταν γραμμικά το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης λόγω της προοδευτικής εμφάνισης αστοχίας των νευρώσεων. Η συνάφεια μεταξύ των τυποποιημένων ράβδων FRP και του σκυροδέματος ελέγχονταν από μηχανική αλληλεμπλοκή των νευρώσεων με το σκυρόδεμα και την διατμητική αντοχή των νευρώσεων. Μετά την διάτμηση των νευρώσεων, η τριβή μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος κυριαρχούσε στον μηχανισμό συνάφειας. Οι ράβδοι FRP (G/V, C/V και C/E) είχαν συγκρίσιμα διαγράμματα διατμητικής τάσης-ολίσθησης και παρουσίασαν τον ίδιο τρόπο αστοχίας (διάτμηση των νευρώσεων). Η αντοχή της συνάφειας φάνηκε να επηρεάζεται περισσότερο από τον τύπο της ρητίνης παρά από τον τύπο των. Οι ράβδοι G/V και C/V είχαν παρόμοιες τιμές διατμητικής αντοχής, η οποία ήταν το 60 με 70 %

αυτής των ράβδων C/E. Όταν χρησιμοποιούταν επαρκή επικάλυψη σκυροδέματος για να αποφευχθεί η απόσχιση του σκυροδέματος, ο μηχανισμός της αστοχίας ήταν ανεξάρτητος από την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, αφού η αστοχία ελεγχόταν από την αστοχία της επιφάνειας του FRP. Τα μήκη έμπηξης και τα ύψη των νευρώσεων που ερευνήθηκαν δεν είχαν καμία επίδραση στον τύπο της αστοχίας. Ο διπλασιασμός του μήκους έμπηξης και του αριθμού των νευρώσεων μείωσε την ονομαστική διατμητική αντοχή.

Οι Gowripalan και Chiang (1996) διεξήγαγαν δοκιμές εξόλκευσης με την τεχνική SEM. Συγκρίθηκαν τένοντες CFCC, Fibra, Leadline και χάλυβα. Χρησιμοποιήθηκε επίσης σκυρόδεμα με σκόνη πυριτίου, αφού αυτή μπορεί να κλείσει τους πόρους κοντά στην επιφάνεια του οπλισμού. Οι τένοντες CFCC επέδειξαν την μεγαλύτερη αντοχή συνάφειας χάρις το εξωτερικό στρώμα με σταυρωτές ίνες και την διανομή των επιμηκών ινών. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι η συνάφεια τενόντων FRP με το σκυρόδεμα είναι καλύτερη από την συνάφεια των τενόντων από χάλυβα

Οι Freimanis, Bakis, Nanni και Gremel (1998) ερεύνησαν πειραματικά και αναλυτικά ράβδους GFRP για να καθορίσουν την επήρεια της γεωμετρίας της ράβδου στην αντοχή συνάφειας. Οι ράβδοι είχαν στην επιφάνειά τους εσοχές με διαφορετικό βάθος και κλίση ως προς τον άξονα της ράβδου. Η μέγιστη αντοχή συνάφειας αυξανόταν με την αύξηση του βάθους της εσοχής, αλλά δεν παρουσίαζε καμία συγκεκριμένη εξάρτηση από την κλίση. Αναφέρθηκε ότι μια αύξηση του στρώματος άμμου αύξανε σημαντικά την αντοχή συνάφειας. Η ολίσθηση του φορτιζόμενου άκρου και του ελεύθερου άκρου αυξανόταν με την αύξηση του μήκους έμπηξης και την μείωση της διαμέτρου της ράβδου και ήταν σχετικά σταθερές για ράβδους με παρόμοιο λόγο μήκους έμπηξης και διαμέτρου.

Οι Larralde, Mueller-Rochholz, Schneider και Willmann (1998) πραγματοποίησαν πειράματα εξόλκευσης και πειράματα δοκού για να ερευνήσουν την αντοχή συνάφειας των ράβδων γυαλιού και αραμιδίου (Arapree) και να την συγκρίνουν με αυτή των ράβδων χάλυβα. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ποίκιλε μεταξύ 27-41 MPa. Οι ράβδοι αραμιδίου, οι οποίες έχουν σχετικά ομαλή επιφάνεια τύπου γυαλόχαρτου,

παρουσίασαν την χαμηλότερη αντοχή συνάφειας. Οι ράβδοι GFRP παρουσίασαν μόνο μια μικρή αύξηση στην αντοχή συνάφειας παρά τα κοιλώματα που προέρχονταν από τυλιγμένες ίνες γύρω από τις ράβδους. Αντίθετα με το χάλυβα, φαίνεται ότι υπήρχε μια θετική επιρροή της επιβαλλόμενης εγκάρσιας τάσης στην δοκό στην αντοχή συνάφειας των ράβδων GFRP και AFRP.

## **2.2.2 Η επίδραση της αντοχής σκυροδέματος και άλλων παραμέτρων στην αντοχή συνάφειας**

Οι Shima, Suga και Honma (1993) χρησιμοποίησαν ράβδους με πλέξεις αραμιδίου, τένοντες αποτελούμενους από 7 σύρματα από άνθρακα και συμβατικά 7-σύρματους τένοντες από χάλυβα σε δοκιμές εξόλκευσης μιας πλευράς. Η τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης αποκτήθηκε από την διανομή της παραμόρφωσης κατά μήκος της εμπηγμένης ράβδου. Το μήκος έμπηξης ήταν αρκετά μεγάλο για να μην υπάρχει ολίσθηση στο ελεύθερο άκρο. Οι πειραματικές παράμετροι λάμβαναν υπόψη τους τύπους υλικών των ράβδων ( πλέξη ίνας αραμιδίου, 7-σύρματος τένοντας CFRP, 7-σύρματος τένοντας χάλυβα ), την διάμετρο ράβδου (12-16 mm ) και την αντοχή σκυροδέματος (38-84 MPa ). Οι ερευνητές κατέληξαν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης μιας ράβδου τυλιγμένης με ίνα αραμιδίου διαφοροποιούταν ανάλογα με την πειραματική μέθοδο.
2. Το σχήμα των τοπικών καμπύλων τάσης συνάφειας-ολίσθησης διέφερε ανάλογα με τον τύπο της ράβδου. Η τάση συνάφειας-ολίσθησης μιας ράβδου αραμιδίου τυλιγμένης με ίνες έδειξε χαμηλή αρχική ακαμψία και καθόλου ολίσθηση μετά την μέγιστη τάση, ενώ οι τένοντες CFRP και χάλυβα έδειξαν υψηλή αρχική ακαμψία και ολίσθηση μετά την μέγιστη τάση συνάφειας.
3. Η τάση συνάφειας των καλωδίων CFRP και χάλυβα ήταν κατ' αναλογία ανάμεσα στο 1/3 και το 2/3 της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Για ράβδο με τυλιγμένη ίνα αραμιδίου, υπήρχε μια μικρή επίδραση της αντοχής σκυροδέματος στη τάση συνάφειας.

4. Η τοπική ολίσθηση ήταν ανάλογη με την διάμετρο της ράβδου στην τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων με ίνες αραμιδίου στην επιφάνεια του.

Οι Shima και Suga (1993) ερεύνησαν μέσω δοκιμών συνάφειας με προένταση την τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων με ίνες αραμιδίου τυλιγμένες στην επιφάνειά τους. Οι τοπικές σχέσεις τάσης συνάφειας-ολίσθησης αποκτήθηκαν από την κατανομή της παραμόρφωσης κατά μήκος της εμπηγμένης ράβδου. Το μήκος έμπηξης ήταν αρκετά μεγάλο ώστε να μην προκαλέσει αλλαγή της παραμόρφωσης στο κέντρο του δοκιμίου. Η αντοχή σκυροδέματος ήταν η κύρια πειραματική μεταβλητή. Συμπεριλήφθηκε ότι:

1. Η τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων με ίνες αραμιδίου τυλιγμένες στην επιφάνειά τους ποίκιλε ανάλογα με την μέθοδο της δοκιμής. Η τάση συνάφειας που αποκτήθηκε από την προεντεταμένη δοκιμή συνάφειας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αποκομίστηκε από τη δοκιμή εξόλκευσης με μεγάλο μήκος έμπηξης. Η τάση συνάφειας που αποκομίστηκε από την δοκιμή εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπηξης είναι ανάμεσα στις δύο παραπάνω τάσεις συνάφειας.
2. Η επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στην τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης συνάφειας των ράβδων με ίνες αραμιδίου τυλιγμένες στην επιφάνειά τους διέφερε επίσης με την μέθοδο της δοκιμής. Η τάση συνάφειας σε δεδομένη ολίσθηση αυξάνεται αξιοσημείωτα με την αντοχή σκυροδέματος σε μια προεντεταμένη δοκιμή συνάφειας, αν και η επίδραση της αντοχής σκυροδέματος στην τάση συνάφειας είναι μικρή στην δοκιμή εξόλκευσης με μεγάλη έμπηξη.

Στον Καναδά, ερευνητές στο πανεπιστήμιο του Sherbrooke, διεξήγαγαν δύο σειρές πειραμάτων ερευνώντας την συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων GFRP, αρχικά σε απευθείας εξόλκευση και μετά σε δοκιμές δοκού. Οι ράβδοι GFRP, προμηθευμένες από Καναδό κατασκευαστή (*Pultrall Inc.*), είχαν μια λεία επιφάνεια στην οποία προστέθηκαν ελικοειδής ίνες στην επιφάνεια τους και κόκκοι άμμου. Η εφελκυστική αντοχή τους ήταν γύρω στα 700 MPa και το μέτρο ελαστικότητας γύρω στα 45 GPa. Και στις δύο σειρές χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κανονικής και υψηλής αντοχής



( $f_{cy} = 30$  και  $80$  MPa).

Στην πρώτη σειρά Chaallal και Benmokrane (1993), οι ράβδοι GFRP ήταν εμπηγμένοι κάθετα σε κυλίνδρους σκυροδέματος διαστάσεων  $150 \times 300$  mm έχοντας μήκη αγκύρωσης 5 ή 10 φορές την διάμετρο της ράβδου. Εξετάσθηκαν 3 διάμετροι ράβδων (12.7 mm, 15.9 mm, 19.1 mm) σε ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών. Τα κυριότερα συμπεράσματα από τις δοκιμές ήταν τα εξής:

1. Η αντοχή συνάφειας των ράβδων GFRP με νευρώσεις που ήταν εμπηγμένες σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής είναι παρόμοια με την αντοχή συνάφειας ράβδων που ήταν εμπηγμένοι σε σκυρόδεμα κανονικής αντοχής. Η αντοχή συνάφειας των ράβδων γυαλιού σε σκυρόδεμα κανονικής αντοχής είχε τιμές από 11.1 έως 15.1 MPa με μέση τιμή την 12.9 MPa. Οι τιμές αυτές είναι το 62 % με 84 % της αντοχής των ράβδων από χάλυβα.
2. Η αντοχή συνάφειας των ράβδων FRP δεν εξαρτάται από την αντοχή του σκυροδέματος με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση του χάλυβα (για αντοχές σκυροδέματος 30, 80 MPa). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η διαφορά μεταξύ ράβδων FRP και χάλυβα οφείλεται στο γεγονός ότι οι επιφανειακές νευρώσεις των ράβδων GFRP δεν φαίνεται να είναι ικανές να παρέχουν πλευρική περίσφιξη μέσω της ώθησης των νευρώσεων.
3. Ένα μήκος αγκύρωσης 20 φορές την διάμετρο είναι απαραίτητο για να φτάσουμε την οριακή εφελκυστική αντοχή των ράβδων.

Στην δεύτερη σειρά οι Benmokrane, Chaalal και Tighiouart (1996) ετοιμάστηκαν 20 δοκιμές δοκού σύμφωνα με τις οδηγίες της RILEM/CEB (1978). Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές διαμέτροι ράβδων οπλισμού (12.7, 15.9, 19.1 και 25.4 mm) και το μήκος έμπηξης σε όλα τα δοκίμια ήταν ίσο με 10 φορές την διάμετρο. Όλα τα δοκίμια GFRP αστόχησαν σε εξόλκευση και σε μερικά από αυτά υπήρχαν ενδείξεις ότι οι νευρώσεις των ράβδων οπλισμού είτε διατημήθηκαν είτε καταστράφηκαν. Τα κύρια συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτή την σειρά είναι τα εξής:

1. Η μέγιστη αντοχή συνάφειας των ράβδων οπλισμού GFRP ποικίλει μεταξύ 6.4 και 10.6 MPa, που είναι μικρότερη από αυτήν των ράβδων χάλυβα, περίπου 60 με 90% ανάλογα με την διάμετρο της ράβδου.
2. Η παρατηρούμενη αντοχή συνάφειας στις δοκιμές εξόλκευσης ήταν 5 ως 80% υψηλότερη από αυτή αποκομίστηκε στις δοκιμές δοκού ανάλογα την διάμετρο της ράβδου.
3. Η διανομή των τάσεων συνάφειας κατά μήκος του μήκους έμπηξης των ράβδων GFRP βρέθηκε μη γραμμική και παρόμοια με αυτή του χάλυβα. Η μέγιστη τάση συνάφειας μετακινήθηκε προοδευτικά προς το ελεύθερο άκρο της ράβδου όσο η φόρτιση αυξανόταν.

Οι Alunno, Rossetti, Galeota και Giammatteo (1995) ερεύνησαν τις τοπικές σχέσεις τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων GFRP εμπηγμένες σε σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα που αποκομίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός μοντέλου της σχέσης τάσης-ολίσθησης και για την εκτίμηση του μήκους αγκύρωσης που είναι αναγκαίο για την έμπηξη αυτών των ράβδων σε στοιχεία σκυροδέματος.

Οι Benmokrane και Masmoudi (1996) μελέτησαν την αντοχή συνάφειας και τον δείκτη τροποποίησης για σκυροδέτηση της πάνω εξωτερικής επιφάνειας ράβδων CFRP. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής  $f_{cc} = 52$  MPa χρησιμοποιήθηκε σε δοκιμές εξόλκευσης με μήκος έμπηξης ίσο με 5 φορές την διάμετρο της ράβδου. Συμπεράθηκε ότι η μέση αντοχή συνάφειας ήταν περίπου 15.8 MPa ο παράγοντας τροποποίησης του για σκυροδέτηση της πάνω εξωτερικής επιφάνειας ράβδων CFRP ήταν 1.1. Μετά την μέγιστη αντοχή συνάφειας, η αντίσταση ολίσθησης της ράβδου σταθεροποιήθηκε στο επίπεδο του περίπου 55 % της μέγιστης αντοχής.

Οι Achillides, Pilakoutas και Waldron (1997) παρουσίασαν σειρές πειραμάτων όπου πάνω από εκατό δοκίμια εξετάστηκαν σε απευθείας εξόλκευση με μικρό μήκος έμπηξης για να ερευνηθεί η συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων *EUROCRETE FRP*. Οι ράβδοι *EUROCRETE FRP* χρησιμοποιούν γυαλί και άνθρακα, έχουν τραχεία επιφάνεια που παράγεται από μια φλούδα και είναι κατασκευασμένες σε διαφορετικές διαμέτρους και

σχήματα. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν σε αστοχία εξόλκευσης. Αναφέρθηκε ότι το είδος της αστοχίας των ράβδων FRP διέφερε ουσιαστικά από την αντίστοιχη αστοχία συνάφειας των ράβδων από χάλυβα. Για αντοχές σκυροδέματος μεγαλύτερες των 30 MPa, η αστοχία συνέβη στην επιφάνεια της ράβδου με την αποκόλληση ενός μέρους του επιφανειακού στρώματος της ράβδου. Για αντοχές σκυροδέματος μικρότερες των 15 MPa το σκυρόδεμα θρυμματίστηκε μπροστά στις νευρώσεις της ράβδου και η αντοχή συνάφειας καθορίστηκε κυρίως από την διατμητική αντοχή του σκυροδέματος. Οι σειρές των κυβικών δοκιμών εξόλκευσης μεγιστοποίησε κάποιους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή συνάφειας στις ράβδους FRP. Η επίδραση των παραγόντων αυτών συνοψίζεται στα εξής:

1. Τύποι ινών ράβδου: Δεν βρέθηκε καμία σημαντική διαφορά μεταξύ των αντοχών συνάφειας που αναπτύχθηκαν στις ράβδους GFRP και CFRP. Οι ράβδοι GFRP και CFRP μπορούν να αναπτύξουν αντοχή συνάφειας ίση με 80 % αυτής που αναπτύσσουν οι ράβδοι χάλυβα με νευρώσεις.
2. Μήκος έμπηξης: Η αύξηση του μήκους έμπηξης συνοδεύεται με μείωση της αντοχής συνάφειας.
3. Αντοχή σκυροδέματος: Η αντοχή σκυροδέματος επηρεάζει την αντοχή συνάφειας μόνο όταν έχουμε αστοχία του σκυροδέματος.
4. Διάμετρος της ράβδου: Ράβδοι μικρότερης διαμέτρου (8.5 mm) αναπτύσσουν υψηλότερη αντοχή συνάφειας από ράβδους μεγαλύτερης διαμέτρου (13.5 mm). Η διαφορά αυτή φαίνεται να είναι πιο σημαντική στις ράβδους FRP παρά στις ράβδους χάλυβα, λόγω της χαμηλής αξονικής διατμητικής ακαμψίας.
5. Σχήμα της διατομής της ράβδου: Η τετράγωνες ράβδοι αναπτύσσουν υψηλότερη αντοχή συνάφειας από τις κυκλικές ράβδους. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στην δράση βλήτρου λόγω του σχήματος της διατομής.
6. Επιφανειακές ραβδώσεις: Απαιτείται ένα ελάχιστο ύψος για να αναπτυχθεί ικανοποιητική συνάφεια στο σκυρόδεμα.

Οι Takagi, Kojima, Iwamoto και Inoue (1997) μελέτησαν την συνάφεια ράβδων FRP με την δοκιμή δοκού κατά *RILEM* κάτω από στατική φόρτιση και φόρτιση κόπωσης. Χρησιμοποιήθηκαν πλέξεις από ράβδους αραμιδίου και τένοντες από άνθρακα. Η

θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ήταν 65 MPa και οι διάμετροι των ράβδων 7.2-7.5 mm. Η συνάφεια επηρεάστηκε από την εισαγωγή της προέντασης, την μέθοδο φόρτισης, το μήκος έμπηξης και τον τύπο της ράβδου. Αυτές οι επιδράσεις ήταν πιο σημαντικές για τις πλέξεις ράβδων.

Οι Kono, Inazumi και Kaku (1997) μελέτησαν την περίσφιξη που εξασφαλίζεται από φύλλο ινών άνθρακα με σκοπό την αντίσταση στην απόσχιση του σκυροδέματος. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος αποφασίστηκε για τους περισφιγμένους κυλίνδρους με τρεις στρώσεις φύλλων να είναι έως και 3 φορές αυτή των απερίσφικτων (~ 35 MPa). Μια στρώση από φύλλο CFRP αύξησε την αντοχή συνάφειας περίπου κατά 80 %. Οι δοκιμές συνάφειας πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια και δοκάρια "Schmidt-Thro". Το φύλλο FRP εμπόδιζε την ψαθυρή αστοχία απόσχισης και αύξησε την ικανότητα ανάληψης φορτίου. Τα μισοτυλιγμένα δοκίμια επέδειξαν αστοχία συνάφειας των φύλλων. Τα πλήρως τυλιγμένα δοκίμια απέδωσαν καλύτερη περίσφιξη.

Οι Kachlakev και Lundy (1998) εκτίμησαν τη συνάφεια ράβδων GFRP με κοιλότητες, με παρόμοια γεωμετρία, αλλά με διαφορετική μικροδομή, σε σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή μεταξύ 17.9-22.4, 35.0-39.2 και 48-53 MPa. Χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης με τοποθέτηση των ράβδων στον άξονα και εκτός αυτού. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης διαφορετικά μήκη έμπηξης. Η αντοχή του σκυροδέματος φάνηκε να μην επηρεάζει καθόλου την αντοχή συνάφειας, γεγονός που δείχνει ότι οι νευρώσεις στην επιφάνεια της ράβδου αστόχησαν. Η τάση συνάφειας στα αξονομετρικά δοκίμια ήταν 200% υψηλότερη από αυτή των ράβδων που είχαν τοποθετηθεί εκτός άξονα.

Οι Tighiouart, Benmokrane και Gao (1998) πραγματοποίησαν πειράματα με δοκιμές δοκού κατά *RILEM* και δοκιμές εξόλκευσης ράβδων με διαφορετικές κατευθύνσεις σκυροδέματος. Έγινε σύγκριση με τη συνάφεια των ράβδων χάλυβα. Το συμπέρασμα ήταν πως προκειμένου για ράβδους GFRP, η πρόσφυση και η τριβή ελέγχουν την αντοχή συνάφειας. Ο παράγοντας τροποποίησης για ράβδους που είναι τροποποιημένοι στο πάνω μέρος της διατομής κυμάνθηκε από 1.26 έως 1.32 και αυξανόταν, όσο η διάμετρος της ράβδου μειωνόταν.

Οι Greco, Manfredi, Pecce και Realfonzo (1998) διεξήγαγαν έρευνα για τις ιδιότητες συνάφειας των ράβδων CFRP, με τη χρήση πρισματικών δοκιμίων σκυροδέματος. Η ράβδος GFRP ήταν διαμέτρου 12.7 mm και το μήκος της επιφάνειας επαφής  $L$  κυμάνθηκε από 5 έως 20 φορές τη διάμετρο της ράβδου  $d_b$ . Τα κυριότερα συμπεράσματα ήταν τα ακόλουθα:

1. Στην περίπτωση μικρού μήκους αγκύρωσης (5 φορές τη διάμετρο της ράβδου), υπήρχε αστοχία εξόλκευσης, χωρίς απόσχιση με τιμές της αντοχής συνάφειας πάνω από 11 MPa (με μια μικρή διάχυση), παρόμοια με αυτή των ράβδων από χάλυβα.
2. Παρατηρήθηκαν μικρές τιμές ολίσθησης, αλλά με μεγάλη διαφορά στην ολίσθηση μεταξύ του ελεύθερου και του φορτισμένου άκρου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο μικρό μέτρο ελαστικότητας και δυσχεραίνει την ανάπτυξη απλών καταστατικών νόμων συνάφειας-απόσχισης.
3. Στην περίπτωση μεγαλύτερου μήκους έμπηξης (10 έως 20  $d_b$ ), προέκυψε αστοχία εφελκυσμού της ράβδου.

### 2.2.3 Συμπεριφορά της συνάφειας σε φόρτιση μακράς διάρκειας.

Ο Nanni et al. (1995) διενήργησαν έρευνα, σκοπεύοντας στην ανάπτυξη πειραματικών δοκιμών που θα λαμβάνουν υπ' όψιν την μακροχρόνια μείωση της αντοχής συνάφειας των ράβδων FRP, σε σχέση με τις ελαστικές παραμέτρους, την ψαθυροποίηση και την αντοχή του υλικού FRP. Έγιναν δοκιμές άμεσης εξόλκευσης, με μήκος έμπηξης 5 φορές τη διάμετρο της ράβδου. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ομάδες ράβδων FRP, διαφορετικής σύστασης και επιφανειακής υφής. Η πρώτη ομάδα αναφοράς αποτελούταν από λείες ή μηχανικά επεξεργασμένες (αξονοσυμμετρικές αυλακώσεις) ράβδους FRP. Οι ράβδοι της ομάδας αναφοράς κατασκευάστηκαν με μητρικό υλικό των ακόλουθων συστημάτων: γυαλί-εστέρας βινυλίου (GV), άνθρακας-εστέρας βινυλίου (CV) και άνθρακας-εποξύ (CE). Η δεύτερη ομάδα αποτελούνταν από ράβδους FRP που διατίθενται στο εμπόριο (τένοντας άνθρακα CFCC με διάμετρο 12.7 mm και τένοντα από

μόλυβδο διαμέτρου 8 mm) και συμβατικές ράβδους από χάλυβα με νευρώσεις (διαμέτρου 9.5 και 12.7 mm). Μετρήθηκε η κατανομή της παραμόρφωσης κατά μήκος της έμπηξης της ράβδου FRP. Τα κύρια συμπεράσματα ήταν τα εξής:

1. Σε λείες ράβδους, η αντοχή συνάφειας δεν εξαρτάται από την αντοχή του σκυροδέματος. Η τριβή φαίνεται να παίζει τον κυριότερο ρόλο στην αντοχή εξόλκευσης, αφού η πρόσφυση εξαφανίζεται αμέσως μόλις η ράβδος ολισθήσει σε σχέση με σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, το φινίρισμα και η σύσταση του πλούσιου σε ρητίνη επιφανειακού στρώματος μιας ράβδου FRP επηρεάζουν την ανάπτυξη της αντοχής συνάφειας, λόγω της πρόσφυσης και της τριβής.
2. Η αντοχή του σκυροδέματος δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα την αντοχή συνάφειας και τον μηχανισμό αστοχίας των ράβδων FRP. Αντίθετα με τις ράβδους από χάλυβα, δεν παρουσιάστηκε αστοχία του σκυροδέματος σε καμία περίπτωση εξόλκευσης των ράβδων FRP.
3. Όλες οι μηχανικά επεξεργασμένες ράβδοι FRP απέτυχαν στη δοκιμή, αφού διατμήθηκαν οι δακτύλιοι (νευρώσεις) και ακολούθησε ολίσθηση. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχθηκε από το είδος της με ρητίνη (συστήματα βασισμένα στην εποξειδική ρητίνη είναι δυνατότερα από αυτά που βασίζονται στον εστέρα βινυλίου). Το ύψος των δακτυλίων δεν επηρέαζε σημαντικά, δεδομένου ότι ο τρόπος αστοχίας δεν μεταβλήθηκε.
4. Οι ράβδοι οπλισμού από χάλυβα αναπτύσσουν υψηλότερη αντοχή συνάφειας απ' ό,τι οι ράβδοι FRP που διατίθενται στο εμπόδιο, όχι όμως υψηλότερη και από αυτή που αναπτύσσουν οι επεξεργασμένες μηχανικά ράβδοι άνθρακα-εποξέως.
5. Ράβδοι μικρότερης διαμέτρου, έχουν υψηλότερη αντοχή εξόλκευσης από αυτήν των ράβδων μεγαλύτερης διαμέτρου.
6. Η χρήση ενός αισθητήρα παραμόρφωσης στο εσωτερικό της ράβδου FRP φαίνεται να πολλά υποσχόμενη για την μέτρηση της παραμόρφωσης κατά την διαδικασία της εξόλκευσης. Η επίδραση που ασκεί η ρηγμάτωση της ρητίνης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Ο A Inc (1995) διεξήγαγε δοκιμές εξόλκευσης σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για να μελετήσει τις ιδιότητες συνάφειας της κόπωσης των τενόντων αραμιδίου

(35 kN φορτίο θραύσης). Χρησιμοποιήθηκαν μήκη έμπηξης 50, 100 και 150 mm. Επιλέχθηκαν σχετικά μεγάλες διαστάσεις διατομών του σκυροδέματος ( $f_{cu}=50$  MPa), για να αποφευχθεί η απόσχιση του. Ο ρυθμός της φόρτισης στις στατικές δοκιμές ήταν 10 kN/min. Στις δυναμικές δοκιμές, εφαρμόστηκε μια ημιτονοειδή φόρτιση με συχνότητα 50Hz. Η ολίσθηση μετρήθηκε στο ελεύθερο και στο φορτισμένο άκρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

1. Υπό μονοτονική φόρτιση, αστοχία συνάφειας παρουσιάστηκε μόνο στην περίπτωση που το μήκος αγκύρωσης ήταν 50 mm, ενώ για μεγαλύτερη μήκη αγκύρωσης υπήρξε θραύση των τενόντων. Η μέση τάση της αντοχής συνάφειας ήταν 14.25 MPa.
2. Υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση μεταξύ 5 και 15 έως 22 kN, η συνάφεια μειωνόταν βαθμιαία και η ζώνη της ενεργοποιημένης συνάφειας μετατοπίζεται προς τα μέσα σε σχέση με το φορτιζόμενο άκρο.
3. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία της συνάφειας αυξήθηκε με την αύξηση του μήκους έμπηξης και μείωση της εξωτερικής φόρτισης. Με μήκος έμπηξης ίσο με 150 mm και φόρτιση 5 και 20 kN, μπορούν να πραγματοποιηθούν περισσότεροι από 2,8 εκατομμύρια κύκλοι φόρτισης χωρίς αστοχία της σύνδεσης.
4. Δοκιμές εξόλκευσης με επαναλαμβανόμενη φόρτιση όπου δεν παρουσιάστηκε αστοχία συνάφειας, έδειξαν συμπεριφορά κόπωσης παρόμοια με αυτή που βρέθηκε στις δοκιμές δοκιμίων *Arapree*.
5. Η ολίσθηση έναντι των κυκλικών φορτίσεων που μετρήθηκε υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση, έδειξε καμπύλες παρόμοιες με αυτή που παίρνουμε από το σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη θλιπτική φόρτιση.

Οι Hattori, Kawasaki, Miyagawa και Fujii (1997) διεξήγαγαν δοκιμές εξόλκευσης με διάφορα μήκη έμπηξης υπό παρατεταμένη φόρτιση. Χρησιμοποιήθηκαν καλώδια άνθρακα CFRP καθώς ίνες αραμιδίου (*Technora*). Και οι δύο τύποι ράβδων έδειξαν παρόμοιες σχέσεις μεταξύ του λόγου του μήκους αγκύρωσης προς την ονομαστική διάμετρο και τον λόγο του φορτίου εξόλκευσης προς την εφελκυστική αντοχή. Το φορτισμένο άκρο των ράβδων FRP παρουσίασε μια τάση σταθεροποίησης εντός ενός έτους, όταν υπεβλήθη στο 20% της εφελκυστικής αντοχής του.

## 2.3 ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΣΗ ΑΠΟΣΧΙΣΗΣ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ FRP

Οι Faza και GangaRao (1990) στο Πανεπιστήμιο της Δυτικής Βιρτζίνια, διενήργησαν δοκιμές δοκού για να εξετάσουν την συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων GFRP ( $\sigma_t = 900$  MPa,  $E_G = 48$  GPa), σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής ( $f_{cy} = 45-52$  MPa). Εξετάσθηκαν ράβδοι με τραχεία εξωτερική επιφάνεια, με διαμέτρους 9.5 mm (#3) και 25.4 mm (#8). Τα δοκίμια είχαν επαρκή διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ράβδοι #8, με μήκη αγκύρωσης 406 mm (16d) και 610 mm (24d), ανέπτυξαν μέσες αντοχές συνάφειας 3.2 και 2.8 MPa, αντίστοιχα. Οι ράβδοι #3 αστόχησαν σε εφελκυσμό, συνεπώς η αντοχή συνάφειας δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί. Εν τούτοις, αναφέρθηκε πως οι ράβδοι #3 θα μπορούσαν να αναπτύξουν αντοχή συνάφειας περισσότερη από 2.7 MPa, στην περίπτωση με μήκος αγκύρωσης ίσο με 610 mm (64d). Οι συγγραφείς δεν περιέλαβαν στην αναφορά τους το είδος αστοχίας των ράβδων #8, αλλά αναμένεται να έγινε λόγω απόσχισης.

Οι Kanakubo et al. (1993) διερεύνησαν την αντοχή απόσχισης δομικών στοιχείων σκυροδέματος, οπλισμένων με ποικιλία ράβδων FRP, με δύο σειρές δοκιμών. Στην πρώτη σειρά, χρησιμοποιήθηκε μία απλή δοκιμή εξόλκευσης και στην άλλη, μία δοκιμή συνάφειας τύπου πρόβολου. Χρησιμοποιήθηκαν περισφιγμένα και απερίσφιγκτα δοκίμια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δύο περιπτώσεις η αντοχή συνάφειας επηρεάζεται από το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου. Προτάθηκε ο ακόλουθος τύπος για τον προσδιορισμό της αντοχής απόσχισης των ράβδων FRP:

$$T_{bu} = T_{co} + T_{st} \quad (1.2.1.)$$

όπου:  $T_{bu}$  : τάση απόσχισης  
 $T_{co}$  : τάση απόσχισης χωρίς εγκάρσιο οπλισμό  
 $T_{st}$  : προσαύξηση στην αντοχή απόσχισης, εξαιτίας του πλευρικού οπλισμού

$$T_{co} = 0.313 K_{co} (0.4b_i + 0.5) f_c^{(1/2)} \quad (1.2.2.)$$

$$T_{st} = K_{st} (b/d_b) p_w f_c^{(1/2)} \quad (1.2.3.)$$

$$K_{co} = 0.26 E_{ma}^{(0.29)} \text{ για } E_{ma} < 102 \text{ και } K_{co} = 1 \text{ για } E_{ma} > 10^2 \quad (1.2.4.)$$



$$K_{st} = 15.8E_{ma}ma$$

όπου:	$E_{ma}$	:	μέτρο ελαστικότητας της ράβδου (GPa)
	$f_{co}$	:	θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (MPa)
	$b$	:	πλάτος του δομικού μέλους
	$b_i$	:	κανονικοποιημένο μήκος της γραμμής αστοχίας ( $= (b - N_t d_b) / N_t$ )
	$d_b$	:	διάμετρος της ράβδου
	$\rho_w$	:	ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού ( $= a_w / b_s$ )
	$N_t$	:	αριθμός διαμήκων ράβδων
	$a_w$	:	εμβαδόν διατομής ζεύγους εγκάρσιου οπλισμού
	$s$	:	απόσταση εγκάρσιου οπλισμού
	$h/d$	:	λόγος ύψους νεύρωσης/διαμέτρου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

1. Στην περίπτωση απουσίας εγκάρσιου οπλισμού, η αντοχή σε απόσχιση του δοκιμίου τύπου πρόβολου, μπορεί να εκτιμηθεί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δοκίμια εξόλκευσης.
2. Η αντοχή απόσχισης χωρίς εγκάρσιο οπλισμό ( $T_{co}$ ) μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση του μειωτικού συντελεστή ( $K_{co}$ ), ο οποίος είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της ράβδου  $E_{ma}$ .
3. Η διαφορά στην αντοχή απόσχισης μεταξύ γωνιακών και κεντρικών ράβδων, δεν μπορεί να παρατηρηθεί στα δοκίμια με διαμήκεις ράβδους FRP. Η προσαύξηση της τάσης απόσχισης ( $T_{st}$ ) δίδεται, επίσης, σαν συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της ράβδου.

Ο Faoro (1996) μελέτησε τη συνάφεια μεταξύ ράβδων FRP και σκυροδέματος και κατέληξε στο συμπέρασμα πως σχετικά υψηλές τάσεις συνάφειας μπορούν να αναπτυχθούν στο σκυρόδεμα, σε ένα σχετικά μικρό μήκος αγκύρωσης, γεγονός που οδηγεί στην απόσχιση της επικάλυψης του σκυροδέματος. Το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η υψηλότερη ικανότητα παραμόρφωσης των ράβδων FRP στην εγκάρσια κατεύθυνση, παίζουν ρόλο στον μηχανισμό απόσχισης. Οι τένοντες FRP που διατίθενται στο εμπόριο διαθέτουν μία ποικιλία επιφανειακών διαμορφώσεων, οι οποίες οδηγούν και σε διαφορετικά χαρακτηριστικά συνάφειας. Οι ράβδοι και οι τένοντες FRP

επιδεικνύουν υψηλότερες αντοχές συνάφειας σε σκυρόδεμα, απ' ότι οι συμβατικοί προεντεταμένοι χάλυβες. Αυτό σημαίνει πως, σε ένα σχετικά μικρό μήκος αγκύρωσης, μπορούν να αναπτυχθούν στο σκυρόδεμα σχετικά υψηλές τάσεις συνάφειας. Οι δυνάμεις απόσχισης αυξάνουν και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με παχύτερες επικαλύψεις σκυροδέματος. Εάν γίνεται χρήση μικτού οπλισμού, τα περισσότερα άκαμπτα στοιχεία του οπλισμού θα μπορούσαν να υπερφορτισθούν.

Μια σειρά πειραμάτων, για την εξέταση της συμπεριφοράς σε απόσχιση ματισμένων ράβδων FRP, διεξήχθησαν στη Νορβηγία από την *SINTEF* (1996), στα πλαίσια του Προγράμματος *EUROCRETE*, από τους Clarke & Waldron (1996). Τρεις δοκοί σκυροδέματος μεσαίου μεγέθους (2,85 x 0,25 x 0,15m) οπλίστηκαν με GFRP ράβδους διαμέτρου 13,5 ( $\sigma_t = 1000$  MPa,  $E_G = 45$  GPa) και συνδετήρες Plytron ( $\sigma_t = 520$  MPa,  $E_G = 23,4$  GPa). Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας C35, υψηλής εργασιμότητας, ενώ η κάτω και πλευρική επικάλυψη του σκυροδέματος στις ματισμένες ράβδους, ήταν 22,5 mm. Η μόνη μεταβλητή στο πειραματικό πρόγραμμα ήταν το μήκος που βρίσκεται μέσα στην ζώνη σταθερής ροπής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση αντοχή συνάφειας που αναπτύχθηκε στις ματίσεις μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος της μάτισης. Για μήκος μάτισης (L) 18,5d, 26d και 37d, οι τάσεις συνάφειας που αναπτύχθηκαν ήταν 4,0, 3,3 και 2,9 MPa, αντίστοιχα. Οι συγγραφείς ανέφεραν πως εάν θέλουμε πλήρη εκμετάλλευση της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων FRP, το μήκος έμπηξης θα πρέπει να είναι περίπου 80 φορές την διάμετρο της ράβδου.

Οι Terfers και Karlsson (1997) εξέτασαν τη συνάφεια μεταξύ C-ράβδων GFRP και σκυροδέματος, με τη χρήση δοκιμών εξόλκευσης με κεντρική και έκκεντρη τοποθέτηση της ράβδου. Πραγματοποιήθηκαν επίσης τρεις δοκιμές ματίσματος για εφελκυσμένο οπλισμό σε καμπτόμενες δοκούς. Οι C-ράβδοι έχουν σχήμα επιφάνειας παρόμοιο με αυτό των ράβδων από χάλυβα, με επικλινείς νευρώσεις. Έγινε σύγκριση με τις ιδιότητες συνάφειας της Σουηδικής χαλύβδινης ράβδου *Ks600*, η οποία έχει υψηλότερη σχετική περιοχή νευρώσεων από την C-BAR. Το συμπέρασμα ήταν πως όταν υπάρχει αρκετός περιορισμός για την πρόληψη της απόσχισης, η C-ράβδος έχει την ίδια σχέση τάσης-

ολίσθησης με την ράβδο από χάλυβα. Η τάση απόσχισης της επικάλυψης κατά μήκος της ράβδου είναι μικρότερη στην C-ράβδο απ' ό τι στην ράβδο από χάλυβα. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο ότι η C-ράβδος έχει εξωτερική επιφάνεια με μαλακότερη υφή από την χαλύβδινη και αυτό προκαλεί λιγότερες συγκεντρώσεις τάσεων στο σκυροδέμα και λιγότερες μικρο-ρωγμές. Εν τούτοις, όταν αποσχίζεται η επικάλυψη κατά μήκος της ράβδου, η ακτινική πίεση αυξάνεται στην C-δοκό, σχηματίζεται η τελική ρηγμάτωση και η επικάλυψη αποσχίζεται σε ένα φορτίο διάρρηξης, το οποίο είναι περίπου 30% χαμηλότερο από αυτό της χαλύβδινης ράβδου οπλισμού. Η λεία επιφάνεια της C-ράβδου προκαλεί αυξημένη ολίσθηση, όταν η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται μετά την απόσχιση της επικάλυψής του και οδηγεί σε μεγαλύτερες δυνάμεις απόσχισης.

Οι Terfers, Hedlund και Rosinski (1998) εξέτασαν τη συνάφεια μεταξύ ράβδων GFRP της εταιρείας «Hughes Brothers, Inc.» και σκυροδέματος, με δοκιμές εξόλκευσης, με κεντρική και έκκεντρη τοποθέτηση της ράβδου. Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές μάτισης για εφελκόμενο οπλισμό σε καμπτόμενες δοκούς, με διαφορετικά μήκη μάτισης. Έγινε σύγκριση με τις ιδιότητες συνάφειας των Σουηδικών ράβδων χάλυβα Ks600 και Ks400, καθώς και άλλων τύπων ράβδων FRP. Το αποτέλεσμα που εξήχθη ήταν πως οι ράβδοι GFRP των πειραμάτων έχουν σχέση τάσης-ολίσθησης παρόμοια με αυτή άλλων ράβδων FRP, με σχετικά λεία επιφάνεια και μικρές επιφανειακές παραμορφώσεις. Σε χαμηλή φόρτιση, η αντοχή συνάφειας επέδειξε υψηλή ακαμψία, εξαιτίας της επικάλυψης της επιφάνειας με χοντρή άμμο. συνάφεια έγινε όγκιμη κρατώντας το 50 % της μέγιστης συνάφειας σε μια ολίσθηση ίση με 20 mm. Εάν υπάρξει ρηγμάτωση της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος των αγκυρωμένων ράβδων, η αντοχή συνάφειας περιορίζεται και εμφανίζεται σε σημαντικά μικρότερη ολίσθηση. Η τάση απόσχισης της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος της ράβδου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της Σουηδικής χαλύβδινης ράβδου Ks600 και της C-ράβδου.

Ο Achillides (1998) εξέτασε δοκούς με ματισμένες ράβδους και αγκυρώσεις μικρού μήκους, με τη χρήση ράβδων GFRP και CFRP Eurocrete και διατμητικό οπλισμό GFRP. Το αποτέλεσμα ήταν πως οι ματισμένες ράβδοι και οι μονές αγκυρώσεις αναπτύσσουν

παρόμοιες αντοχές συνάφειας. Οι συνδετήρες φάνηκε να επαυξάνουν την αντοχή απόσχισης του σκυροδέματος μόνο στο διατμητικό άνοιγμα και ενώ ήταν ήδη υπό τάση. Η εγκάρσια πίεση, εξαιτίας των υποστηριγμάτων αποδείχθηκε ευεργετική για τη μείωση των προβλημάτων απόσχισης. Οι ράβδοι GFRP επέδειξαν μεγαλύτερη τάση απόσχισης από τις ράβδους CFRP, παρά το γεγονός ότι και οι δύο ράβδοι έχουν παρόμοιες αντοχές συνάφειας σε εξόλκευση. Αυτό δημιουργεί αμφιβολία ως προς τη χρήση μόνο δοκιμών εξόλκευσης για την σύγκριση διαφορετικών ράβδων.

## **2.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΡΑΒΔΩΝ FRP ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Τα αναλυτικά μοντέλα συνάφειας-ολίσθησης είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της δομικής συμπεριφοράς των κατασκευών από σκυρόδεμα οπλισμένο με ράβδους FRP, μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Αν και πολλά πειραματικά προγράμματα έχουν διεξαχθεί διεθνώς, για την εξέταση των χαρακτηριστικών της συνάφειας των ράβδων FRP, πολύ λίγα πράγματα έχουν δημοσιευθεί για την αναλυτική μοντελοποίηση. Παρακάτω, αναφέρεται μία σύνοψη όλων αυτών των εργασιών.

### **2.4.1 Μοντελοποίηση τοπικής συνάφειας**

Ο Malvar (1994) πρότεινε ένα ακριβές μοντέλο της συνολικής συμπεριφοράς της συνάφειας, βασισμένο σε δύο εμπειρικές σταθερές. Οι σταθερές αυτές μπορούν να προσδιορισθούν προσαρμόζοντας τις πειραματικές καμπύλες τ-s. Το μοντέλο του Malvar περιγράφεται με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F \cdot (s/s_m) + (G-1) \cdot (s/s_m)^2}{1 + (F-2) \cdot (s/s_m) + G \cdot (s/s_m)^2} \quad (1.3.1.)$$

όπου:

$\tau_m, s_m$  : μέγιστη τάση συνάφειας, ολίσθηση κατά την μέγιστη τάση συνάφειας

$F, G$ : εμπειρικές σταθερές προσδιοριζόμενες για κάθε τύπο ράβδου

$F = 11$  για ράβδους FRP με ένα εξωτερικό ελικοειδές τράβηγμα, το οποίο παρέχει και μία προεξέχουσα παραμόρφωση και μία μικρή οδόντωση στην επιφάνεια της ράβδου (ονομαζόμενες ράβδοι Τύπου A)

$F = 13$  για ράβδους FRP με οδοντώσεις που δημιουργήθηκαν από πίεση της εξωτερικής επιφάνειας της ράβδους κατά την κατασκευή τους (ονομαζόμενες ράβδοι Τύπου Δ)

$G = 1.2$  για ράβδους Τύπου A

$G = 0.5$  για ράβδους Τύπου Δ

Οι Faoro (1992), Alunno Rosetti, Galeota και Giammatteo (1995) και Cosenza, Manfredi και Realfonzo (1995), εφάρμοσαν με επιτυχία το γνωστό μοντέλο για ράβδους χάλυβα με νευρώσεις των Eligehausen, Popov & Bertero (1983), σε ράβδους FRP. Ο ανιών κλάδος αυτής της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης ( $s \leq s_m$ ) δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \left( \frac{s}{s_m} \right)^\alpha \quad (1.3.2.)$$

όπου:  $\alpha$  είναι η παράμετρος προσαρμογής της καμπύλης η οποία δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 1 για να είναι πρακτικώς εφαρμόσιμη ( $\alpha=0.40$ , στην περίπτωση των οπλισμών από χάλυβα).

Επιπλέον, το μοντέλο των Eligehausen et al. (1983) περιγράφεται από:

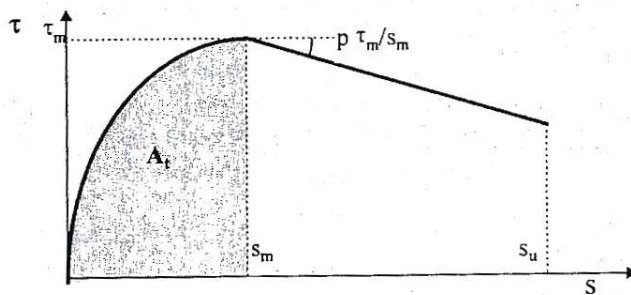
- 1) Έναν δεύτερο κλάδο σταθερής συνάφειας ( $\tau = \tau_m$ ) για ολίσθηση μέχρι  $s = s_2$
- 2) Έναν γραμμικά κατιόντα κλάδο από  $(s_2, \tau_m)$  έως  $(s_3, \tau_3)$
- 3) Έναν οριζόντιο κλάδο για  $s > s_3$ , με μια τιμή  $\tau$ , λόγω ανάπτυξης της τριβής ( $\tau = \tau_3$ ).

Οι τιμές  $s_2$ ,  $s_3$  και  $\tau_3$  θα πρέπει να διακριβωθούν με βάσει τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Οι Cosenza, Manfredi και Realfonzo (1995) πρότειναν μία τροποποιημένη εκδοχή ενός τέτοιου μοντέλου (καλούμενο «μοντέλο διπλής διακλάδωσης»), προκειμένου

να μοντελοποιήσουν τη συνάφεια ράβδων FRP-σκυροδέματος (Σχήμα 2.1). Στην πραγματικότητα, συγκρίνοντας τις πειραματικές και αναλυτικές καμπύλες, με τη χρήση του αρχικού μοντέλου των Eligehausen et al. (το λεγόμενο «μοντέλο B.P.E.»), οι συγγραφείς βρήκαν πως δεν υπάρχει δεύτερος κλάδος στην περίπτωση των ράβδων FRP. Ο ανιόν κλάδος είναι ο ίδιος με αυτόν του αρχικού μοντέλου, ενώ ο κατιών κλάδος αποσκλήρυνσης δίδεται από τον τύπο:

$$\tau / \tau_m = 1 - p (s - s_m) / s_m \quad (1.3.3)$$

όπου:  $\tau_m$  είναι η μέγιστη τάση συνάφειας  
 $s_m$  η αντίστοιχη ολίσθηση, όπως φαίνεται παρακάτω  
 $\alpha$  και  $p$  είναι παράμετροι που βασίζονται σε διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία



Σχήμα 2.1 : Προσδιοριστικός βασικός νόμος BEP, Cosenza, Manfredi & Realfonzo (1995).

Η τιμή της παραμέτρου  $\alpha$ , η οποία προσδιορίζει τον ανιόντα κλάδο, λαμβάνεται με εξίσωση της περιοχής,  $A_\tau$ , κάτω από τον ανιόντα κλάδο της πειραματικής καμπύλης, με την περιοχή που αντιστοιχεί στην αναλυτική καμπύλη:

$$A_\tau = \tau_m s_m / (1 + \alpha) \quad (1.3.4)$$

Η τιμή « $p$ », η οποία προσδιορίζει τον κατιόντα κλάδο, υπολογίζεται με παρόμοια φιλοσοφία με αυτή που υπολογίζουμε την περιοχή κάτω από την πειραματική και αναλυτική καμπύλη, εντός του φθίνοντα κλάδου. Επιπλέον, οι Cosenza, Manfredi και Realfonzo (1995), πρότειναν έναν τύπο για την μοντελοποίηση του πρώτου κλάδου της καμπύλης  $\tau$ - $s$  («μοντέλο C.M.R.»):

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - e^{-s/s_r})^\beta \quad (1.3.5)$$

όπου  $s_r$  και  $\beta$  είναι παράμετροι, που βασίζονται στην προσαρμογή σε καμπύλες των πειραματικών στοιχείων.

Σε μία έρευνά τους, οι Cosenza, Manfredi & Realfonzo (1995, 1996), συνέκριναν το μοντέλο Malvar, το τροποποιημένο μοντέλο B.P.E. και το μοντέλο C.M.R.. Τα τρία μοντέλα αξιολογήθηκαν έναντι των πειραματικών αποτελεσμάτων που συλλέχθηκαν από διάφορα ερευνητικά προγράμματα. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι:

1. Η συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων FRP εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εξωτερικής επιφάνειας και, εφόσον πρόκειται για τον ίδιο τύπο επιφάνειας, εξαρτάται από την διαδικασία κατασκευής τους.
2. Είναι γενικώς πιθανό να ληφθούν αντοχές συνάφειας σε ράβδους FRP ίσες ή μεγαλύτερες από αυτές των χαλύβδινων ράβδων.
3. Οι ράβδοι με νευρώσεις ή με επικαλυμμένη άμμο, φαίνεται να δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αντοχή συνάφειας.

Οι συγγραφείς θεωρούν πως το μοντέλο Malvar μπορεί να αναπαραγάγει ολόκληρη την καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης, μέσω μιας μόνο απλής εξίσωσης, αλλά μοιάζει να είναι λιγότερο αξιόπιστο από την τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου B.P.E.. Εν τω μεταξύ, το μοντέλο C.M.R. αποδείχθηκε περισσότερο κατάλληλο για την μοντελοποίηση του ανιόντα κλάδου. Ως επεξηγηματικό παράδειγμα, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μία σύγκριση μεταξύ του μοντέλου B.P.E., του μοντέλου C.M.R. και δύο πειραματικών καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης.

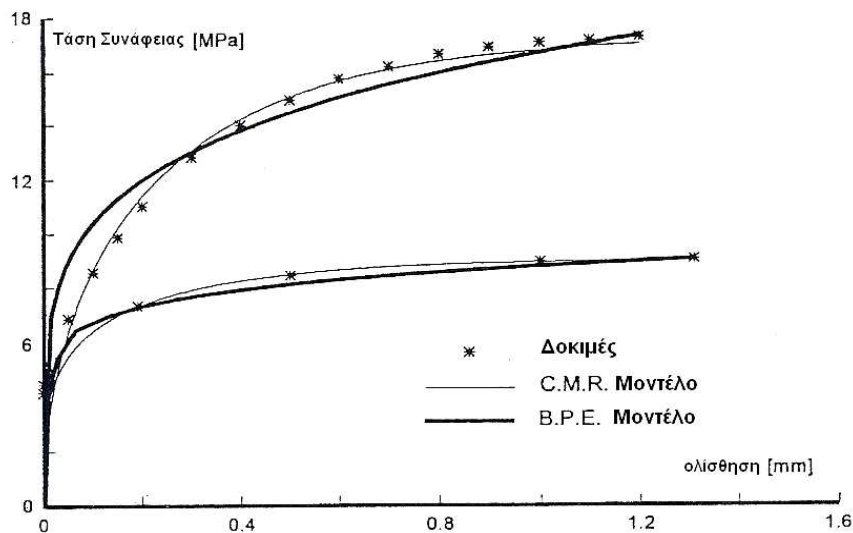
Οι συγγραφείς παρουσίασαν επίσης την κατωτέρω αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό του μήκους αγκύρωσης  $l$ , βάσει του μοντέλου B.P.E.:

$$1 = 1_0 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} \cdot \frac{1+\alpha}{1-\alpha} = \frac{\varphi \cdot \sigma}{4 \cdot \tau_m} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} \cdot \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad (1.3.6)$$

όπου:  $l_0$  είναι το μήκος έμπτυξης για μια δεδομένη τιμή του  $\sigma$ , στην περίπτωση που  $\tau = \cos \tau = \tau_m$ .  
 $\sigma_l$  είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση που μπορεί να μεταφερθεί από την ράβδο με τη χρήση μόνο του ανιόντα κλάδου της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης:

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{8 \cdot E}{\varphi} \cdot A_\tau} = \sqrt{\frac{8 \cdot E}{\varphi} \cdot \frac{\tau_m \cdot s_m}{1 + \alpha}} \quad (1.3.7)$$

Η τιμή του « $l$ » που λαμβάνεται με αυτή την εξίσωση, απαιτεί τη χρήση του ανιόντα κλάδου του νόμου συνάφειας-ολίσθησης, για τιμή του  $\sigma$  μικρότερη ή ίση του  $\sigma_l$ . Όταν  $(1 + \alpha) / (1 - \alpha)$  είναι μικρότερο του  $l$ , το  $l$  είναι μεγαλύτερο του  $l_0$ .



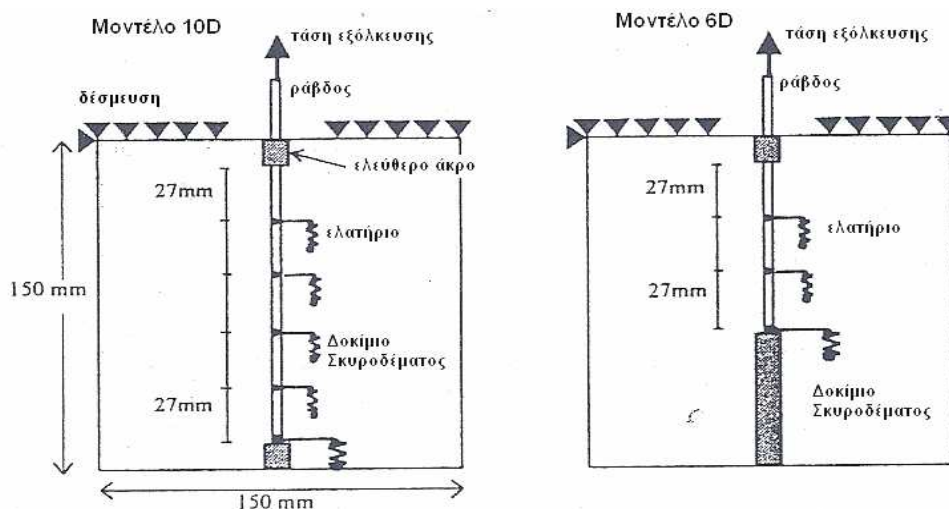
Σχήμα 2.2 : Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με Αναλυτικά μοντέλα (Cosenza, Manfredi και Realfonzo, 1996)

## 2.4.2 Γενική μοντελοποίηση συνάφειας

Ο Achillides (1998) εισήγαγε μια μέθοδο μοντελοποίησης της συμπεριφοράς εξόλκευσης των ράβδων FRP. Τα κυβικά δοκίμια FRP-σκυροδέματος μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση διδιάστατων στοιχείων. Ράβδος και σκυρόδεμα συνδέονται με μη-γραμμικά ελατήρια ανά διαστήματα 27 mm (27 mm = 2 φορές η διάμετρος της ράβδου).



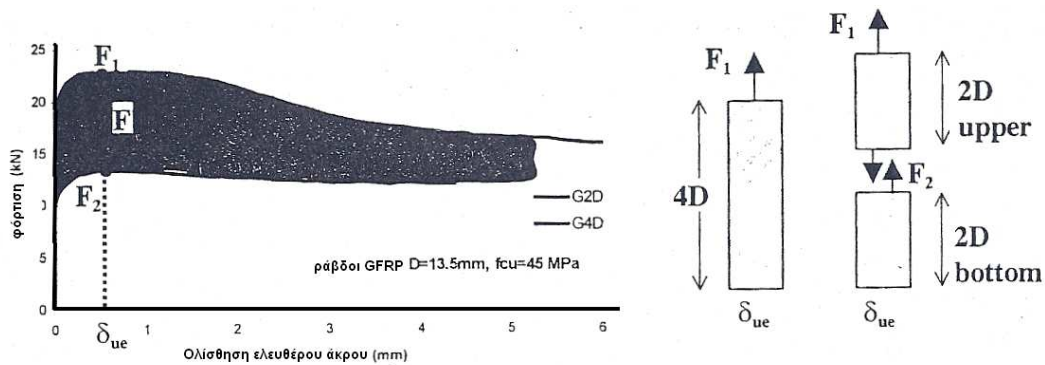
Για να μοντελοποιηθούν τα διαφορετικού μεγέθους μήκη αγκύρωσης στα πειράματα, αναπτύχθηκαν πανομοιότητα κυβικά μοντέλα, που διέφεραν μόνο κατά τον αριθμό των ελατηρίων σύνδεσης (σχήμα 2.3). Κάθε ελατήριο θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύει τη συνάφεια που συνεισφέρεται από ένα μήκος της ράβδου ίσο με 27 mm, στην συνολική συνάφεια όλου του μήκους έμπηξης.



Σχήμα 2.3: Μοντέλα δοκιμίων 10D και 6D

Τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής, τα οποία προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των ελατηρίων, είναι το μήκος των ελατηρίων και τα αντίστοιχα επίπεδα δύναμης που εφαρμόζονται στο ελατήριο. Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου, το μήκος του ελατηρίου προσδιορίστηκε από την ολίσθηση της ράβδου και η αντίστοιχη δύναμη ήταν συνάρτηση της αντοχής συνάφειας της ράβδου. Για να προσδιορισθεί η εισαγόμενη καμπύλη φόρτισης-ολίσθησης συνάφειας, χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένα δεδομένα από τις δοκιμές εξόλκευσης.

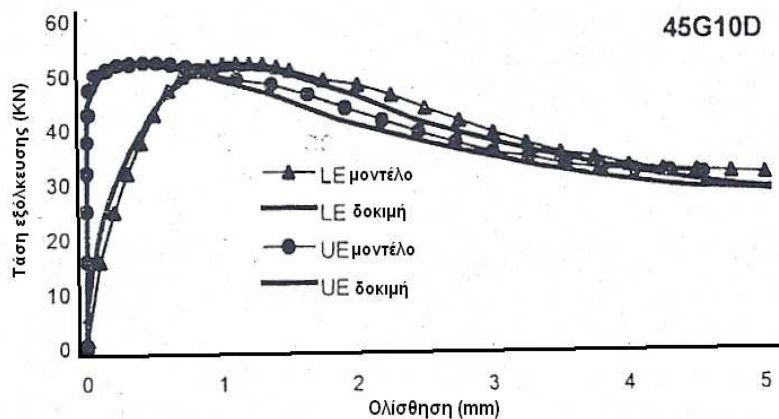
Για παράδειγμα εξετάστηκαν λεπτομερέστερα, του φορτιζόμενου σε σχέση με το μη φορτιζόμενο άκρο της ράβδου με μήκη αγκύρωσης  $4D$  και  $2D$ . Το μήκος αγκύρωσης  $4D$  θεωρείται πως είναι πανομοιότητα με δύο μήκη  $2D$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 : Επίδραση του μήκους της ανώτερης 2D ράβδου στην συμπεριφορά συνάφειας της ράβδου.

Η ολίσθηση ελεύθερου άκρου,  $\delta_{ue}$ , είναι συνάρτηση του φορτίου  $F_1$ , το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος αγκύρωσης  $4D$ , αλλά είναι επίσης και συνάρτηση του εσωτερικού φορτίου  $F_2$ , το οποίο αντιστοιχεί στο κατώτατο μήκος αγκύρωσης  $2D$ . Αφού οι τιμές φορτίου  $F_1$  και  $F_2$  αντιστοιχούν στο ίδιο  $\delta_{ue}$ , η διαφορά μεταξύ  $F_1$  και  $F_2$  θα δώσει μια τιμή του φορτίου  $F$ , η οποία αντιπροσωπεύει την συνεισφορά του άνω μήκους  $2D$  στην συγκεκριμένη ολίσθηση. Η συνεισφορά του άνω σημείου της αγκύρωσης  $2D$  στο φορτίο, έναντι της καμπύλης ολίσθησης του ελεύθερου άκρου της συνολικής αγκύρωσης  $4D$ , είναι η σκιασμένη περιοχή μεταξύ των καμπυλών  $4D$  και  $2D$ . Η προκύπτουσα καμπύλη του  $F$  έναντι του  $\delta_{ue}$ , εισάγεται στα ελατήρια, εκτός από το τελευταίο, όπου χρησιμοποιείται η καμπύλη  $F - \delta_{ue}$  του δοκιμίου μήκους  $2D$ .

Τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται για ένα από τα μοντέλα οι καμπύλες φορτίου-ολίσθησης στο φορτισμένο και στο ελεύθερο άκρο μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες. Τα αποτελέσματα δείχνουν πολύ καλή συμφωνία των καμπύλων αυτών με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες, και στον ανιόντα, αλλά και στον κατιόντα κλάδο της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης.

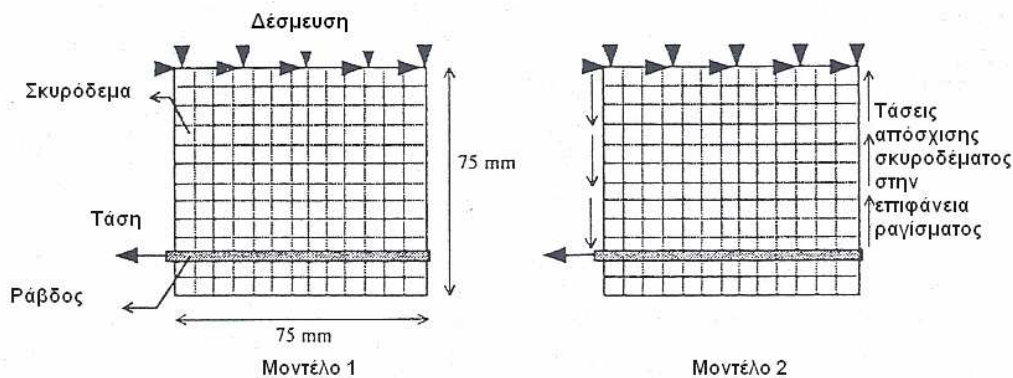


Σχήμα 2.5 : Καμπύλη τάσης-ολίσθησης του μοντέλου και πειραματικές δοκιμές

Για να διερευνήσει την δράση του μέτρου ελαστικότητας στην αντοχή απόσχισης των ράβδων οπλισμού, ο Achillides (1998) εξέτασε τα ακόλουθα απλοποιημένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων *FE*. Χρησιμοποίησε έναν τετραγωνικό στοιχείο σκυροδέματος συγκρατούμενο στο επάνω άκρο του, το οποίο περιέχει μία ράβδο οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το μοντέλο αυτό θεωρήθηκε πως προσομοιώνει την συμπεριφορά ενός συστήματος ακραίου τμήματος ράβδου-σκυροδέματος, ανάμεσα σε διαδοχικές καμπτικές ρωγμές. Αυτό το είδος «συστήματος» μπορεί να βρεθεί σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος, οπλισμένα με μια ράβδο ή σε σύστημα ράβδου-σκυροδέματος, μεταξύ διαδοχικών μικρορωγμών. Η ράβδος φορτίστηκε αξονικά σε οριζόντια διεύθυνση και παρακολούθηθηκε η κατανομή των εγκάρσιων τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά μήκος της κάτω πλευράς της ράβδου. Οι τάσεις αυτές θεωρήθηκαν ότι είναι οι τάσεις απόσχισης που προκλήθηκαν από την ράβδο στην επικάλυψη του σκυροδέματος στην κάτω πλευράς της διατομής.

Δύο λύσεις ελήφθησαν από τη χρήση του μοντέλου 1. Στην πρώτη, η ράβδος είχε μέτρο ελαστικότητας των ράβδων *EUROCRETE GFRP* (45 GPa), ενώ στην δεύτερη λύση, η ράβδος είχε το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων *CFRP* (115 GPa). Η φόρτιση που εφαρμόστηκε ήταν ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Η κατανομή των εγκάρσιων τάσεων που εισήχθησαν στην επικάλυψη του σκυροδέματος στην κάτω πλευρά της διατομής είχαν το ίδιο σχήμα και στις δύο λύσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.. Η μέγιστη τάση, εν τούτοις, είχε διαφορετικές τιμές για κάθε υλικό. Η μέγιστη τιμή τάσης που ελέγχει την

αντοχή απόσχισης της συνάφειας της ράβδου, ήταν μεγαλύτερη στις ράβδους GFRP, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι ράβδοι GFRP τείνουν να αποσχίζονται περισσότερο από τις ράβδους CFRP, υπό πανομοιότυπο φορτίο εξόλκευσης.



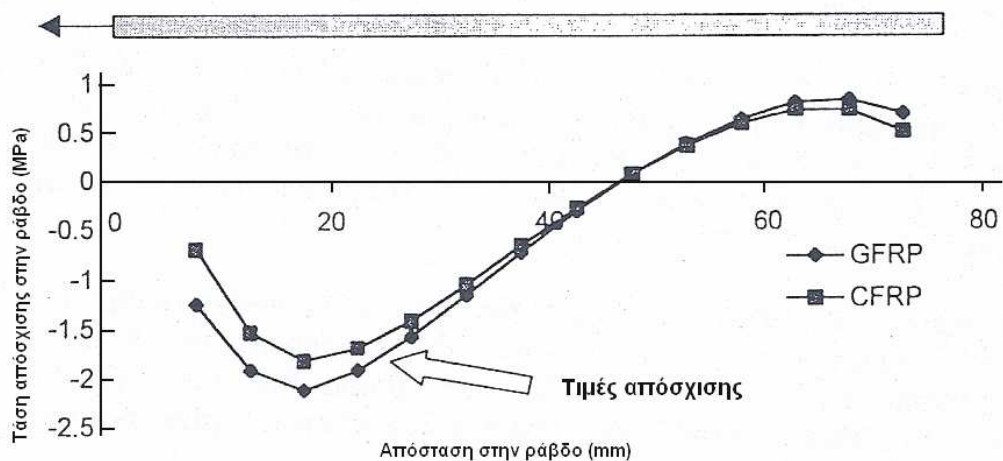
Σχήμα 2.6 : Μοντέλα FE για την έρευνα της επίδρασης της σταθεράς του Young τάση απόσχισης

Ένα παρόμοιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αποτίμηση της επίδρασης των διατμητικών τάσεων κατά μήκος των ρωγμών, στη τάση για απόσχιση της συνάφειας των ράβδων οπλισμού. Διατμητικές τάσεις προστέθηκαν στις δύο πλευρές του μοντέλου, όπως φαίνεται στο μοντέλο 2 του Σχήματος 2.6.. Οι τάσεις αυτές προσομοιώνουν την διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία των ρωγμών. Πριν τον σχηματισμό των ρωγμών, θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης διατμητική αντίσταση του σκυροδέματος, ενώ καθώς η ρηγμάτωση αναπτύσσεται, η διατμητική αντίσταση μειώνεται.

Μια σειρά επιλύσεων πραγματοποιήθηκε με διάφορες τιμές διατμητικής τάσης, με τη χρήση ράβδων ίδιου τύπου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως καθώς η διατμητική τάση του σκυροδέματος μειώνεται, η μέγιστη τάση απόσχισης αυξάνεται, οδηγώντας σε μεγαλύτερη τάση για απόσχιση. Αυτό ήταν μια σημαντική παρατήρηση που έχει σχέση με την παραμορφωσιμότητα της ράβδου. Η διατμητική τάση του σκυροδέματος στο σημείο της ρωγμής, εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ρωγμής (βάθος και μήκος). Η γεωμετρία της ρωγμής, εν τούτοις, εξαρτάται από την επιμήκυνση

της ράβδου ακριβώς έξω από το κυβόλιθο του σκυροδέματος, που είναι ανάλογη με το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου. Έτσι, για παράδειγμα, οι ράβδοι GFRP, έχοντας μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τις ράβδους CFRP, αναμένεται να δημιουργήσουν μεγαλύτερες ρωγμές και κατά συνέπεια η διατμητική τάση του σκυροδέματος στο σημείο της ρωγμής θα είναι μικρότερη. Ως αποτέλεσμα αυτού, η τάση για απόσχιση των ράβδων GFRP είναι υψηλότερη από αυτή των ράβδων CFRP.

Από τα αποτελέσματα των δύο πιο πάνω ερευνών μοντελοποίησης, συμπεραίνεται πως η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για τις ράβδους οπλισμού, παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή απόσχισης αυτών. Επηρεάζει την ικανότητά τους για παραμόρφωση εντός του σκυροδέματος και, παράλληλα, επιδρά στη γεωμετρία της ρωγμής και κατά συνέπεια και στην διατμητική αντοχή του σκυροδέματος στο σημείο της ρωγμής. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν την τάση για απόσχιση των ράβδων, όπως φαίνεται παραπάνω. Ο συγγραφέας αναφέρει πως οι ράβδοι GFRP αναμένεται να αναπτύσσουν αντοχή απόσχισης κάτω του 80% αυτής των ράβδων CFRP, εξαιτίας της συνδυασμένης επίδρασης των παραπάνω δύο παραγόντων. Τα πειραματικά αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμής δοκού που πραγματοποιήθηκαν από τους Achillides, Pilakoutas & Waldron (1998), επιβεβαίωσαν τα παραπάνω ευρήματα.



Σχήμα 2.7 : Κατανομή της τάσης απόσχισης κατά μήκος της ράβδου

## 2.5 ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑ

### 2.5.1 Συνάφεια υπό παρατεταμένη φόρτιση – Δοκιμές ερπυσμού

Οι Hattori, Inue, Miyagawa, Fujii (1995) διερεύνησαν τη συμπεριφορά ερπυσμού (συρσίματος) της συνάφειας σε δύο είδη ράβδων FRP, εμπηγμένων σε σκυροδέμα, με την πραγματοποίηση δοκιμών ερπυσμού σε εξόλκευση, σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος και μετρώντας την αύξηση της ολίσθησης στο ελεύθερο άκρο για 8.000 ώρες. Εξετάστηκε επίσης η επίπτωση του ερπυσμού συνάφειας στην μακροχρόνια βύθιση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, με ράβδους οπλισμού FRP. Οι ερευνητές συμπέραναν τα ακόλουθα:

1. Οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών που χρησιμοποιούνται ως μητρικό υλικό, επηρεάζουν τη συμπεριφορά συνάφειας-ολίσθησης των καλωδίων CFRP ( $\varepsilon = 7.5$  mm) καθώς και των ράβδων αραμιδίου ( $\varepsilon = 6$  mm), ειδικά κατά το προκαταρκτικό στάδιο εξόλκευσης, όταν η τάση συνάφειας είναι σχετική μικρή.
2. Η ράβδος αραμιδίου με νευρώσεις επέδειξε μεγαλύτερη ολίσθηση του ελεύθερου άκρου από τη ράβδο με νευρώσεις από μαλακό χάλυβα (*D10*), υπό τις ίδιες συνθήκες μέσης τάσης συνάφειας με μήκος αγκύρωσης στη δοκιμή εξόλκευσης ίσο με 64 mm.
3. Η επίδραση του ερπυσμού συνάφειας στην μακροχρόνια βύθιση μιας ρηγματωμένης δοκού οπλισμένου σκυροδέματος, οπλισμένης με καλώδιο CFRP ή ράβδο με νευρώσεις από ίνες αραμιδίου, δεν ήταν τόσο σημαντική. Ο ερπυσμός λόγω θλίψης του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, ήταν ο μηχανισμός που κυρίως έλεγχε την βύθιση, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση ράβδων από χάλυβα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η τάση συνάφειας αναπτύσσεται σε μεγαλύτερο μήκος των ράβδων FRP στις δοκούς απ' ότι στις ράβδους χάλυβα με νευρώσεις. Το γεγονός αυτό μειώνει την τοπική τάση συνάφειας των ράβδων FRP, αρκετά ώστε να προκαλέσει παρόμοιο ερπυσμό συνάφειας όπως και στην περίπτωση ράβδων από χάλυβα.

Οι Wang, Goto και Joh (1997) ερεύνησαν τα χαρακτηριστικά συνάφειας των ράβδων FRP και την επίδρασή τους στην χρόνια βύθιση των δοκών σκυροδέματος. Η καμπύλη τάσης συνάφειας-ολίσθησης που προσδιορίστηκε από δοκιμές εξόλκευσης, επηρεαζόταν σημαντικά από τον τύπο του υλικού της ίνας, το μέτρο ελαστικότητας και το σχήμα της επιφάνειας των ράβδων. Η ολίσθηση στην μέγιστη φόρτιση διέφερε, ακόμα κι αν η μέγιστη τιμή του φορτίου ήταν περίπου η ίδια. Πειράματα μακράς διάρκειας σε δοκούς με οπλισμό FRP έδειξε πως οι βυθίσεις τους διέφεραν και κατά μέσο όρο ήταν 2.85 φορές την βύθιση των οπλισμένων με χάλυβα δοκιμίων. Οι οπλισμένες με ράβδους FRP δοκοί παρουσίασαν μία γρήγορη αύξηση της βύθισης στην αρχή, η οποία στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε και ήταν η ίδια όπως και στις δοκούς με χαλύβδινο οπλισμό. Η μακροπρόθεσμη βύθιση των δοκών ήταν μικρότερη για δοκούς με οπλισμό ράβδων GFRP από τις δοκούς με οπλισμό CFRP και AFRP.

Μη-καταστρεπτικές μέθοδοι ανάλυσης τροποποίησης, ανάλυσης ακουστικής εκπομπής και ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικής αντανάκλασης (ραντάρ) εφαρμόστηκαν από τους Reinhardt, Gollas, Weiler, Grosse & Eberle (1997) σε δοκιμές κάμψεως τριών σημείων, καθώς και σε δοκιμές εξόλκευσης, χρησιμοποιώντας ράβδους αραμιδίου-εστέρα βινυλίου. Η ανάλυση τροποποίησης μπορούσε να εντοπίσει την ποιοτική υποβάθμιση της συνάφειας, αλλά όμως δεν μπορούσε να συσχετίσει τα αποτελέσματα με τον βαθμό της ολίσθησης. Η ακουστική εκπομπή αποδείχθηκε ένα ευαίσθητο μέσο εντοπισμού της διαδικασίας ολίσθησης σε σχέση με το χώρο και το χρόνο. Το ραντάρ δεν εντόπισε μεταβολές στη συνάφεια μεταξύ αραμιδίου και σκυροδέματος.

### **2.5.2. Επιπτώσεις της θερμοκρασίας**

Η θερμική ασυμβατότητα μεταξύ οπλισμού FRP και σκυροδέματος, μπορεί να διαταράξει τη συνάφεια μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος, προκαλώντας τάσεις απόσχισης και μειώνοντας την αντοχή συνάφειας. Οι Gentry και Hudak (1996) μελέτησαν την επίπτωση της θερμότητας στις ράβδους FRP με ίνες μονής κατεύθυνσης,

οι οποίες παρουσίαζαν αξιοσημείωτες εγκάρσιες θερμικές μεταβάσεις, που προκαλούνταν από την ρητίνη. Η εγκάρσια περιτύλιξη των ινών, μπορεί να περιορίσει τις εγκάρσιες παραμορφώσεις.

Οι Homma και Maguyama (1989) ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας σε ράβδους CFRP, πραγματοποιώντας δοκιμές σε θερμοκρασία δωματίου, αφού πρώτα διατήρησαν τα δοκίμια επί 3 ώρες σε διαφορετικές θερμοκρασίες (από +20°C έως +100°C). Διαπίστωσαν πως η υψηλή θερμοκρασία έχει επιβλαβή επίπτωση στη συνάφεια, πιθανώς ως αποτέλεσμα της χαμηλότερης διατμητικής ακαμψίας της μήτρας των ράβδων FRP.

Ο Al-Zaharani (1995) ερεύνησε την επίπτωση των θερμοκρασιακών μεταβολών στην αντοχή εξόλκευσης των λείων ράβδων. Ο συγγραφέας πραγματοποίησε δοκιμές σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες. Συγκεκριμένα, τρεις συνθήκες μελετήθηκαν, χαρακτηριζόμενες από διαφορετικές θερμοκρασίες σκυροδέτησης και δοκιμής, αλλά με την ίδια απόλυτη διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta t=40^{\circ}C$ ) μεταξύ σκυροδέτησης και δοκιμής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ χαμηλότερη αντοχή συνάφειας όταν μειωνόταν η θερμοκρασία μεταξύ σκυροδέτησης και δοκιμής κατά  $\Delta t$ , παρά όταν αυξανόταν. Η επίδραση αυτή οφείλεται στη συστολή και διαστολή της ράβδου, η οποία προκαλείται από τη μείωση και αύξηση, αντίστοιχα, της θερμοκρασίας, αφού και τα δύο φαινόμενα επηρεάζουν σημαντικά τη συνιστώσα της τριβής του μηχανισμού συνάφειας. Ως εκ τούτου, εκτός από την τραχύτητα της επιφάνειας, ο συντελεστής της θερμικής διαστολής των ράβδων FRP είναι μία σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς συνάφειας των λείων ράβδων, αφού αυτός ο συντελεστής είναι υπεύθυνος για την μεταβολή της ακτινικής τάσης επάνω στη ράβδο, όταν οι θερμικές συνθήκες ποικίλουν.



### 2.5.3 Εύρος ρωγμών και συρρίκνωση

Οι Zhao, Pilakoutas και Waldron (1997) μελέτησαν τη συμπεριφορά των δοκών σκυροδέματος, οπλισμένων με χάλυβα και ράβδους EUROCRETE GFRP και εξέτασαν τα εύρη των ρωγμών, καθώς και την ανάπτυξή τους. Οι επικαλύψεις σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 25 mm. Η εξίσωση *BS 8110* για πρόβλεψη του εύρους ρωγμών χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη του εύρους των ρωγμών των οπλισμένων δοκών με FRP. Τα αποτελέσματα ήταν ελαφρώς μη-συντηρητικά. Συμπέραναν πως οι προσεγγίσεις του κανονισμού δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, την επίδραση των διαφορετικών επιφανειών στη συνάφεια και τις μεγάλες παραμορφώσεις που πιθανόν να αναπτυχθούν στις ράβδους FRP. Η επίπτωση της συρρίκνωσης στις ράβδους FRP ήταν καταφανέστατη σε σχέση με τον χαλύβδινο οπλισμό.

### 2.5.4. Ολκιμότητα

Ο Malvar (1994) μελέτησε αναλυτικά μία υβριδική ράβδο FRP κατασκευασμένη από δύο τύπους ινών, με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας. Τα συμπεράσματα που κατέληξε είναι πως είναι πιθανόν να σχεδιαστούν υβριδικές FRP ράβδοι οπλισμού, οι οποίες θα προσφέρουν υψηλή αρχική ακαμψία, ψευδο-ολκιμότητα και σκλήρυνση, καθώς και υψηλές παραμορφώσεις κατά την αστοχία. Η υψηλή αρχική τους ακαμψία θα διασφάλιζε μικρότερες βυθίσεις και καλύτερη εκμετάλλευση του σκυροδέματος. Η δυνατότητά τους για ψευδο-ολκιμότητα και σκλήρυνση θα επέτρεπε την αναδιανομή των δυνάμεων και την πρόληψη μιας ξαφνικής κατάρρευση της οικοδομής. Η υψηλή παραμόρφωση κατά την αστοχία, θα λειτουργεί ως προσήμανση αστοχίας. Έτσι, οι ιδιότητες αυτών των υβριδικών ράβδων FRP θα μπορούσαν να είναι πολύ παρόμοιες με αυτές των ράβδων χάλυβα.

Πειραματικές δοκιμές με υβριδικές ράβδους, που πραγματοποιήθηκαν από τους Tamuzs et al. (1994), έδειξαν πως ενδέχεται να υπάρξουν προβλήματα ως προς την απόκτηση ολκιμότητας της ράβδου. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν η συνάφεια μεταξύ των ινών είναι

καλή, η θραύση της δέσμης των πιο άκαμπτων ινών, επιφέρει αστοχία και των μαλακότερων γειτονικών ινών και ως εκ τούτου καταστρέφει την ολκιμότητα του υβριδίου. Εν τούτοις, εάν η συνάφεια μεταξύ των ινών είναι περιορισμένη, η εξάπλωση της ρήξης από τις ήδη σπασμένες άκαμπτες ίνες, στις μαλακότερες, περιορίζεται και έτσι μπορεί να διατηρηθεί η ολκιμότητα του υβριδίου. Η ολκιμότητα μιας ράβδου μπορεί να αυξηθεί με πλέξεις ινών, τυλιγμένες γύρω από έναν ειδικά σχεδιασμένο αβαθή πυρήνα (Tamuzs et al. 1995, Arpinis et al. 1998 και Arpinis et al. 1999). Όταν τα ανθρακονήματα μονής κατεύθυνσης αναμιγνύονται σε συγκεκριμένη αναλογία με ίνες αραμιδίου ή γυαλιού, οι ράβδοι FRP αποκτούν μια σχέση τάσης παραμόρφωσης όμοια με αυτή των ράβδων χάλυβα ψυχρής έλασης. Όταν η παραμόρφωση φτάσει σε ένα οριακό σημείο, περίπου 1.2%, οι ίνες άνθρακα σπάνε και διαδοχικώς μεταφέρουν τη φόρτιση στις ίνες αραμιδίου ή γυαλιού, με διακοπή επιμήκυνσης περίπου 3%. Η αναλογία του μίγματος ινών, η διαδικασία εμποτισμού της ρητίνης και η επίπτωση του μεγέθους των νημάτων και των ράβδων, είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης ψευδο-ολκιμότητας (Arpinis et al. 1999).

Στα πλαίσια μιας έρευνας επάνω στην δυνατότητα περιστροφής, οι Lees & Burgoyne (1996) ετοίμασαν μία σειρά δοκού μικρής κλίμακας, με τη χρήση δύο τύπων τενόντων: AFRP και από χάλυβα. Εξετάσθηκε η συνάφεια, σε δοκούς με τένοντες συνδεδεμένους σε όλο το μήκος τους, τένοντες μη συνδεδεμένους (το κεντρικό τμήμα του τένοντα είναι μη συνδεδεμένο) ή μερικώς συνδεδεμένους τένοντες (συνδεδεμένους κατά τμήματα). Βρέθηκε ότι, αντίθετα με τους τένοντες που είναι συνδεδεμένοι σε όλο το μήκος και τους μη συνδεδεμένους τένοντες, οι δοκοί με εν μέρει συνδεδεμένους τέντονες ανέπτυξαν και μία υψηλή ικανότητα περιστροφής, αλλά και υψηλή αντοχή. Έτσι, βγήκε το συμπέρασμα πως η έκταση και η κατανομή της συνάφειας κατά μήκος του τένοντα FRP, επηρεάζει σημαντικά την καμπτική συμπεριφορά της δοκού. Οι δοκοί με συνδεδεμένους σε όλο το μήκος τους FRP τέντονες χαρακτηρίζονται από καλή διανομή ρωγμών και υψηλή ροπή αντοχής. Η αστοχία οφείλεται στην ρήξη του τένοντα, με περιορισμένη ικανότητα περιστροφής. Στις δοκούς με μη-συνδεδεμένους τέντονες, υπήρχε μόνο μία μεγάλη κύρια ρωγμή και η αστοχία επήλθε εξαιτίας της σύνθλιψης του θρυμματισμού του σκυροδέματος, μετά από μία σημαντική περιστροφή. Η οριακή τους αντοχή ήταν

χαμηλότερη από αυτή των δοκών με συνδεδεμένο τένοντα σε όλο το μήκος τους. Σε κάποιες από τις δοκούς με εν μέρει συνδεδεμένους τένοντες, έγινε συνδυασμός μιας υψηλής ικανότητας περιστροφής και μιας υψηλής οριακής αντοχής με σχηματισμό πολλαπλών ρωγμών.

### **2.5.5 Κόπωση και καταστροφή της επιφάνειας των εμπεγμένων ράβδων FRP**

Σε δοκούς σκυροδέματος που υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση, η ολίσθηση των προεντεταμένων καλωδίων FRP στους εκτροπείς μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της επιφάνειας των ράβδων, με επακόλουθη καταστροφή της ράβδου. Το ίδιο μπορεί να συμβεί κοντά σε ρωγμές που δημιουργήθηκαν λόγω κάμψης, όπου οι τάσεις συνάφειας είναι υψηλές και προκαλούν αυξημένη ολίσθηση. Δεν υπάρχουν αποτελέσματα δημοσιευμένα στην βιβλιογραφία σχετικά με την καταστροφή της επιφάνειας των FRP κοντά σε ρωγμές. Το πρόβλημα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Στην έρευνά τους, οι Sipper και Mayer (1996) κατέληξαν πως μία επικάλυψη πάχους 0.35 mm, με βάση την σκόνη εποξέως, αναμεμιγμένη με άμμο και σκληρυμένη υπό θερμικές συνθήκες, επάνω σε μια πλέξη GFRP, μπορεί να προστατέψει τις ίνες από την καταστρεπτική αποξυστική ολίσθηση κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Η αντίστροφη κυκλική φόρτιση (με ελάχιστο φορτίο 0 kN) δεν επηρέασε την οριακή τάση συνάφειας. Η φόρτιση και αποφόρτιση οδήγησε σε αυξημένη ολίσθηση και σε μία παραμένουσα μετατόπιση μετά από κάθε κύκλο φόρτισης. Με τη νέα επικάλυψη, ο αριθμός των κύκλων της φόρτισης που μπορεί να πραγματοποιηθούν, ιδιαίτερα στα επίπεδα του φορτίου λειτουργίας, αυξήθηκε κατά 10.

Οι Shield, French & Retika (1997) διερεύνησαν την επίδραση της θερμικής και μηχανικής κόπωσης στη συνάφεια μεταξύ μιας ράβδου GFRP με ελικοειδείς νευρώσεις και του σκυροδέματος με θλιπτική αντοχή 55 MPa. Τα μήκη έμπτυξης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προκληθεί αστοχία σε όλα τα δοκίμια. Μεταξύ των 30 δοκιμίων, έξι ήταν

μηχανικά κυκλωμένα με τη διαδικασία εξόλκευσης-εφελκυσμού, μεταξύ 20-50% στατικών  $F_u 10^5$  κύκλων, δώδεκα δοκίμια ήταν θερμικά κυκλωμένα 20 φορές μεταξύ -20 και +25°C και δώδεκα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια ελέγχου. Κατά τη διάρκεια της θερμικής κόπωσης, οι ράβδοι ετέθησαν και υπό ένα συνεχές εφελκυστικό φορτίο της τάξεως των 5%  $F_u$ . Τα δοκίμια με ράβδους GFRP δεν παρουσίασαν καμία μείωση στην αντοχή συνάφειας εξαιτίας της μηχανικής κόπωσης, ενώ οι χαλύβδινες ράβδοι παρουσίασαν μια μείωση της τάξης του 13%. Η θερμική κόπωση παρουσίασε μείωση 12% της αντοχής συνάφειας στις ράβδους GFRP και μόνο 3% στο χάλυβα. Παρά ταύτα, οι ράβδοι GFRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οπλισμός σε κατασκευές σκυροδέματος, επειδή το ποσοστό της μείωσης της συνάφειας εξαιτίας της θερμικής κόπωσης, ήταν παρόμοιο με αυτό των οπλισμένων με χάλυβα δοκιμίων, εξαιτίας της μηχανικής κόπωσης.

### **2.5.6 Επίδραση του περιβάλλοντος στην συνάφεια**

Οι Mashima και Iwamoto (1993) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά συνάφειας των ράβδων FRP σε σκυρόδεμα, μετά από ανακυκλιζόμενες ενέργειες ψύξης και τήξης. Οι συγγραφείς πραγματοποίησαν δοκιμές συνάφειας σε κυβικά δοκίμια 100 mm, με μία ράβδο FRP εμπηγμένη στο κέντρο του δοκιμίου. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι FRP από άνθρακα, βινύλιο, γυαλί και αραμίδιο. Μετά από πολλούς κύκλους ψύξης και τήξης, παρατηρήθηκε πως στην περίπτωση των ράβδων GFRP, CFRP και VFRP, η αντοχή συνάφειας δεν μεταβλήθηκε σημαντικά, ενώ η αντοχή συνάφειας των ράβδων AFRP μειώθηκε σταδιακά με την πρόοδο των κύκλων ψύξης και τήξης.

Οι Urruluri et al. (1996) ανέπτυξαν αναλυτικές και πειραματικές τεχνικές, για την πρόβλεψη της επίπτωσης που θα είχε στη συνάφεια οπλισμού FRP και σκυροδέματος, η επιβολή φόρτισης σε επίπεδο λειτουργικού φορτίου της κατασκευής. Παρουσίασαν μία πειραματική επαλήθευση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων συνάφειας, με και χωρίς επιβολή φόρτου λειτουργίας. Παρατηρήθηκε συμφωνία μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής τάσης συνάφειας και της καμπύλης φορτίου-ολίσθησης, καθιστώντας

δυνατή την πρόβλεψη της επίπτωσης της ξεχωριστά μετρούμενης περιβαλλοντικής υποβάθμισης των υλικών FRP στην μακράς διάρκειας συμπεριφορά της συνάφειας. Εξήχθηκε το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά σε εξόλκευση των χημικά επεξεργασμένων ράβδων του εμπορίου, μπορεί να προβλεφθεί με την διενέργεια ενός απλού πειράματος σε μία μεμονωμένη ράβδο, για τον προσδιορισμό του ποσοστού υποβάθμισης της μήτρας και με την μετέπειτα χρήση κανονικοποιημένων καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης, οι οποίες έχουν ως παράμετρο το ποσοστό υποβάθμισης της μήτρας. Έτσι, τα μοντέλα παρέχουν ένα μέσο παράκαμψης της ανάγκης διενέργειας πραγματικών άμεσων δοκιμών εξόλκευσης για τον προσδιορισμό της αντίστασης σε διάβρωση και της συνάφειας των υποβαθμισμένων ράβδων, όπου και μόνο οι χοντρικές προβλέψεις είναι επαρκείς.

Οι Al-Dulaijan και Nanni, Al-Zahrani, Bakis και Boothby (1996) διενήργησαν άμεσες δοκιμές εξόλκευσης FRP/σκυροδέματος, αντανάκλασης ηχητικών σημάτων και δοκιμές μικρών δοκών FRP διατμητικής αντοχής, με στόχο την απόδειξη της επίπτωσης των διαβρωτικών περιβαλλοντικών συνθηκών στην συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων FRP. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι ράβδων γυαλιού, εστέρα βινυλίου, με διαφορετικές μορφές της εξωτερικής επιφάνειας τους: «μηχανικά επεξεργασμένη ράβδος γυαλιού εστέρα βινυλίου» (MGV) και δύο «GFRP ράβδοι που διατίθενται στο εμπόριο» (CP και IG). Η συνθήκη της δοκιμής ήταν: εμπύθιση των δειγμάτων FRP/σκυροδέματος για 28 ημέρες σε ένα κεκορεσμένο διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου, με υψηλό pH και θερμοκρασία (στους 60°C).

Παρατηρήθηκε πως τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον παρουσίασαν υποβάθμιση της συνάφειας, σε σύγκριση με τα δοκίμια ελέγχου. Για τις ράβδους MGV με αξονοσυμμετρικές νευρώσεις, η αστοχία συνάφειας προκλήθηκε από διάτμηση των νευρώσεων και σε φορτίο κατά 14% χαμηλότερο από αυτό των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η μείωση οφειλόταν στην υποβάθμιση της ρητίνης. Η μείωση του επιμήκους μέτρου ελαστικότητας των ράβδων ήταν 9% και οφειλόταν στην φθορά των ινών. Οι ράβδοι CP παρουσίασαν κατά 65% χαμηλότερη αντοχή συνάφειας. Η υποβάθμιση της αντοχής συνάφειας σχετίστηκε με μία μείωση κατά 12% του επιμήκους συντελεστή και κατά 30% της διατμητικής αντοχής συνάφειας

της ράβδου. Ο μηχανισμός συνάφειας της ράβδου αυτού του τύπου, ελέγχεται από την πλούσια σε ρητίνη επιφάνεια. Οι ράβδοι IG παρουσίασαν μία μείωση της αντοχής συνάφειας κατά 38%. Η μείωση συνέβη ταυτόχρονα με μία μείωση κατά 17% του διαμήκους συντελεστού και με μία μείωση κατά 11% της διατμητικής αντοχής της ράβδου. Καμία αριθμητική συσχέτιση του φορτίου εξόλκευσης με την διατμητική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας δεν στάθηκε δυνατή, αφού ο μηχανισμός συνάφειας ελέγχεται από την επικάλυψη ρητίνης της ράβδου FRP.

Οι Bank, Puterman και Katz (1997) κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα. Εξέτασαν ράβδους FRP, που είχαν υποβληθεί σε υδατικό διάλυμα επί 14 και 84 ημέρες, σε θερμοκρασία 80°C, οι οποίες παρουσίασαν σημαντική υποβάθμιση του υλικού τους, εξαιτίας της φθοράς της πολυμερούς ρητίνης. Οι συγγραφείς βρήκαν μία καλή συσχέτιση μεταξύ της υποβάθμισης του υλικού και της μείωσης της αντοχής συνάφειας και των ιδιοτήτων ακαμψίας των ράβδων FRP.

Οι Sen, Shahawy, Sukumar και Rosas (1998) μελέτησαν την επίπτωση της κυματοειδούς έκθεσης στη συνάφεια των ράβδων CFRP, με τη χρήση δοκιμών δοκού και εξόλκευσης. Τα δοκίμια εκτέθηκαν επί 18 μήνες σε τρία πανομοιότυπα περιβάλλοντα υγρά, σε υπαίθριες δεξαμενές, προσομοίωση παλιρροϊκών κύκλων με υψηλό ποσοστό υγρασίας όταν ήταν έξω από το νερό και συνδυασμένους παλιρροϊκούς/θερμικούς κύκλους. Το νερό της δεξαμενής θερμάνθηκε στους 60°C, με μία χρονική περίοδο ψύξεως έξω από το νερό. Τα αποτελέσματα από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε εξόλκευση έδειξαν σημαντικότερη αύξηση της μέγιστης μέσης τάσης συνάφειας κατά τη διάρκεια των πρώτων δώδεκα μηνών, και κατά την υποβολή τους σε κύκλους υγρό/στεγνό, και κατά την υποβολή τους στη συνδυασμένη επίδραση υγρού/στεγνού και θερμικών κύκλων. Οι ράβδοι απορρόφησαν νερό και διογκώθηκαν. Αυτή η βελτίωση στη συνάφεια, δεν παρατηρήθηκε, εν τούτοις, στις δοκούς που εξετάστηκαν, όπου η υποβάθμιση της συνάφειας παρατηρήθηκε πως επηρέαζε και τον τρόπο αστοχίας και την οριακή αντοχή, μέσα στα ίδια χρονικά πλαίσια. Η αύξηση της αντοχής συνάφειας που ελήφθη από τις δοκιμές εξόλκευσης πιστεύεται πως κατά πολύ μεγάλο ποσοστό οφείλεται την απορρόφηση υγρασίας και από το αγκυρωμένο, αλλά και από το προεξέχον μέρος της

ράβδου CFRP, η οποία οδήγησε σε σημαντική αύξηση της συνιστώσας της τριβής της συνάφειας. Καθώς αυτή η αύξηση της συνάφειας έγινε αισθητή μετά τη διάρκεια των πρώτων δώδεκα μηνών της έκθεσης, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως δεν θα ήταν σωστό να χρησιμοποιήσουμε δοκίμια εξόλκευσης σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Τέτοιες δοκιμές είναι απίθανο να παρέχουν ρεαλιστική μέτρηση της αληθούς συνάφειας σε εκτεθειμένα καμπτόμενα μέρη. Η έλλειψη περισφιξης στις δοκούς, σε σύγκριση με τις δοκιμές εξόλκευσης, ήταν πιθανώς η αιτία των παρατηρήσεων αυτών. Μετά από 18 μήνες, παρατηρήθηκε μείωση της συνάφειας.

Εκτεταμένη έρευνα διεξήχθη από μία ομάδα εργασίας του Προγράμματος EUROCRETE πάνω στην ανθεκτικότητα των οπλισμένων πολυμερών, σε αλκαλικά περιβάλλοντα, καθώς και σε περιβάλλοντα οπλισμένου σκυροδέματος (Sheard 1997). Ο κύριος στόχος ήταν η ανάπτυξη αξιόπιστων πειραματικών μεθόδων και δεδομένων, από τα οποία να μπορεί να περιγραφεί η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των σύνθετων ράβδων σε περιβάλλον σκυροδέματος. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, ξεκίνησε ένα σημαντικότατο πρόγραμμα πειραματικών δοκιμών. Εκτιμώντας τις επιπτώσεις της διαβρωτικής γήρανσης έναντι φορτίων λειτουργίας και αποτιμώντας την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά συνάφειας στο σκυρόδεμα, διαπιστώθηκε ότι:

1. Το περιβάλλον σκυροδέματος αποδείχθηκε λιγότερο διαβρωτικό από το υγρό διάλυμα προσομοίωσης.
2. Η διαδικασία παρασκευής πρέπει να ελέγχεται ιδιαίτερος προσεκτικά, ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα ανθεκτικότητας στην περιοχή των οπλισμένων πολυμερών.
3. Η μήτρα έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ανθεκτικότητα και τα χαρακτηριστικά συνάφειας μιας οπλισμένης ράβδου, απ' ότι η ίδια η ράβδος.
4. Δεν υπάρχει απόδειξη πως οι ειδικά σχεδιασμένες ράβδοι GFRP δεν είναι κατάλληλες για χρήση σε οπλισμένο σκυρόδεμα.

## 2.6 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΑΛΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

### 2.6.1 Συνάφεια πλέγματος οπλισμού FRP στο σκυρόδεμα

Οι Mochizuki & Udagawa (1995) ερεύνησαν τις ιδιότητες αγκύρωσης πλεγμάτων FRP δύο διαστάσεων σε σκυρόδεμα, με τη χρήση δοκιμών εξόλκευσης. Τα πλέγματα κατασκευάστηκαν από ανθρακονήματα ή ίνες άνθρακα και γυαλιού, εμποτισμένα σε εστέρα βινυλίου. Τα δείγματα αποτελούνταν από έναν ορθογωνικό στοιχείο σκυροδέματος πλάτους 300 mm, βάθους 200 και μήκους 650 έως 700 mm, με μία σχισμή που προκαλούσε τη ρωγμή. Μέρος του πλέγματος ενσωματώθηκε στο μισό μέρος κάθε δοκιμίου. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος των δοκιμών ήταν από 28 έως 38 MPa. Οι μεταβλητές του πειράματος ήταν ο τύπος της ίνας, ο αριθμός των διαμήκων ράβδων και ο αριθμός των εγκάρσιων ράβδων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν πως η συνάφεια και η αγκύρωση των δυσδιάστατων πλεγμάτων FRP εξαρτώνται κυρίως από την αντοχή των εγκάρσιων ράβδων στις διασταυρώσεις του πλέγματος. Για τα πλέγματα FRP άνθρακα, απαιτούνταν τουλάχιστον τρεις εγκάρσιες ράβδοι για την επίτευξη ικανοποιητικής αγκύρωσης, ενώ για τα υβριδικά πλέγματα (κατασκευασμένα από ίνες γυαλιού και άνθρακα), απαιτούνταν δύο εγκάρσιες ράβδοι. Κατά την αρχική φόρτιση, εμφανίστηκε μία ρωγμή στην θέση της πρώτης εγκάρσιας ράβδου. Αμέσως μετά την εμφάνιση αυτής της ρωγμής, η κοντινότερη στη ρωγμή εγκάρσια ράβδος προσέλκυσε φορτίο. Καθώς το φορτίο αυξανόταν, η δύναμη σε κάθε διασταύρωση ρωγμής εξισώθηκε. Η διανομή της ροπής κάμψης στην ελεγχόμενη περιοχή της εγκάρσιας ράβδου θεωρείται ανάλογη με αυτή ενός πλευρικά φορτισμένου, πακτωμένου στο έδαφος πασάλου και αυτή στην περιοχή μεταξύ των τομών ανάλογη με αυτή μιας αμφίπακτου δοκού.

Οι Kobayashi, Rahman και Fujisaki (1997) πρότειναν έναν τύπο για τον προσδιορισμό του εύρους των ρωγμών, αφού μελέτησαν τον μηχανισμό μεταφοράς της τάσης σε πλάκες με εγκάρσιο οπλισμό *NEF MAC-RC*. Φαίνεται πως το εύρος της ρωγμής  $w$  είναι



κυρίως συνάρτηση της απόστασης των ράβδων του πλέγματος και του ποσοστού του οπλισμού.

$$w = C_f \beta (\varepsilon_s + \varepsilon_{cs}) \quad (1.5.1)$$

όπου:

$$C_f = k + l L + m f_{ct} / (\rho_t f_u) \quad (1.5.2)$$

- με:
- $\beta$  = λόγος της απόστασης μεταξύ του ουδέτερου άξονα και της πιο απομακρυσμένης από αυτόν εφελκυστικής ίνας και μεταξύ του ουδέτερου άξονα και του κέντρου βάρους του κυρίως οπλισμού.
  - $\varepsilon_s$  = η παραμόρφωση στον οπλισμό *NEFMAC*
  - $\varepsilon_{cs}$  = συρρίκνωση του σκυροδέματος
  - $L$  = η απόσταση των ράβδων του πλέγματος του οπλισμού *NEFMAC*
  - $k, l, m$  = αριθμητικές σταθερές, αντίστοιχα 4.956, 1.006 και 5.03.
  - $f_{ct}$  = εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
  - $\rho_t$  = γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού
  - $f_u$  = αντοχή εφελκυσμού *NEFMAC*

Η παραπάνω εξίσωση, είμαι μια τροποποίηση της εξίσωσης των Gergely και Lutz. Τα προβλεφθέντα εύρη των ρωγμών συμφωνούν με αυτά που μετρήθηκαν. Για χαμηλά ποσοστά οπλισμού, τα εύρη των ρωγμών έφτασαν τα 0.3 έως 0.5 mm, αμέσως μετά την πρώτη ρωγμή.

Πλέγματα FRP (άνθρακα, εστέρα βινυλίου), διαφόρων σχεδίων, τοποθετήθηκαν ως οπλισμός σε δοκούς σκυροδέματος και ελέγχθηκαν ως προς την καμπτική συμπεριφορά. Τα πλέγματα μεταβιβάζουν φορτία αγκύρωσης μέσω των εγκάρσιων μερών, τα οποία παρέχουν μηχανική αλληλεπίδραση με το σκυρόδεμα. Χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα σχέδια πλέγματος: 1) πλέγματα με συνδετικότητα των ινών μεταξύ παράπλευρων στρώσεων, 2) σταυροειδούς πλέξης, χωρίς συνδετικότητα των ινών της στρώσης, 3) συνδυασμός σταυροειδούς πλέξης και ινών (33% και 67%) που γυρίζουν τις γωνίες. Οι ίνες που περνάνε συνεχόμενες τον κόμβο, έχουν άμεση επίδραση στην ακαμψία της δοκού (αγκύρωσης), ενώ οι αλληλοσυνδεόμενες ίνες, εξαιτίας της ύφανσης, έχουν δευτερεύουσα επίδραση στην ακαμψία της δοκού.

## 2.6.2 Συνάφεια των υφασμάτων σε κατασκευές σκυροδέματος

Τα υφάσματα έχουν μεγάλη δυνατότητα οπλισμού λεπτών στοιχείων, για την κατασκευή στοιχείων από σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης. Η διαδικασία κατασκευής των υφασμάτων και η πλέξη τους, προκαλεί κατάρωση στις ίνες. Οι Peled, Yankelevsky και Bentur (1995) παρουσίασαν μία μελέτη επάνω στη συνάφεια μεταξύ μονών υφασμάτων πολυαιθυλενίου και της μήτρας από τσιμέντο. Η μελέτη διενεργήθηκε σε καμπύλα υφάσματα, τα οποία κατασκευάστηκαν με ύφανση διαφόρων υλικών. Ήταν απλής ύφανσης με διάφορες πυκνότητες υφάσματος. Για σύγκριση εξετάσθηκαν κι ίσια υφάσματα. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης για την διερεύνηση των μηχανισμών συνάφειας. Παρατηρήθηκε ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλεγμάτων είχαν σαφή επίδραση στις παραμέτρους αντοχής συνάφειας. Η κατσαρή δομή είναι υπεύθυνη για τον κύκλο φόρτισης κατά την εξόλκευση. Τα συμπεράσματα ήταν τα ακόλουθα:

1. Η ελικοειδής δομή των υφασμάτων βελτίωσε την ικανότητα συνάφειας μεταξύ μονών υφασμάτων πολυαιθυλενίου και της μήτρας από τσιμέντο, σε σύγκριση με τα ίσια υφάσματα.
2. Η αντοχή εξόλκευσης ενός ελικοειδούς υφάσματος εξαρτάται σημαντικά από την δομή της ύφανσής του: μείωση του πλάτους μειώνει την αντοχή συνάφειας ενώ η μείωση του μήκους της ύφανσης συνεισφέρει σε μία αυξημένη αντοχή.
3. Η πυκνότητα του πλέγματος επηρεάζει την δομή ύφανσης των υφασμάτων, και στο μήκος και στο πλάτος της ύφανσης. Αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή συνάφειας.
4. Η ελικοειδής δομή είναι υπεύθυνη για τον κύκλο φορτίου κατά την εξόλκευση, εξαιτίας μεταβολών φάσης μεταξύ της κατασκευής με ελικοειδές νήμα και της κατασκευής της μήτρας με ελικοειδείς αυλακώσεις.

### 2.6.3 Δοκοί με οπλισμό από πλαστικό προφίλ

Ο Kettil (1995) μελέτησε σύνθετες δοκούς από σκυρόδεμα και δομικά προφίλ από ινοπλισμένο πολυμερές (FRP). Τα προφίλ FRP έχουν χαμηλή αναλογία ακαμψίας προς αντοχή, καθιστώντας το βέλος κάμψεως και τον λυγισμό πολύ κρίσιμα. Η προσθήκη σκυροδέματος στα προφίλ FRP, βελτιώνει την ακαμψία, προλαμβάνει τον λυγισμό και μπορεί να αυξήσει την διατμητική αντοχή. Η μελέτη κατέληξε σε τύπους για την ακαμψία και την καμπτική αντοχή και παρουσιάστηκαν μοντέλα για την διατμητική αντοχή και την παραμορφωσιμότητα. Οι λεπτομέρειες για την συνάφεια αποδείχθηκαν σημαντικές για την δράση της σύνθετης κατασκευής. Η αντοχή της συνάφειας, όταν επικολλήθηκε άμμος στην επιφάνεια GFRP, ήταν τουλάχιστον 3 MPa. Δεν προέκυψε ολίσθηση μεταξύ σκυροδέματος και GFRP. Δεν υπήρξε καμία αστοχία συνάφειας, όταν προστέθηκαν συνδετήρες. Η παρατηρηθείσα συμπεριφορά ήταν σχετική με τις θεωρητικές προβλέψεις, αλλά ένας επιπλέον μεγάλος αριθμός δοκιμών θεωρήθηκε απαραίτητος για λόγους επαλήθευσης.

## 2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την έρευνα των δοκιμών εξόλκευσης σε ράβδους FRP, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της ράβδου FRP (εσοχές, αυλακώσεις, άμμος, νευρώσεις), επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή συνάφειας και την ολίσθηση. Για καλό σκυρόδεμα, μάλλον ο τύπος της ρητίνης και όχι ο τύπος της ίνας, ελέγχει την αντοχή συνάφειας. Εάν προκύψει διάτμηση των νευρώσεων, το ύψος των νευρώσεων δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στην αντοχή συνάφειας.
2. Οι ράβδοι FRP με καλά συγκολλημένες νευρώσεις, φαίνονται να έχουν καλύτερη συνάφεια από αυτές του χάλυβα σε χαμηλά φορτία, αλλά αργότερα, παρουσιάζουν αυξημένη ολίσθηση, εξαιτίας του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητάς τους και του λόγου *Poisson*. Οι αντοχές συνάφειας είναι

γενικότερα συγκρίσιμες με αυτές των ράβδων από χάλυβα, αν και για κανονικές αντοχές σκυροδέματος, η αστοχία συνάφειας είναι πιθανότερο να οφείλεται σε καταστροφή της διεπιφάνειας FRP-σκυροδέματος. Συνέπεια αυτού, η αντοχή σκυροδέματος δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση, όπως στην περίπτωση του χάλυβα. Παρά ταύτα, για χαμηλές αντοχές σκυροδέματος η αστοχία της συνάφειας παρουσιάζεται στο σκυρόδεμα.

3. Η επικάλυψη της επιφάνειας της ράβδου με άμμο, επίσης παρέχει ακαμψία συνάφειας σε χαμηλά φορτία, αλλά σε υψηλότερα φορτία, η επιφανειακή στρώση μπορεί να αποσχιστεί. Αυτό συμβαίνει σε θλιπτικές αντοχές σκυροδέματος πάνω από  $f_{cc} = 30-40$  MPa. Μετά την απόσχιση της επιφάνειας μπορεί να αναπτυχθεί ένας φθίνοντας κλάδος τριβής, ο οποίος μπορεί να διατηρήσει το 50% της οριακής αντοχής συνάφειας. Αυτή η τριβή μπορεί να αποδειχθεί σημαντική σε μεγάλα μήκη αγκύρωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βελτίωση της ολκιμότητας των δομικών στοιχείων σκυροδέματος. Οι οδοντώσεις στην επιφάνεια της ράβδου, αυξάνουν επίσης τη συνάφεια. Ράβδοι με επικαλυμμένη άμμο στην επιφάνεια τους, φαίνονται να παρουσιάζουν χαμηλότερη τάση για απόσχιση, απ' ότι οι λείες ράβδοι.
4. Οι ράβδοι με ίνες τυλιγμένες σπειροειδώς στην επιφάνειά τους παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις στην συνάφεια.
5. Μικρότερες διαμέτροι ράβδων, δίνουν υψηλότερη αντοχή συνάφειας.
6. Επίπεδες ή τετράγωνες ράβδοι ενδέχεται να έχουν μεγαλύτερη αντοχή συνάφειας από τις στρογγυλές, αλλά μπορεί να οδηγήσουν και σε αυξημένες δυνάμεις απόσχισης στο περιβάλλον σκυρόδεμα.
7. Οι ράβδοι που έχουν τοποθετηθεί στο πάνω μέρος της διατομής έχουν περίπου 10 με 30% χαμηλότερη αντοχή συνάφειας εάν η αστοχία οφείλεται στο σκυρόδεμα και όχι στην απόσχιση της επιφάνειας της αγκυρωμένης ράβδου.
8. Η περίσφιξη των ράβδων φαίνεται να αυξάνει την αντοχή συνάφειας. Η εγκάρσια πίεση στην δοκό φαίνεται να έχει θετική επίδραση στην αγκύρωση των ράβδων FRP. Αυτό, εν τούτοις, μπορεί να εξαρτάται από τον τύπο της ράβδου. Οι ράβδοι FRP συμπιέζονται εύκολα και έτσι, η επίδραση της περίσφιξης μπορεί να είναι περιορισμένη.

9. Η περίσφιξη με περιτύλιξη του δομικού στοιχείου σκυροδέματος με φύλλο ανθρακονημάτων για την πρόληψη της περίσφιξης, αυξάνει την αντοχή συνάφειας των εμπεγμένων ράβδων FRP.
10. Η τάση για απόσχιση των ράβδων FRP μπορεί να μελετηθεί με τη χρήση δοκιμών έκκεντρης εξόλκευσης και με εκτίμηση των αποτελεσμάτων με τη θεωρία του πυκνού δακτυλίου γύρω από τη δοκό.
11. Το μήκος έμπηξης επηρεάζει τη μέση τάση συνάφειας, λόγω της προοδευτικής φύσης της αστοχίας συνάφειας. Η ολίσθηση του φορτισμένου άκρου κατά την έναρξη της ολίσθησης στο ελεύθερο άκρο αυξάνει με αύξηση του μήκους αγκύρωσης και με μείωση της διαμέτρου και παραμένει σχετικά σταθερή σε ράβδους με λόγο του μήκους αγκύρωσης σε σχέση με την διάμετρο.
12. Προεντεταμένες ράβδοι FRP μπορεί να έχουν αυξημένη αντοχή συνάφειας.
13. Οι ιδιότητες της ρητίνης φαίνεται να επηρεάζουν τον ερπυσμό του FRP σε χαμηλά φορτία. Σε μεγαλύτερες φορτίσεις, ο ερπυσμός του σκυροδέματος σε θλίψη, αναμένεται να έχει σημαντικότερη επίπτωση στις παραμορφώσεις του στοιχείου.
14. Η μηχανική κόπωση μειώνει την αντοχή συνάφειας των ράβδων χάλυβα κατά 13%, όχι όμως και αυτή των GFRP ράβδων.
15. Μία λεπτή επικάλυψη με βάση τη σκόνη εποξέως, αναμειγμένη με άμμο, μπορεί να μειώσει την φθορά των ινών λόγω κόπωσης.
16. Οι ράβδοι FRP που εκτίθενται σε θερμικό κύκλο σε σκυρόδεμα, παρουσιάζουν μία μείωση κατά 12% της αντοχής συνάφειας, ενώ οι ράβδοι από χάλυβα κατά 3%.
17. Η χρήση ράβδων FRP με διακοπτόμενα μήκη αγκύρωσης, μπορεί να αυξήσει την ικανότητα στροφής των δοκών σκυροδέματος. Οι υβριδικές ράβδοι με αρχική υψηλή ακαμψία, ψευδο-ολκιμότητα και κράτυνση, μπορούν να επιτρέψουν την ανακατανομή των δυνάμεων και να προλάβουν μία ξαφνική δομική κατάρρευση, όπως ακριβώς γίνεται και με το χάλυβα.
18. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην υποβάθμιση της συνάφειας μπορούν να προβλεφθούν με πειράματα διάβρωσης και κατάλληλη μοντελοποίηση.

19. Πειράματα με χρήση πλέγματος FRP σε σκυρόδεμα, δείχνουν ότι η αγκύρωση βελτιώνεται από τις εγκάρσιες ράβδους FRP. Όταν αυξάνει το φορτίο, οι μοιραζόμενη δύναμη για κάθε εγκάρσια δοκό κατά μήκος της αγκύρωσης, εξισώνεται. Το εύρος των ρωγμών εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του πλέγματος.
20. Τα υφάσματα FRP έχουν δυνατότητα ενίσχυσης λεπτών στοιχείων σκυροδέματος. Μελέτες συνάφειας σε υφάσματα πολυαιθυλενίου σε τσιμεντοειδή μήτρα, κατέληξαν πως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν τεράστια επίδραση στη συνάφεια και πως μία ελικοειδής κατασκευή είναι προτιμητέα.
21. Διατομές προφίλ FRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οπλισμός σε στοιχεία σκυροδέματος και να παρέχουν εργασιμότητα κατά την σκυροδέτηση. Τα σχήματα μπορούν να έχουν συνδέσμους διάτμησης ή επιφάνεια επικαλυμμένη με άμμο, για βελτιωμένη συνάφεια.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Η ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. ΤΟΥ Ε.Μ.Π..**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη και ανακυκλιζόμενη αξονική καταπόνηση της ράβδου, επινοήθηκε και σχεδιάστηκε στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. μια νέα πειραματική δοκιμή δοκού, που στηρίζεται στην κάμψη δοκού τεσσάρων σημείων. Η διαστασιολόγηση της δοκού και των υπολοίπων στοιχείων της διάταξης της δοκιμής έγινε με βάση παραμετρικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, προκειμένου να απαλειφθούν φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων στα τμήματα της δοκού-δοκιμίου και ανεπιθύμητες τασικές επιδράσεις στην διεπιφάνεια ράβδου οπλισμού-σκυροδέματος.

Η πειραματική ανάπτυξη της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης βασίζεται στις μετρήσεις παραμορφώσεων που γίνονται κατά μήκος των εμπεγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου και στη μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού με το φορτίο δοκιμής.

Σε αντίθεση με την κλασσική δοκιμή δοκού, η άρθρωση των δύο τμημάτων της δοκού δοκιμίου της νέας δοκιμής θα πρέπει να παραλαμβάνει και εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτό επιτυγχάνεται με μια μηχανική άρθρωση που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για αυτό τον σκοπό. Το υλικό, οι διαστάσεις και η αγκύρωση της μηχανικής άρθρωσης στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου επιλέχθηκαν, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία της αγκύρωσης κατά τον εφελκυσμό της άρθρωσης και αστοχία από θρυμματισμό

σκυροδέματος. Για την εκτέλεση της δοκιμής κατασκευάστηκε κατάλληλη διάταξη επιβολής των φορτίων στη δοκό-δοκίμιο, η οποία προσαρμόστηκε στην μηχανή κάμψης τριών σημείων του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π..

Η νέα δοκιμή εφαρμόστηκε για την απόκτηση της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση για ράβδους FRP γνωστής βιομηχανίας του εξωτερικού. Το πειραματικό έργο, που εκτελέστηκε και τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν με βάση την δοκιμή, αυτή παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

### **3.2 Η ΝΕΑ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΗΣ Σ.Α.Τ.Μ. ΤΟΥ Ε.Μ.Π..**

#### **3.2.1 Περιγραφή της νέας δοκιμής**

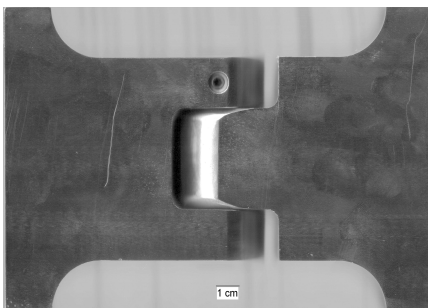
Για τον προσδιορισμό του νόμου συνάφειας-ολίσθησης ράβδων FRP-σκυροδέματος για μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση επινοήθηκε και σχεδιάστηκε η εργαστηριακή δοκιμή της κάμψης δοκού τεσσάρων σημείων που δείχνεται στο Σχήμα 3.1(α). Η δοκός δοκίμιο που προτείνεται αποτελείται από δύο πανομοιότυπα στοιχεία σκυροδέματος σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και διαστάσεων 15x20x60 (cm). Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με μια μηχανική άρθρωση στο πάνω μέρος, και στο κάτω μέρος με την ράβδο FRP που πρόκειται να υποβληθεί σε αξονική φόρτιση. Η μηχανική άρθρωση που σχεδιάστηκε δείχνεται στο Σχήμα 3.1(β) και κατασκευάστηκε σε μηχανουργείο σε πέντε ίδια τεμάχια. Το υλικό των αρθρώσεων είναι χάλυβας υψηλής αντοχής, και οι διαστάσεις του επιλέχθηκαν έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε σκυρόδεμα-άρθρωση να μπορούν να παραληφθούν με ασφάλεια. Επιπλέον, κατά την καταπόνηση της άρθρωσης σε εφελκυσμό, λήφθηκε μέριμνα ώστε η αγκύρωση της στο σκυρόδεμα να είναι ασφαλής. Τα δύο στοιχεία σκυροδέματος συνδέονται μεταξύ τους με την ράβδο FRP που πρόκειται να μελετηθεί. Σε κάθε στοιχείο, η ράβδος FRP είναι αγκυρωμένη σε ένα μήκος 10 cm, ενώ παραμένει ασύνδετη στο υπόλοιπο τμήμα τους.



Για να επιτευχθεί αυτό, στο ασύνδετο τμήμα η ράβδος διέρχεται μέσα από ένα πλαστικό



(α)



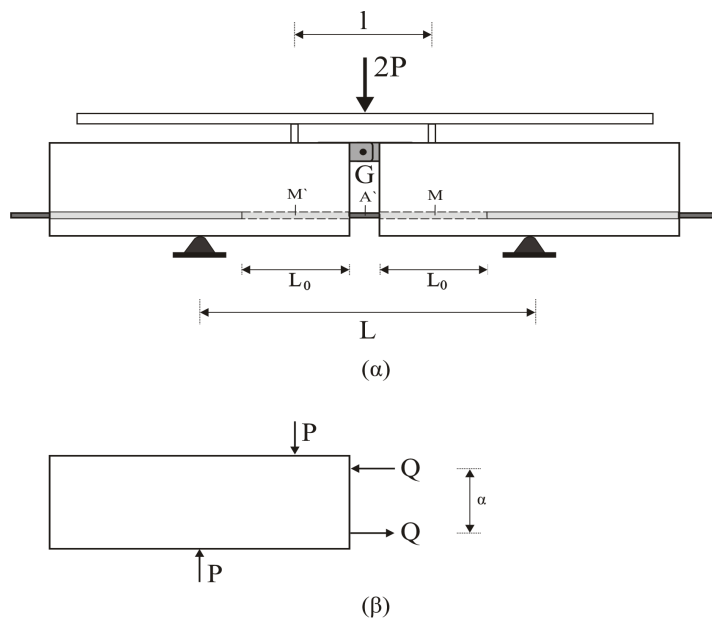
(β)

Σχήμα 3.1: (α) Η δοκός δοκίμιο στην μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων (β) η μηχανική άρθρωση

σωλήνα που έχει τοποθετηθεί πριν την σκυροδέτηση. Η επιβολή των δυνάμεων στην δοκό γίνεται μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου που κατασκευάστηκε για αυτό τον σκοπό και προσαρμόστηκε στην μηχανή κάμψης τριών σημείων. Με το στοιχείο αυτό, η ολική δύναμη της μηχανής διανέμεται σε δύο ίσες δυνάμεις που εξασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στα δύο στοιχεία της δοκού. Επιπλέον, το μεταλλικό στοιχείο έχει κατασκευασθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η απόσταση των δύο αυτών δυνάμεων να μπορεί να μεταβάλλεται. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, με κατάλληλη

μεταβολή της απόστασης αυτής επιτυγχάνεται η αντιστροφή της αξονικής δύναμης που καταπονεί την ράβδο FRP της δοκού-δοκιμίου.

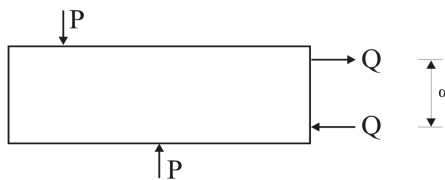
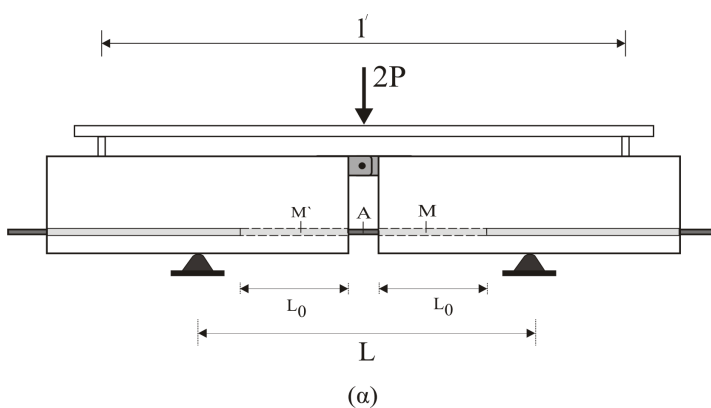
Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής γίνεται ως ακολούθως: η δοκός-δοκίμιο τοποθετείται στην μηχανή έτσι ώστε να σχηματίζεται μια αμφι-προέχουσα αμφιέρειστη δοκός με ένα συγκεκριμένο άνοιγμα  $L$ . Στην συνέχεια, με ρύθμιση του μεταλλικού εξαρτήματος, η δοκός φορτίζεται από την μηχανή με δύο ίσες κατακόρυφες δυνάμεις  $P$ , οι οποίες απέχουν μια επιλεγμένη απόσταση  $l$ , που είναι μικρότερη από το άνοιγμα  $L$  της δοκού-δοκιμίου ( $l < L$ ) (Σχήμα 3.2). Για την διάταξη αυτή των δυνάμεων και των



Σχήμα 3.2: Η νέα πειραματική διάταξη στη φάση του εφελκυσμού της ράβδου FRP: οι δυνάμεις  $P$  που εφαρμόζονται στην δοκό βρίσκονται μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού στηρίξεων της δοκού, δημιουργείται μια κατάσταση καθαρής κάμψης στο τμήμα της δοκού μεταξύ των εφαρμοζόμενων δυνάμεων. Η κατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα, στην διατομή της άρθρωσης, να αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων  $Q$ , του οποίου η ροπή είναι ίση με την σταθερή καμπτική ροπή της δοκού-δοκιμίου. Έτσι, στα δύο τμήματα της δοκού εξασκούνται δύο επιπλέον δυνάμεις: μια θλιπτική δύναμη  $Q$  μέσω της μεταλλικής άρθρωσης, και μια εφελκυστική δύναμη ίσου μεγέθους μέσω της ράβδου. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών είναι ίσο με

$$Q = P \frac{L-l}{2a}$$

Στην σχέση αυτή, το  $a$  είναι ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους των δυνάμεων  $Q$ . Όπως προαναφέρθηκε, η ράβδος FRP είναι αγκυρωμένη σε κάθε τμήμα της δοκού κατά ένα ορισμένο μήκος, ενώ το υπόλοιπο μήκος βρίσκεται σε έναν οριζόντιο σωλήνα. Στα αγκυρωμένα τμήματα της ράβδου έχουν τοποθετηθεί μηκυσιόμετρα για την μέτρηση



Σχήμα 3.3: Η νέα πειραματική διάταξη στη φάση θλίψης της ράβδου FRP: οι δυνάμεις  $P$  που εφαρμόζονται στην δοκό βρίσκονται έξω από τα στηρίγματα της δοκού

των παραμορφώσεων. Επίσης, η οριζόντια μεταβολή της ενδιάμεσης απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού δοκιμίου μετριέται με δύο βελόμετρα.

Η θέση των μηκυσιομέτρων κατά μήκος του εμπηγμένου τμήματος της ράβδου FRP συζητιέται παρακάτω. Η δοκός φορτίζεται βαθμιαία μέχρι μια ορισμένη τιμή των εξωτερικών δυνάμεων  $P$ , και στην συνέχεια αποφορτίζεται βαθμιαία μέχρι οι δυνάμεις αυτές να μηδενισθούν. Όταν η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί, γίνεται ρύθμιση ώστε η απόσταση των ίσων δυνάμεων που εξασκεί η μηχανή στην δοκό να γίνει ίση με μια



(β)

Σχήμα 3.4: Οι προτεινόμενες διαστάσεις της πειραματικής δοκού: (α) στην περίπτωση του εφελκυσμού της ράβδου FRP, και (β) στην περίπτωση θλίψης της ράβδου FRP

### 3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

#### 3.3.1 Προσδιορισμός της ολίσθησης

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η πειραματική μεθοδολογία που μπορεί να εφαρμοσθεί, χρησιμοποιώντας την παραπάνω δοκιμή, για την απόκτηση της τοπικής σχέσης συνάφειας-ολίσθησης, για ένα συγκεκριμένο τύπο ράβδων FRP. Σε μια μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων εισάγεται η δοκός δοκίμιο με τις τυποποιημένες διαστάσεις που δείχνονται στο Σχήμα 3.4. Η μηχανή επιβάλλει στην δοκό δύο ίσες εξωτερικές δυνάμεις P, μέσω της διάταξης που περιγράφηκε προηγούμενα, που παρέχει δυνατότητα μεταβολής της απόστασης μεταξύ των επιβαλλόμενων δυνάμεων. Ενώ επιβάλλονται οι εξωτερικές δυνάμεις P με αυξανόμενο και αργό ρυθμό, καταγράφονται με μηκυσιόμετρα οι παραμορφώσεις στα σημεία A και M της ράβδου οπλισμού, και με δύο LVDT η μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού. Για μια τιμή των εξωτερικών δυνάμεων P, έστω  $\varepsilon_{f,A}$  και  $\varepsilon_{f,M}$  οι παραμορφώσεις στα σημεία αυτά και  $2\Delta l_u$  η μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού. Προφανώς, η παραμόρφωση  $\varepsilon_{f,A}$  είναι ίση με την σταθερή παραμόρφωση  $\varepsilon_{f0}$ , που υφίσταται το κάθε σημείο του μη εμπηγμένου τμήματος της ράβδου, δηλαδή  $\varepsilon_{f,A} = \varepsilon_{f0}$ . Η μεταβολή  $2\Delta l_u$  είναι το άθροισμα της ελαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το ενδιάμεσο μη αγκυρωμένο τμήμα της ράβδου και των ολισθήσεων των ακραίων σημείων της ράβδου. Η διαμήκης μετατόπιση της αριστερής επιφάνειας του δεξιού τμήματος της δοκού (Σχήμα 3.5) θα είναι ίση με:

$$u_{c,A} = \Delta l_u$$

ενώ η μετατόπιση του σημείου A της ράβδου FRP θα είναι ίση με την ελαστική μετατόπιση κατά μήκος  $l_u$  της ράβδου, δηλαδή

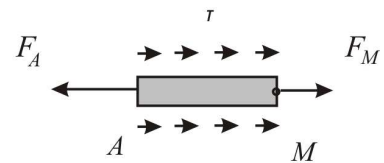
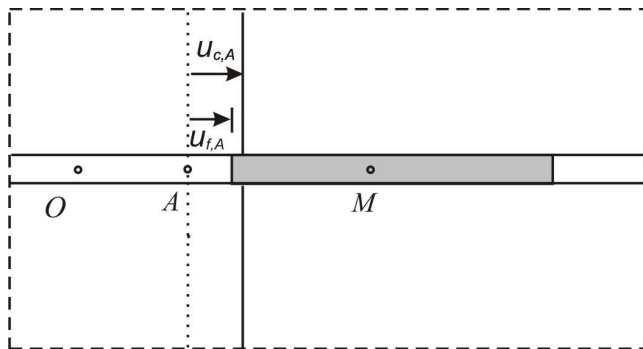
$$u_{f,A} = \varepsilon_{f0} l_u$$

Έτσι, η ολίσθηση  $s = u_{f,A} - u_{c,A}$  στη θέση A θα είναι ( Σχήμα 3.10)

$$s_A = \varepsilon_{f,A} l_u - \Delta l_u = \varepsilon_{f0} l_u - \Delta l_u,$$

όπου

$$s_A = u_{f,A} - u_{c,A}.$$



(α)

(β)

Σχήμα 3.5: (α) Οι μετατοπίσεις του σκυροδέματος και της ράβδου οπλισμού στην αριστερή παρειά του δεξιού τμήματος της δοκού-δοκίμιου, (β) το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του εμπηγμένου τμήματος της ράβδου  $\mathbf{A}$ .

Θέτοντας  $n\rho \approx 0$ , οι σχέσεις αυτές παρέχουν

$$\varepsilon_f \approx \frac{ds}{dx}, \quad \varepsilon_c \approx 0.$$

Έτσι, αν γνωρίζουμε την παραμόρφωση  $\varepsilon_f(x)$  κατά μήκος του εμπηγμένου τμήματος  $AM$  της ράβδου, τότε, από την σχέση (3.5) προκύπτει μετά από ολοκλήρωση

$$s_M - s_A = \int_A^M \varepsilon_f dx.$$

Το σημείο  $M$  θεωρείται ότι βρίσκεται αρκετά κοντά με το  $A$ , ας πούμε σε μια απόσταση  $l_b$ . Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα στα σημεία  $A$  και  $M$  έχουν καταγραφεί οι αναπτυσσόμενες αξονικές παραμορφώσεις της ράβδου συναρτήσει του εξωτερικού φορτίου  $P$  που επιβάλλει η μηχανή στην δοκό-δοκίμιο. Για μια τιμή του εξωτερικού φορτίου  $P$ , οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις  $\varepsilon_{f,A}$  και  $\varepsilon_{f,M}$  στις θέσεις  $A$  και  $M$

αντίστοιχα συναρτήσεις του φορτίου  $P$  δείχνονται στο Σχήμα 3.6. Η μεταβολή της παραμόρφωσης από την θέση  $A$  στην θέση  $M$  θα προσεγγισθεί γραμμικά, δηλαδή

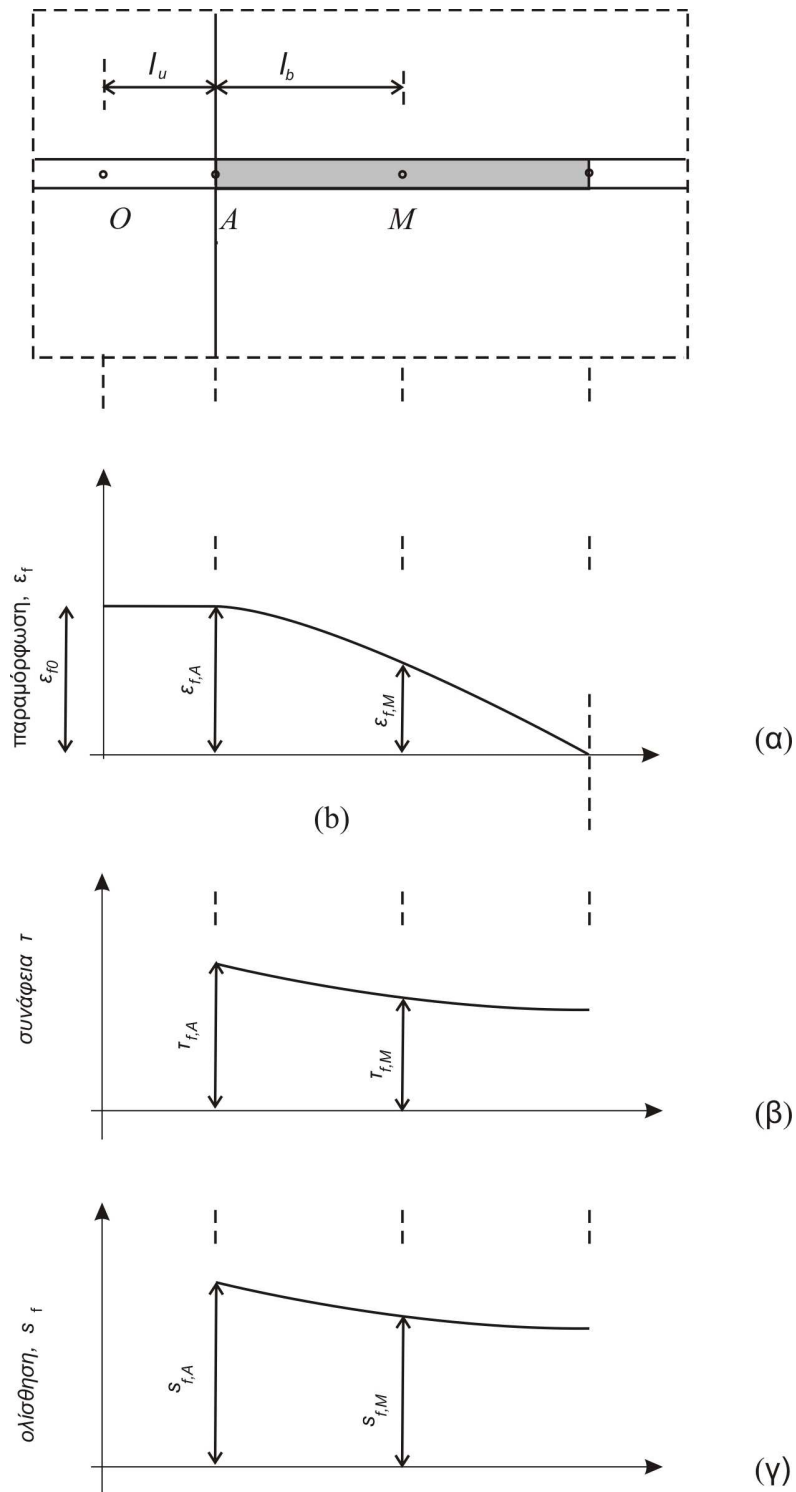
$$\varepsilon_f(x) = \frac{x}{l_b} \varepsilon_{f,M} + \left(1 - \frac{x}{l_b}\right) \varepsilon_{f,A}$$

Εισάγοντας την (3.8) στην (3.7) προκύπτει ότι

$$s_M = s_A + \frac{\varepsilon_{f,A} + \varepsilon_{f,M}}{2} l_b$$

Έτσι λοιπόν, για τις θέσεις  $A$  και  $M$  έχουν προσδιορισθεί οι αναπτυσσόμενες ολισθήσεις, που παρέχονται από τις σχέσεις (3.5) και (3.9). Η τοπική ολίσθηση σε μια θέση στην διεπιφάνεια θα θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύεται με την ολίσθηση του τμήματος  $AM$ . Η ολίσθηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως η μέση τιμή των ολισθήσεων των θέσεων  $A$  και  $M$ , δηλαδή

$$s_{ave} = \frac{s_A + s_M}{2} \tag{3.1}$$



Σχήμα 3.6: Η μεταβολή (α) της ορθής παραμόρφωσης της ράβδου, (β) της συνάφειας, και (γ) της ολίσθησης κατά μήκος του εμπηγμένου τμήματος της ράβδου στην δοκό-δοκίμιο.



η οποία, παίρνοντας υπόψιν τις (3.4) και (3.9) παρέχει

$$s_{ave} = \varepsilon_{f0} l_u - \Delta l_u + \frac{1}{4} (\varepsilon_{f0} + \varepsilon_{f,M}) l_b \quad (3.2)$$

Από την πειραματική δοκιμή έχουν προσδιορισθεί στα σημεία  $A$  και  $M$  οι καμπύλες  $\varepsilon_{f0} = \varepsilon_{f0}(P)$  και  $\varepsilon_{f,M} = \varepsilon_{f,M}(P)$ , όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.11. Έτσι, για μια τιμή του εξωτερικού φορτίου  $P$ , η μέση τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στο μήκος  $l_b$  προσδιορίζεται από τη σχέση (3.6).

### 3.3.2 Προσδιορισμός της τάσης συνάφειας

Στην συνέχεια, θα προσδιορισθεί η μέση διατμητική τάση  $\tau_{ave}$  που αντιστοιχεί στο εμπηγμένο τμήμα της δοκού-δοκιμίου (Σχήμα 3.7). Η τιμή αυτή θα αντιπροσωπεύει την τοπική συνάφεια που αντιστοιχεί στην ολίσθηση  $s_{ave}$  του τμήματος. Η κατανομή των τάσεων συνάφειας κατά μήκος της διεπιφάνειας των αγκυρωμένων τμημάτων της ράβδου FRP δείχνεται στο Σχήμα 3.5(α). Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του τμήματος AM της ράβδου δείχνεται στο Σχήμα 3.5(β). Από την συνθήκη ισορροπίας του τμήματος αυτού προκύπτει ότι

$$F_A = T + F_M, \quad (3.3)$$

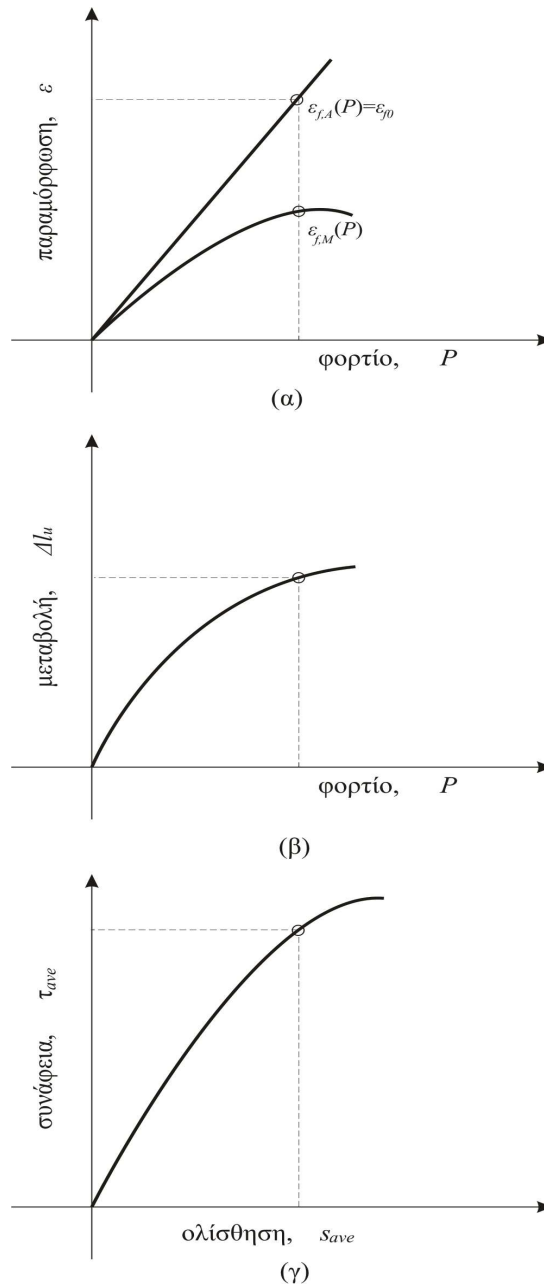
Όπου

$$T = \int_A^M \tau(x) \pi d_f dx, \quad (3.4)$$

δηλώνει την συνισταμένη δύναμη των τάσεων συνάφειας στην επιφάνεια του τμήματος AM της ράβδου. Οι δυνάμεις  $F_A$  και  $F_M$  υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$F_A = \frac{\pi d_f^2}{4} \sigma_{f,A} = \frac{\pi d_f^2}{4} E_f \cdot \varepsilon_{f,A} \quad (3.5)$$

και



Σχήμα 3.7: Οι πειραματικές καμπύλες (α) παραμόρφωσης ράβδου οπλισμού-φορτίου, (β) απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού δοκιμίου – φορτίου, που μετρώνται κατά τη δοκιμή, (γ) συνάφειας-ολίσθησης.

$$F_M = \frac{\pi d_f^2}{4} \sigma_{f,M} = \frac{\pi d_f^2}{4} E_f \cdot \varepsilon_{f,M} \quad (3.6)$$

όπου  $\sigma_{f,A}(\equiv E_f \varepsilon_{f,A})$  και  $\sigma_{f,A}(\equiv E_f \varepsilon_{f,A})$  είναι οι ορθές τάσεις της ράβδου στις θέσεις A και M, αντίστοιχα. Θα υποθέσουμε τώρα ότι η διατμητική τάση διανέμεται ομοιόμορφα στο τμήμα MA ( $=l_b$ ) και ισούται με  $\tau_{ave}$ . Μια τέτοια παραδοχή είναι κοντά στην πραγματικότητα, για πολύ μικρές τιμές του τμήματος  $l_b$ . Συνεπώς από την (3.13) για  $\tau = \tau_{ave}$  έχουμε

$$T = \pi d_f l_b \tau_{ave} \quad (3.7)$$

Από τις εξισώσεις (3.12) έως (3.15) προκύπτει ότι

$$\tau_{ave} = \frac{d_f E_f}{4l_b} (\varepsilon_{f,A} - \varepsilon_{f,M}) \quad (3.8)$$

Η σχέση παρέχει την μέση τάση συνάφειας  $\tau_{ave}$ . Έτσι, για μια τιμή της εξωτερικής φόρτισης P προσδιορίζεται μέσω των σχέσεων (3.11) και (3.17) το ζευγάρι των τιμών  $\tau_{ave}(P)$  και  $s_{ave}(P)$ . Προσδιορίζοντας τα ζευγάρια τιμών για όλες τις τιμές φορτίου P, προκύπτει η ζητούμενη πειραματική καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης για τον συγκεκριμένο τύπο ράβδων οπλισμού που εξετάζεται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, η δοκιμή δοκού που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόζεται για την απόκτηση των σχέσεων συνάφειας-ολίσθησης για συγκεκριμένους τύπους ράβδων FRP του εμπορίου. Διεξήχθησαν δύο πειραματικές δοκιμές δοκού, για ράβδους GFRP και CFRP διαμέτρου 12.7mm και 7.8mm αντίστοιχα. Αποκτήθηκαν οι σχέσεις συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση εκτελώντας δύο κύκλους φόρτισης, όπου η αποφόρτιση γινόταν πριν την μέγιστη τιμή της συνάφειας.

#### 4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

##### 4.2.1 Ο τύπος και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων FRP της δοκιμής

Οι ράβδοι οπλισμού FRP που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ράβδοι άνθρακα (CFRP) της εταιρίας Mac Beton Hellas SA και ράβδοι γυαλιού (GFRP) της Αμερικάνικης εταιρίας με την επωνυμία Concrete Protection Products Incorporation.

Οι ράβδοι αποτελούνται από συνεχείς διαμήκεις ίνες άνθρακα και γυαλιού αντίστοιχα, οι οποίες κατά την παραγωγή τους ενώθηκαν με ρητίνη (Σχήμα 4.1). Οι ράβδοι αυτές, όπως όλες οι ράβδοι FRP, παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι την θραύση τους. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι CFRP με ονομαστική διάμετρο 7.8mm και ράβδοι GFRP με ονομαστική διάμετρο 12.7mm, ενώ σύμφωνα με τα στοιχεία των δύο εταιριών η μέθοδος για την κατασκευή των ράβδων είναι η διαδικασία της ψυχρής



έλασης. Λόγω αυτής της διαδικασίας, οι ράβδοι παρουσιάζουν μία λεία επιφάνεια, επομένως για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αύξησης της συνάφειας, η επιφάνεια αυτή επικαλύπτεται με ένα επίστρωμα κόκκων άμμου συγκεκριμένου μεγέθους και δημιουργούνται αυλακώσεις στην εξωτερική επιφάνεια, πριν να στεγνώσει η ρητίνη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους.

(α)

(β)

Σχήμα 4.1 : (α) Η ράβδος CFRP, (β) Ράβδοι GFRP με τα τρία strain gages

Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων FRP που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και που παρέχονται από τις εταιρείες παραγωγής, έχουν προκύψει μετά από εκτεταμένες πειραματικές έρευνες. Η ονομαστική διάμετρος των ράβδων είναι 7.8 mm για τις ράβδους CFRP και 12.7 mm για τις ράβδους GFRP, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, το εμβαδόν διατομής είναι 47.8 mm<sup>2</sup> και 126.7 mm<sup>2</sup>, το ειδικό βάρος των δύο κατηγοριών είναι 75 g/m και 271,4 g/m, αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή των ράβδων CFRP είναι 2300 MPa, το μέτρο ελαστικότητας είναι 130 GPa, και η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.8 %. Αντίστοιχα για τις ράβδους GFRP η εφελκυστική αντοχή είναι 788 MPa, το μέτρο ελαστικότητας είναι 43.9 GPa και η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.79%, ενώ η αντίστοιχη παραμόρφωση ράβδου χάλυβα κατά τη διαρροή είναι 2%. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ράβδων αυτών συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.1.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ GFRP		ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP	
Ονομαστική Εφελκυστική αντοχή, MPa	788	Ονομαστική Εφελκυστική αντοχή, MPa	2300
Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	43.9	Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	130
Ονομαστική Διατμητική αντοχή, MPa	220	Ονομαστική Διατμητική αντοχή, MPa	150
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	5.5 · 10 <sup>-6</sup>	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	0.7 · 10 <sup>-6</sup>
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Εγκάρσια Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	36 · 10 <sup>-6</sup>	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Εγκάρσια Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	30 · 10 <sup>-6</sup>
Μέγιστη Εφελκυστική παραμόρφωση, %	1.79	Μέγιστη Εφελκυστική παραμόρφωση, %	1.8
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ GFRP		ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP	
Ονομαστική διάμετρος, mm	12.7	Ονομαστική διάμετρος, mm	7.8
Εμβαδόν διατομής, mm <sup>2</sup>	126.7	Εμβαδόν διατομής, mm <sup>2</sup>	47.8
Ειδικό βάρος, g/m	271.4	Ειδικό βάρος, g/m	75

#### 4.2.2 Η σύνθεση του σκυροδέματος της πειραματικής δοκιμής

Για την σκυροδέτηση των δοκών του πειράματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland με μέγιστη διάμετρο αδρανών 12 mm, και λόγος νερού προς τσιμέντο 0.5. Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμών έγινε με την αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος που δίνεται στον πίνακα 4.2. Οι δοκοί, μετά την σκυροδέτησή τους, καταβρέχονταν με νερό για τριάντα μέρες, και διατηρήθηκαν σε μια θερμοκρασία 20 °C και σε μια σχετική υγρασία που δεν ξεπερνούσε το 90 %.

ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ / m <sup>3</sup>	
ΝΕΡΟ (N)	118 kg
ΤΣΙΜΕΝΤΟ (T)	236 kg
ΑΜΜΟΣ	919 kg
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	1249 kg
ΑΕΡΑΣ	2%

Πίνακας 4.2 : Αναλογία υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος ανά m<sup>3</sup>.

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, πάρθηκαν τέσσερα κυβικά δοκίμια 150x150x150 mm και υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 : Η δοκιμή θλίψης των κυβικών δοκιμών.

Η μέση θλιπτική αντοχή των 28 ημερών του σκυροδέματος προσδιορίστηκε στην τιμή των 30 MPa.

### 4.2.3 Κατασκευή δοκιμίων και εκτέλεση πειραματικών δοκιμών

Η σκυροδέτηση των δοκιμίων δοκού πραγματοποιήθηκε μέσα σε ξύλινα καλούπια από 'μπετοφόρμ' που κατασκευάστηκαν για τον σκοπό αυτόν (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 : Οι πειραματικές δοκοί σε ξύλινα καλούπια



Σχήμα 4.4 : Πειραματική δοκός στην μηχανή κάμψης.

Τα δύο τμήματα των δοκών δημιουργήθηκαν με την τοποθέτηση κομματιών συμπιεσμένου χαρτιού στο κέντρο του καλούπιού, ώστε να δημιουργηθεί κενό 6 cm. Μετά από 30 ημέρες, οι δοκοί μεταφέρθηκαν και τοποθετήθηκαν στην μηχανή κάμψης του εργαστηρίου, και αφού ξεκαλουπώθηκαν, υποβλήθηκαν σε μονότονη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 4.4 δείχνεται μία πειραματική δοκός, κατά την δοκιμή. Από την καταγραφή των παραμορφώσεων στο σημείο M και υπολογίζοντας την δύναμη  $Q$  της ράβδου που τις προκαλεί μπορούμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε ράβδο FRP, και στην συνέχεια, μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας  $E$  της κάθε ράβδου. Οι πειραματικές μετρήσεις αυτής της διαδικασίας επιβεβαίωσαν τη γραμμική συμπεριφορά του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων της ράβδου FRP. Το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων υπολογίστηκε ίσο με  $E = 118 \text{ GPa}$  για την ράβδο CFRP και  $E = 45 \text{ GPa}$  για την ράβδο GFRP, που είναι κοντά στην ονομαστική τιμή που παρέχει η κάθε εταιρία.



Σχήμα 4.5 : Αστοχία δοκών μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων: (α) με την ράβδο GFRP, (β) με την ράβδο CFRP.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η αστοχία των πειραματικών δοκών μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Όπως παρατηρούμε η αστοχία της συνάφειας ράβδου-σκυροδέματος προήλθε από αστοχία απόσχισης για την δοκό με την ράβδο GFRP και από αστοχία εξόλκευσης για την δοκό με την ράβδο CFRP.

## 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.3.1 Πειραματική μεθοδολογία

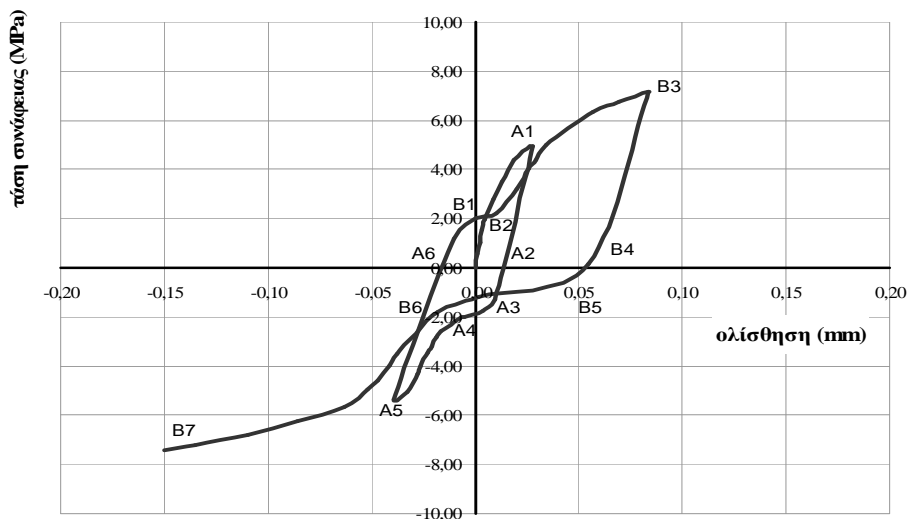
Για τον προσδιορισμό των τοπικών σχέσεων συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας ράβδων FRP-σκυροδέματος, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που περιγράφεται στην ενότητα 3.2.1. Σύμφωνα με την διαδικασία αυτή, από κάθε δοκό-δοκίμιο αποκτώνται ταυτόχρονα δύο καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης, που περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά της ίδιας της διεπιφάνειας σκυροδέματος-ράβδων FRP. Η σύγκριση των δύο αποκτώμενων σχέσεων συνάφειας-ολίσθησης παρέχει μια πρώτη ένδειξη της αξιοπιστίας της εκτελούμενης δοκιμής, καθώς επίσης, και μια ένδειξη επαναληψιμότητας της νέας δοκιμής. Η τοπική σχέση συνάφειας-ολίσθησης που θα περιγράψει τελικά την μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας της δοκού δοκιμίου θα



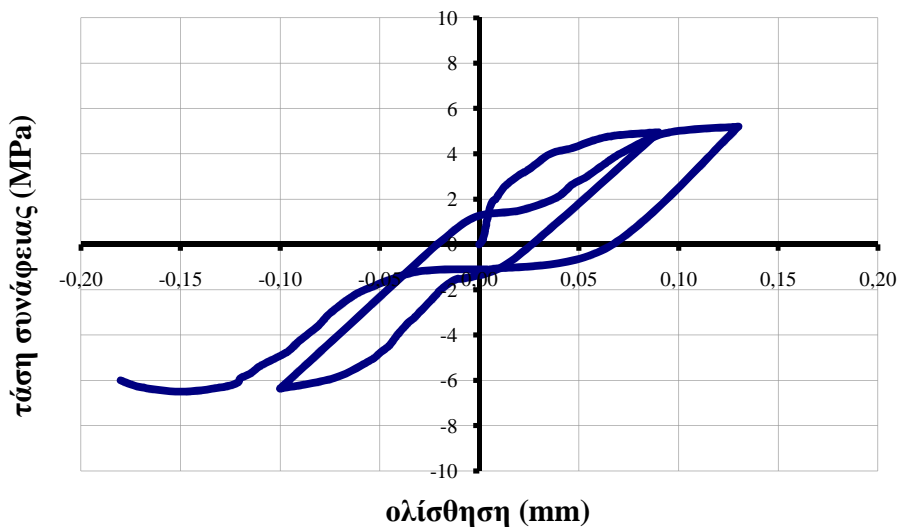
αποκτιέται από την μέση τιμή των δύο ξεχωριστών καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης που αποκτιούνται. Με βάση την παραπάνω διαδικασία αποκτήθηκαν οι σχέσεις συνάφειας ολίσθησης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση δύο κύκλων φόρτισης για τις ράβδους FRP του πειράματος.

#### 4.3.2 Οι πειραματικές καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση (καταγραφή διαγραμμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις)

Από την δεύτερη σειρά δοκών-δοκιμίων, από την πειραματική διαδικασία προσδιορίστηκαν οι πειραματικές καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων FRP-σκυροδέματος για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για τον προσδιορισμό των καμπυλών αυτών, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης της κάθε δοκού-δοκιμίου προσδιορίστηκε ως η 'μέση τιμή' των πειραματικών καμπυλών, που αποκτήθηκαν για τα δύο τμήματά της. Η πειραματική καμπύλη που αποκτήθηκε για την δοκού-δοκίμιο με οπλισμό CFRP 7.8 mm δείχνεται στο Σχήμα 4.6 ενώ η πειραματική καμπύλη της δοκού-δοκιμίου με οπλισμό GFRP 12.7 mm φαίνονται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.6 : Η σχέση συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση δύο κύκλων φόρτισης για ράβδο CFRP 7.8 mm



Σχήμα 4.7 : Η σχέση συνάφειας-ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση δύο κύκλων φόρτισης για ράβδο GFRP. 12.7 mm

Στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης απαρτίζονται από διαδοχικούς κλάδους, που εμφανίζονται σε συγκεκριμένη φορά της επιβαλλόμενης φόρτισης και περιγράφουν τον βαθμό της διεπιφανειακής βλάβης που έχει τοπικά προξενηθεί. Οι κλάδοι των καμπυλών αυτών είναι κλάδοι φόρτισης, αποφόρτισης και τριβής. Αμέσως παρακάτω, οι κλάδοι αυτοί περιγράφονται με βάση την καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης της δοκού δοκιμίου CFRP, που δείχνεται στο Σχήμα 4.6.

Με την έναρξη της φόρτισης, η καμπύλη ακολουθεί τον ανιόντα κλάδο  $OA_1$  που θα ακολουθούσε στη μονότονη φόρτιση. Στο σημείο  $A_1$ , που αντιστοιχεί σε μια τάση συνάφειας, που είναι μικρότερη από την μέγιστη τιμή συνάφειας της μονότονης φόρτισης, γίνεται αποφόρτιση της δοκού-δοκιμίου. Η αποφόρτιση της δοκού-δοκιμίου αντιστοιχεί στον σχεδόν ευθύγραμμο κλάδο  $A_1A_2$ , με το τμήμα  $OA_2$  να περιγράφει μια παραμένουσα ολίσθηση στην διεπιφάνεια των δύο υλικών. Στο σημείο  $A_2$  γίνεται η αντιστροφή της φόρτισης. Με την αύξηση της φόρτισης, η καμπύλη ακολουθεί τον ευθύγραμμο κλάδο  $A_2A_3$ , που αποτελεί προέκταση του κλάδου αποφόρτισης  $A_1A_2$ , και στην συνέχεια, εισέρχεται στον κλάδο τριβής  $A_3A_4$ . Μετά το σημείο  $A_4$ , ακολουθεί ο κλάδος  $A_4A_5$ , που περιγράφει μια μονότονη αύξηση (κατ' απόλυτη τιμή) της τάσης συνάφειας, καθώς αυξάνει (κατ' απόλυτη τιμή) η ολίσθηση. Στο σημείο  $A_5$  γίνεται αποφόρτιση της δοκού-δοκιμίου. Ο κλάδος αποφόρτισης  $A_5A_6$  είναι σχεδόν ευθύγραμμος και παράλληλος με τον κλάδο αποφόρτισης  $A_1A_2$ . Στο σημείο  $A_6$  ολοκληρώνεται ο πρώτος κύκλος φόρτισης, με το τμήμα  $OA_6$  να αντιπροσωπεύει την παραμένουσα ολίσθηση του πρώτου κύκλου φόρτισης.

Ξεκινώντας τον δεύτερο κύκλο με την αντιστροφή της φόρτισης, η καμπύλη ακολουθεί τον ευθύγραμμο κλάδο  $A_6B_1$ , που αποτελεί προέκταση του κλάδου  $A_5A_6$ . Στην

συνέχεια, η καμπύλη εισέρχεται στον κλάδο  $B_1B_2$ , που είναι ένας σχεδόν οριζόντιος κλάδος τριβής. Με την αύξηση του φορτίου, εμφανίζεται ο ανερχόμενος κλάδος  $B_2B_3$  της καμπύλης, που διέρχεται από το σημείο  $A_1$  της πρώτης αποφόρτισης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η συμπεριφορά του οπλισμού FRP σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση δεν διαφέρει ποιοτικά από αυτήν των ράβδων χάλυβα. Στο διάγραμμα διακρίνονται όλοι οι κλάδοι που εμφανίζονται στο αντίστοιχο διάγραμμα συνάφειας-ολίσθησης του οπλισμού από χάλυβα, καθώς επίσης και η υστερητική συμπεριφορά στον δεύτερο κύκλο φόρτισης.

#### 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας:

- Έγινε μια συστηματική παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνητικών πειραματικών αποτελεσμάτων, που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια πάνω στην μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της σύνδεσης του οπλισμού FRP με σκυρόδεμα, σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος με οπλισμό FRP.
- Εκπονήθηκε ένα πειραματικό πρόγραμμα για τον προσδιορισμό της πειραματικής καμπύλης τάσεων συνάφειας-ολίσθησης, για δύο συγκεκριμένους τύπους ράβδων FRP του εμπορίου εφαρμόζοντας την δοκιμή της δοκού, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η πειραματική ανάπτυξη της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης βασίζεται στις μετρήσεις παραμορφώσεων που γίνονται κατά μήκος των εμπηγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου και στη μεταβολή της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού με το φορτίο δοκιμής.
- Οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, που αποκτήθηκαν και για τους δύο τύπους ράβδων FRP για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με αυτήν του χάλυβα. Δηλαδή, σε έναν κύκλο παρουσιάζεται ένας κατερχόμενος ευθύγραμμος κλάδος, σχεδόν κάθετος στον άξονα ολίσθησης, ένας σχεδόν ευθύγραμμος κλάδος, παράλληλος στον άξονα ολίσθησης, που είναι ο κλάδος τριβής. Επίσης, παρουσιάζεται ένας καμπυλόγραμμος κλάδος, που αντιστοιχεί στην παρθενική συμπεριφορά της ράβδου σε μονότονη φόρτιση και ακολουθεί ένας ευθύγραμμος κλάδος.

- Η συμπεριφορά αυτή, που περιγράφεται με την καμπύλη, μπορεί όπως και στην περίπτωση του χάλυβα να προσομοιωθεί με τις κατάλληλες μαθηματικές εκφράσεις.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Achillides Z. (1998), "Bond behaviour of FRP bars in concrete (PhD Thesis), Centre for Cement and Concrete," Dept. of Civil and Structural Eng., The University of Sheffield, July 1998.

Achillides Z., Pilakoutas K., Waldron P. (1997), "Bond Behaviour of FRP Bars to Concrete. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct .1997, pp. 341-348.

Al-Dulaijan S. U., Nanni A., Al-Zahrani M. M., Bakis C. E. and Boothby T. E. (1996), "Bond evaluation of environmentally conditioned. GFRP/concrete systems," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. EI-Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp. 845-891.

Al-Zaharani M. M. (1994), "Bond Behaviour of Fibre Reinforced Plastic (FRP) Reinforcements with Concrete," Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy, The Pennsylvania State University, USA.

Al-Zahrani M. M., Nanni A., Al-Dulaijan S. U., Bakis C. E. (1996), "Bond of FRP to concrete in reinforcement rods with axisymmetric deformations," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. EI-Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp.853-859.

Apinis R., Dejke Y., Modniks J., Tamuzs V., Tepfers R. (1999), "Rotation capacity of Concrete Beams with Ductile Hybrid CFRP+GFRP and Elastic CFRP Tensile Reinforcement," Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No. 29, Publication 99.1, Göteborg, 1999, p. 10.

Apinis R., Modniks J., Tamuzs V., Tefers K. (1998), "Ductility of Hybrid Fibre Composite Reinforcement FRP for Concrete," Institute of Polymer Mechanics, Riga, Latvia. Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No, 23. Riga, 1998, p. 16.

Bank L.C., Puterman M., Katz A. (1996), "The effect of material degradation on bond properties of FRP reinforcing bars in concrete," ACI Material Journal, 1996.

Benmokrane B., Masmoudi R. (1996), "FRP C-bar reinforcing rod for concrete structures," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp. 181-187.

Benmokrane B., Tighiouart B., Chaallal O. (1996), "Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete," ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3, May-June 1996, pp. 246-253.

Chaallal O., Benmokrane B. (1993), "Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout," Materials and Structures, Vol. 26, pp. 167-175.

Cosenza E., Manfredi G., Realfollzo R. (1995), "Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August (1995), edited by L. Taerwe, E & FN Spoon, London 1995, pp. 164-171.

Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. (1996), "Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp. 181-187.

Daniali S. (1992), "Development Length for Fibre-Reinforced Plastic Bars. Proceedings of the 1st International Conference of Advanced Composite Materials in Bridge & Structures," Sherbrooke, Quebec, Canada.

Den Uijil J. A. (1995), "Bond and fatigue properties of arapree," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August (1995), edited by L. Taerwe, E & FN Spon, London 1995, pp. 146-153.

Faoro M. (1996), "The Influence of Stiffness and bond of FRP Bars and Tendons on the Structural Behaviour of Reinforced Concrete members," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2nd International Conference, Montreal, Quebec, Canada, August 11-14, 1996, pp. 885-892.

Faza S. S., GangaRao H. V. S (1991), "Bending Response, of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rebars for varying Concrete Strengths," Advanced Composite Materials, ASCE.

Freimanis A. J., Bakis C. E., Nanni A., Gremel D. (1998), "A Comparison of Pullout and Tensile Behaviours of FRP Reinforcement for Concrete," Proceedings of the ICCI '98, Second International Conference on Composites in Infrastructure, January 3-4-1998, Tucson, Arizona, Vol. II, pp.52-65 .

Gentry T. R., Hudak C. E. (1996), "Thermal compatibility of plastic composite reinforcement and concrete," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M El Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp. 149-156.

Gowripalan N., Chiang Y.K. (1996), "The Influence of Surface Characteristics of FRP and Hydration Products on the Bond of Tendons in Pretensioned Beams," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2nd International Conference, Montreal, Quebec, Canada, August 11-14, 1996, pp. 869- 876.

Greco C., Manfredi G., Pecce M., Realfonzo R. (1998), "Experimental analysis of bond between GFRP deformed rebars and concrete," 8th European Conference of Composite Materials, June 1998, Naples, Italy.

Honma M., Maruyama T. (1989), "Bond Properties of Carbon Fibre Reinforced Plastic rods at Elevated Temperatures," Architectural Institute of Japan Convention, Vol. C.

Itoh S., Maruyama T., Nishiyama H. (1989), "Study of Bond Characteristics of Deformed Fibre Reinforced. Plastic Rods," Proceedings of the Japan, Concrete Institute, Vol.II, No.1.

Jerrett C.V., Ahmad S.H. (1995), "Bond tests of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) rods," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August (1995), edited by L. Taerwe, E & FN Spon, London 1995, pp. 180-191.

Kachlakev D.I., Lundy J.R. (1998), "Bond strength Study of hollow Composite Rebars with Different Micro Structure," Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI '98, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona. Tucson 1998, Vol. II, pp. 1-14.

Kanakubo T., Yonemaru K., Fukuyama H., Fujisawa M., Sonobe Y. (1993), "Bond Performance of Concrete Members Reinforced with FRP Bars," Proceedings of the International Symposium of Fibre Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP-138.

Kanakubo T., Yonemaru K., Fukuyama H., Yasuhisa S. (1993), "Bond splitting strength of concrete members reinforced with FRP bars," Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.15, pp. 305-318.



Kettil P. (1995), "Composite beams of fibre reinforced plastic profile and concrete," Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No. 8. Graduation thesis, E-95.1, Göteborg, September 1995, p. 80.

Kobayashi K, Rahman H., Fujisaki T. (1997), "Crack Width Prediction for NEFMAC Reinforced Flexural Members. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 447-454.

Larralde J., Mueller- Rochholz J., Schneider T., Willmann J. (1998), "Bond Strength of Steel, AFRP and GFRP Bars in Concrete," Proceedings of the ICCI '98, Second International Conference on Composites in Infrastructure, January 3-4 1998, Tucson, Arizona, Vol. II, pp. 92-101.

Larralde J., Silva Rodriguez R. (1993), "Bond and Slip of FRP Rebars in Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.5, No. 1.

Lees J.M., Burgoyne C.J. (1996), "Influence of bond on Rotation Capacity of Concrete Pre-Tensioned with AFRP," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2nd International Conference, Montreal, Quebec, Canada, August 11-14, 1996, pp. 901-908.

Malvar L. J. (1995), "Tensile and bond properties of GFRP rebars," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 3, May-June 1995, pp. 276-285.

Machida A. (1993), "Second Research Committee on CFRM," Japan Society of Civil Engineers, State-of the Art Report on Continuous Fibre Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series 3, Tokyo, October 1993, pp. 15-26.

Makitani E., Irisawa I., Nishiura N. (1993), "Investigation of Bond in Concrete Member with Fibre Reinforced Plastic Bars," Proceedings of the International Symposium on Fibre Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP-138, Vancouver, Canada.

Malvar L.J (1992), "Bond of reinforcement under controlled confinement," ACI Materials Journal 89(6), pp. 593-601.

Malvar L.J. (1994), "Bond stress-slip characteristics of FRP rebars," Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA 93043-4328, Technical Report TR-2013-SHR, February 1994, pp. 45.

Mashima M., Iwamoto K. (1993), "Bond Characteristics of FRP Rod and Concrete after Freezing and Thawing Deterioration," International Symposium of Fibre-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP-138, Vancouver , Canada.

Mochizuki S., Udagawa T. (1995), "On bond and anchorage of two dimensional grid type FRP," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August 1995, edited by L. Taerwe, E & FN Spon, London 1995, pp. 192-199.

Nanni A., Al-Zaharani M. M., Al-Dulaijan S. U., Bakia C. E., Boothby T. E. (1995), "Bond of FRP reinforcement to concrete - experimental results," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August (1995), edited by L. Taerwe, E & FN Spon, London 1995, pp. 135-145.

Peled A., Yankelevsky D., Bentur A. (1995), "Influences of yarns shape in woven fabric on bonding performance of cementitious composites," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-S), Ghent 23-25 August 1995, edited by L. Taerwe, E & PN Spon, London 1995, pp. 192-199

Reinhardt W., Gollas L., Weiler B., Grosse Ch., Eberle K. (1997), "Non-Destructive Assessment of Bond Deterioration of Aramid in Reinforced and Prestressed Concrete," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 397-404.

Rosetti A. V., Galeota D., Giammatteo M. M. (1995), "Local bond stress-slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete," Materials and Structures, 1995, pp. 340-344.

Sen R., Shahawy M., Sukumar S., Rosas J. (1998), "Effect of tidal Exposure on Bond of CFRP Rods," Proceedings of the ICCI '98, Second International Conference on Composites in Infrastructure, January 3-4, 1998, Tucson, Arizona, Vol. II, pp. 512-523.

Sheard P. A. (1997), "The development of non-ferrous reinforcement for concrete structures," Eurocrete Report to its sponsors.

Shield C., French C., Retika A. (1997), "Thermal and Mechanical Fatigue Effects on GFRP Rebar-Concrete Bond. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 381-388.

SINTEF-EUROCRETE (1996), "Non-ferrous reinforcement for concrete structures, Small beam test-Bond splice length," Restricted report STF22 F96828, Aug. 1996.

Sippel T.M., Mayer U. (1996), "Bond behaviour of FRP-strands under short-term, reversed and cyclic loading," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, Editor Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp.. 837-844.

Takagi N., Kojima T., Iwamoto K., Inoue S. (1997), "A Study of continuous Fibre rods Embedded in Beam Specimen. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete

Structures,” Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 365-372.

Tamuzs V., Apinis R., Vilks U., Modniks J., Tepfers R. (1995), “Ductility of nonmetallic hybrid fibre composite reinforcement for concrete,” Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Publication No. 95.4, Work No. 6, Göteborg, 1995-09-01, p. 9.

Tamuzs V., Tepfers R., Olsson M., Svensson D. (1994), “Hybrid fibre composites as non-metallic reinforcement in concrete,” Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Publication 94.3, Work No. 560, Göteborg, April 1994, p.10.

Tamuzs V., Apinis R., Vilks U., Tepfers. R. (1995), “Bond between glass fibre composite reinforcement and concrete in pullout tests,” Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work. No. 7, Göteborg, 1995-10-25, p.12.

Tepfers R., Hedlund G., Rosinski B. (1998), “Pull-out and tensile reinforcement. Splice tests with GFRP bars,” Proceedings of the ICCI '98, Second International Conference on Composites in Infrastructure, January 3-4 1998, Tucson, Arizona, Vol. II, pp. 37-51.

Tepfers R., Karlsson M. (1997), “Pull-out and tensile reinforcement splice tests using FRP C-BARs,” FRPRCS-3 Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures in Sapporo, 14-16 October 1997, pp. 357-364.

Tepfers R., Molander I., Thalenius K. (1992), “Experience from testing of concrete reinforced with carbon and aramid fibre strands,” XIV, Nordic Concrete Congress & Nordic Concrete Industry Meeting, 6-8 August 1992, Icelandic Concrete Association, Reykjavik. pp. 337-347.

Tighiouart B., Benmokrane B., Gao D. (1998), "Investigation on the Bond of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete," Proceedings of the ICCI '98, Second International Conference on Composites in Infrastructure, January 3-4 1998, Tucson, Arizona, Vol. II, pp. 102-112.

Uppuluri V. S., Bakis C. E., Al-Dulaijan S. U., Nanni A., Boothby T. E. (1996), "Analysis of the bond mechanism in FRP reinforcement rods. The effect of rod design and properties," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec (1996), pp. 893-900.

Wang Z., Goto Y., Yoh O. (1997), "Bond Characteristic of FRP Rods and Effect of Long Term Deflection of Concrete Beams. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 389-396.

Zhao W., Pilakoutas K., Waldron P. (1997), "FRP Reinforced Concrete. Cracking Behaviour and Determination. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 439-446.

Hattori A., Kawasaki K., Miyagava T., Fujii M. (1997), "Bond Behaviours of Carbon Fibre Strand and Fibre Deformed Bar. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct 1999, pp. 349-356.

Kono S., Inazumi M., Kaku T. (1997), "Bond Splitting Behaviour of Reinforced Concrete Members Confined with CFRP Sheets. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Proceedings of the International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 373-380.











