

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ NSM FRP ΡΑΒΔΟΥΣ**ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ****ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Μία από τις πλέον καινούργιες μεθόδους ενίσχυσης στοιχείων σκυροδέματος, τοιχοποιίας και ξύλινων μελών με FRP υλικά, είναι η ενίσχυση με nsm frp ράβδους. Πλεονεκτώντας σε πολλά σημεία έναντι των παραδοσιακών τεχνικών, εφαρμόζεται κυρίως σε δοκούς για ενίσχυση έναντι κάμψης και διάτμησης. Κύριος είναι ο ρόλος της συνάφειας, η οποία εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, και του μήκους αγκύρωσης. Η συμβολή των nsm frp ράβδων στην διατμητική αντοχή είναι σημαντική και υπολογίζεται από κατάλληλους τύπους. Εξαιτίας του ότι η μέθοδος είναι πολύ πρόσφατη, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη αποσαφήνιση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερικών υλικών (Fiber Reinforced Polymers) σε κατασκευαστικές επισκευές και ενισχύσεις διευρύνεται συνεχώς τα τελευταία έτη, εξαιτίας των πολλαπλών πλεονεκτημάτων τους έναντι των παραδοσιακών κατασκευαστικών υλικών όπως ο χάλυβας.

Τα πλεονεκτήματα αποτελούν το χαμηλό ίδιο βάρος, η εύκολη εφαρμογή, η υψηλή ανθεκτικότητα και εφελκυστική αντοχή, η ηλεκτρομαγνητική ουδετερότητα και η πρακτικά απεριόριστη διαθεσιμότητα ως προς το μέγεθος τη γεωμετρία και τις διαστάσεις των υλικών αυτών.[1]

Επιπλέον, η όλο και μεγαλύτερη παραγωγή τους από τη βιομηχανία με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους τους, η λιγότερο απαιτούμενη εργασία κατά την εφαρμογή και η μη απαίτηση βαρέως μηχανικού εξοπλισμού τα καθιστά ανταγωνιστικά.[2]

1.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ NEAR SURFACE MOUNTED (NSM) FRP ΡΑΒΔΟΥΣ.

Μία από τις πλέον πρόσφατες μεθόδους εφαρμογής των frps στις κατασκευές είναι η ενίσχυση κυρίως δοκών αλλά και κατακόρυφων στοιχείων –τοιχωμάτων- με εισαγωγή καρβονικών ή υαλοίνοπλισμένων πολυμερικών ράβδων (carbon or glass frp rods) στην κάτω επιφάνεια της δοκού ή πλευρικά, εν είδη εφελκυσμένου οπλισμού ή οπλισμού διάτμησης, η καλούμενη Near Surface Mounted (NSM) FRP Rod Strengthening Technique.

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή των πολυμερικών ράβδων είναι πολύ πρόσφατη, η συγκεκριμένη τεχνική ενίσχυσης έχει εφαρμοσθεί στην Ευρώπη από τις αρχές της δεκαετίας του '50 χρησιμοποιώντας ως οπλισμό ράβδους χάλυβα, ενώ η πρώτη αναφορά στη βιβλιογραφία απαντάται το 1949,(Asplund, 1949).

Οι χάλυβδινοι ράβδοι οπλισμού σήμερα έχουν αντικατασταθεί από τις ινοπλισμένες ράβδους και η επικάλυψη του σκυροδέματος από τις εποξειδικές κόλλες.[3]

Γενικά, υπάρχει μικρή εμπειρία εφαρμογής του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης σε έργα πραγματικής κλίμακας που επιπλέον να έχουν δοθεί σε δημόσια χρήση, ενώ οι περισσότερες εφαρμογές σε πραγματική κλίμακα σε υπάρχουσες κατασκευές έχουν πραγματοποιηθεί για πειραματικούς σκοπούς, καθώς είναι πολλές οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ενισχυμένων στοιχείων οι οποίες δεν έχουν εξολοκλήρου διερευνηθεί.

1.3 ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ NSM FRP ΡΑΒΔΩΝ

Οι ΙΟΠ ράβδοι διατίθενται στο εμπόριο σε ποικίλες μορφές ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του μηχανικού ως προς το σχήμα, το μήκος και τις διαστάσεις των διαμέτρων τους.

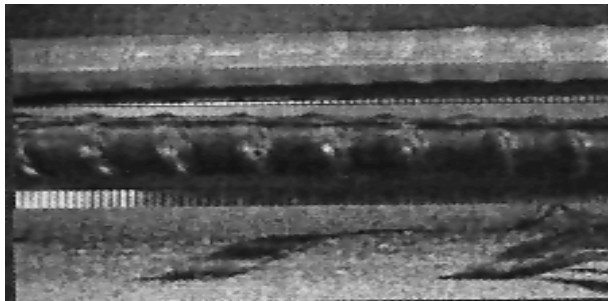
Παράγονται με διαδικασία υβριδικής εξόλκευσης.

Διακρίνονται σε σπλισμένες με:

- καρβονικές ίνες
- ίνες ύαλου

Ως προς τη μορφή της επιφάνειάς τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- τις ραβδωτές όπως ακριβώς και ο χάλυβας σπλισμού



NSM FRP ράβδοι με ραβδώσεις.

- τις λείες
- τις αμμοβολημένες

Η διατομή τους ενδέχεται να είναι κυκλική ή ορθογωνική.

Είναι ημιαγωγικές στη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και στα ραδιοκύματα.[4]

Παρακάτω παρατίθενται τα φυσικά τους χαρακτηριστικά:

Διάμετρος Ράβδου		Επιφάνεια Διατομής	Ονομαστική Διάμετρος		Εφελκυστική Δύναμη		Μέτρο Ελαστικότητας		Μέγιστη Πίεση
(mm)	(in)	(mm ²) (in ²)	(mm)	(in)	(MPa)	(ksi)	(GPa)	(psi 106)	(%)
6	#2	29.9 0.0464	6	0.254	2068	300	124	18	0.017
9	#3	65.2 0.1010	9.5	3/8	2068	300	124	18	0.017
12	#4	108.3 0.1679	13	0.5	2068	300	124	18	0.017

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ NSM FRP ΡΑΒΔΟΥΣ

Παρατηρήσεις :

1. Η ονομαστική διάμετρος είναι ο μέσος όρος των διαμέτρων υποθέτοντας κυκλική διατομή ράβδου.
2. Η εφελκυστική τάση ονομάζεται “Εγγυημένη εφελκυστική δύναμη, f_{fu} ” κατά τη διευκρίνιση του ACI440.[3]

1.4 ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η τεχνική αποσκοπεί στην ενίσχυση στοιχείου έναντι διατμητικής και καμπτικής καταπόνησης.

Εφαρμόζεται για ενίσχυση δοκών που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με παλιότερους κανονισμούς που προέβλεπαν μικρότερα φορτία σχεδιασμού, καθώς και για στοιχεία τα οποία έχουν χάσει την αντοχή τους.

Επίσης, για ενίσχυση προκατασκευασμένων στοιχείων, ιδίως σε καταστρώματα γεφυρών, όπως και για προεντεταμένα στοιχεία.[4]



Εφαρμογή σε κατάστρωμα γέφυρας.[2]

Είναι κατάλληλη για ενίσχυση τοιχοποιίας και ξύλινων κατασκευαστικών μελών.

Ιδιαίτερα ελκυστική είναι η χρήση της σε περιοχές όπου εμφανίζονται αρνητικές ροπές σε πλάκες, καταστρώματα γεφυρών και δοκούς, όπου η τοποθέτηση οποιασδήποτε άλλης εξωτερικής ενίσχυσης αποδεικνύεται μειονεκτική, εφόσον υπόκειται σε σημαντική φθορά εξαιτίας μηχανικών και περιβαλλοντικών συνθηκών. [6]

Η πρόσφατη έκδοση **ACI440.1R-01 “Οδηγός για το σχεδιασμό και κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος με frp ράβδους”** εφοδιάζει το μελετητή μηχανικό με τις τελευταίες πληροφορίες για μία ασφαλή και συντηρητική εφαρμογή της μεθόδου.

Το **ACI440.1R-01** περιέχει εφαρμογές για:

- Εφελκυσμό
- Διάτμηση
- Μήκη συναρμογών.

Απαγορεύεται σύμφωνα με τον 440 σχεδιαστικό οδηγό, η χρήση των NSM FRP ράβδων στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Ως θλιβόμενος οπλισμός
- Σε σεισμικές ζώνες
- Σε ζώνες όπου είναι απαραίτητη η δυνατότητα ανακατανομής ροπών
- Σε πλαίσια
- Σε κατασκευές που υπόκεινται σε υψηλές θερμοκρασίες. [4]

1.5 ΤΡΟΠΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ο τρόπος εφαρμογής των ΙΟΠ ράβδων είναι ο ακόλουθος:

1. Δημιουργείται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, του προς ενίσχυση στοιχείου, εγκοπή κατά την επιθυμητή διεύθυνση. Το μέγεθος της εγκοπής επιλέγεται τέτοιο, ώστε να είναι δυνατός ο καθαρισμός της καθώς και η ανάπτυξη της απαιτούμενης τάσης συνάφειας, εφόσον τοποθετηθεί η εποξειδική κόλλα (ρητίνη).
2. Με νερό ή αέρα υπό πίεση απομακρύνονται τυχόν εναπομείναντα θραύσματα από την εγκοπή.
3. Η εγκοπή γεμίζεται μέχρι το μέσο της με ρητίνη.
4. Η ΙΟΠ ράβδος πιέζεται ελαφρά μέσα στην εγκοπή γεγονός που αναγκάζει τη ρητίνη να περιβάλλει τη ράβδο και καλύψει τα κενά μεταξύ αυτής και της εγκοπής.
5. Τέλος, η εγκοπή γεμίζεται με επιπλέον ρητίνη ώστε να καλυφθεί κάθε κενό χωρίς να εγκλωβιστεί αέρας και λειαίνεται η επιφάνειά της. [3]



Η ρητίνη πρέπει να σκληρυνθεί έως και 15 ημέρες πριν την οποιαδήποτε πειραματική δοκιμή.[5]

Εφαρμογή nsm frp ράβδων [4]

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα προστασίας για τους εργάτες.

Προτείνεται η χρήση προστατευτικής μάσκας για τη σκόνη κατά τη δημιουργία της εγκοπής και τον τεμαχισμό των ράβδων, αλλά και στην διάρκεια ανάμιξης και τοποθέτησης της εποξειδικής κόλλας διότι το περιβάλλον είναι έντονα τοξικό.

Για τη μεταφορά και τοποθέτηση των ράβδων πρέπει να χρησιμοποιούνται γάντια.

Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε να μην χαραχθεί η επιφάνεια της ράβδου από τη σύγκρουση με άλλες επιφάνειες, γιατί υπάρχει πιθανότητα μείωσης της εφελκυστικής της αντοχής. [4]

1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ FRP ΡΑΒΔΩΝ.

Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης FRP ράβδων που την καθιστούν ανταγωνιστική και αποδοτική είναι τα εξής:

- Ανθεκτικότητα στα χλωριόντα και στις χημικές προσβολές.
- Εφελκυστική αντοχή μεγαλύτερη του χάλυβα.
- Έχει το 1/5 του βάρους του χάλυβα.
- Καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινοπλισμένων πολυμερών.
- Μέτρο ελαστικότητας που πλησιάζει αυτό του χάλυβα
- Οι CFRP ράβδοι έχουν μέτρο ελαστικότητας τρεις φορές μεγαλύτερο από τις GFRP ράβδους.
- Έχουν επιφάνεια που εξασφαλίζει τη συνάφεια μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος σε περιπτώσεις νέας κατασκευής ή μεταξύ ράβδου και ρητίνης σε ενισχύσεις.[4]
- Ελάχιστος χρόνος εγκατάστασης.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ NSM FRP ΡΑΒΔΟΥΣ

- Δυνατότητα αγκύρωσης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.
- Δυνατότητα χρήσης της σε περιοχές όπου εμφανίζονται αρνητικές ροπές σε πλάκες, καταστρώματα γεφυρών και δοκούς, όπου η τοποθέτηση οποιασδήποτε άλλης εξωτερικής ενίσχυσης αποδεικνύεται μειονεκτική, εφόσον υπόκειται σε σημαντική φθορά εξαιτίας μηχανικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, ενώ θα απαιτούσε προστατευτική επικάλυψη που θα ήταν δύσκολο να εφαρμοστεί εξαιτίας της ύπαρξης πατωμάτων. [6]
- Από πειράματα που διεξήχθησαν σε υφιστάμενες κατασκευές για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των nsm frp ράβδων σε σύγκριση με αυτή των frp φύλλων, προέκυψε ότι η μέθοδος ενίσχυσης με nsm frp ράβδους είναι αποτελεσματικότερη, εφόσον προσέδιδε μεγαλύτερη αντοχή στην κατασκευή.[8]

Καθώς η συγκεκριμένη τεχνική προάγεται, η δομική συμπεριφορά των ενισχυμένων με frp ράβδους στοιχείων απαιτεί πλήρη διερεύνηση.

2.1 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΤΗΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ.

Η συνάφεια είναι ένας από τους πρωτεύοντες παράγοντες που πρέπει να εξετασθούν, καθώς αποτελεί το μέσο μεταβίβασης δυνάμεων μεταξύ σκυροδέματος και frp ράβδων, ώστε να επιτευχθεί σύμμεικτη δράση.

Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια είναι οι εξής:

- Το μήκος της ράβδου που συμβάλλει στη συνάφεια (συναπτόμενο μήκος).
- Η διάμετρος της ράβδου
- Ο τύπος των ινών του πολυμερούς υλικού της ράβδου
- Επιφανειακή μορφή της ράβδου
- Το μέγεθος της εγκοπής
- Ο τύπος της ρητίνης
- Η αντοχή του σκυροδέματος.

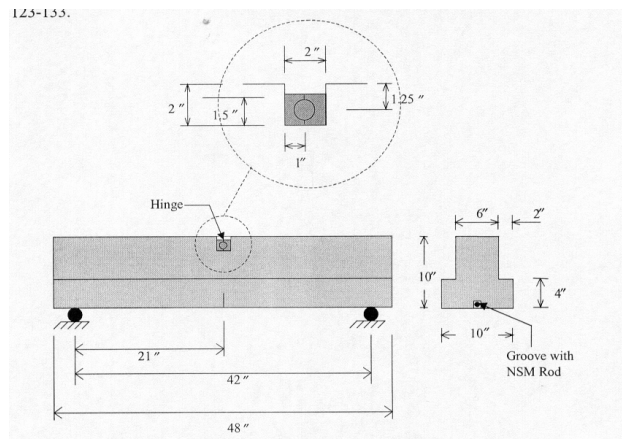
Στο πείραμα που περιγράφεται παρακάτω εξετάζονται οι πέντε πρώτες παράμετροι.

Ως πειραματική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εξόλκευσης, δηλαδή η εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης στη δοκό εξωτερικά, κατά μήκος του άξονά της.

Τα δοκίμια αποτελούσαν άοπλοι δοκοί σκυροδέματος μορφής ανεστραμμένου T, ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη επιφάνεια έντασης για το σκυρόδεμα και ταυτόχρονα να μειώνεται το βάρος του δοκιμίου. Η μεγαλύτερη επιφάνεια έντασης στο δοκίμιο εξασφαλίζει μεγαλύτερη ροπή αντοχής. Επιπλέον, η θέση τοποθέτησης της ράβδου επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να προηγηθεί η διαρροή της πριν χαθεί η συνάφειά της με το σκυρόδεμα. Για διαφορετικά εφαρμοζόμενα φορτία η μέγιστη εφελκυστική δύναμη υπολογίστηκε ως συνάρτηση της απόστασης του συναπτόμενου μήκους από τη στήριξη. Η απόσταση αυτή ορίστηκε τόση, ώστε η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα, κατά την εφαρμογή του φορτίου που προκαλεί απώλεια συνάφειας, να μην προκαλεί ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Το δοκίμιο έχει μία χαλύβδινη άρθρωση στην κορυφή και μία πριονισμένη εγκοπή στο κάτω τμήμα και τα δύο τοποθετημένα στο μέσο του μήκους της δοκού. Σκοπός τους είναι να επιτρέπουν τον έλεγχο της εσωτερικής κατανομής των δυνάμεων. [3]



Διαστάσεις και μορφή δοκιμίων.

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι:

1. Ο τύπος των ινών του πολυμερούς υλικού της ράβδου και η επιφανειακή μορφή της ράβδου. (GFRP ράβδοι με ραβδώσεις, CFRP ράβδοι με ραβδώσεις, CFRP αμμοβολημένες).
2. Το μέγεθος της εγκοπής. (=1.25 – 2.5 φορές τη διάμετρο της ράβδου)
3. Το συναπτόμενο μήκος. (=6,12,18 και 24 φορές τη διάμετρο της ράβδου)
4. Το υλικό πλήρωσης της εγκοπής.
5. Οι επιφανειακές συνθήκες της εγκοπής.

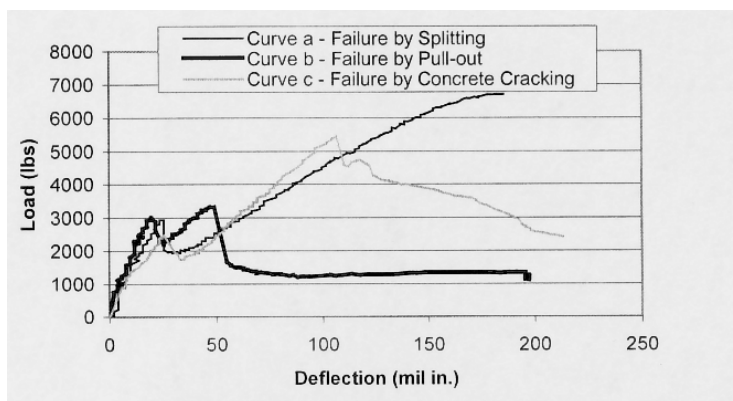
Η αντοχή του σκυροδέματος και ο τύπος της ρητίνης παρέμειναν αμετάβλητα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, παρόλο που αποτελούν παραμέτρους της έρευνας.

Η ονομαστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 27.6 MPa ενώ ο μέσος όρος κυμαινόταν μεταξύ των 26.7 και 28.2 MPa. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ρητίνης όπως καθορίζονται από τον κατασκευαστή ήταν: 13.8 MPa εφελκυστική αντοχή, 4% παραμόρφωση (επιμήκυνση) αστοχίας, 55.2 MPa θλιπτική αντοχή και 2757 MPa συντελεστής θλίψης.

Η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των CFRP ράβδων με ραβδώσεις καθορίστηκαν με πειράματα. Ο μέσος όρος των τιμών αυτών προέκυψε 1875 MPa και 104.8 GPa με απόκλιση 47.6 MPa και 4.8 GPa αντίστοιχα. Για τις ράβδους GFRP No 4 από τον κατασκευαστή είχαν δοθεί τα παρακάτω στοιχεία: εφελκυστική αντοχή 799 MPa και μέτρο ελαστικότητας 41.3 GPa, ενώ για τις αμμοβολημένες CFRP No 3 ράβδους 1550 MPa και 164.7 GPa αντίστοιχα.[3]

2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τον έλεγχο της συνολικής συμπεριφοράς των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη φορτίο – μετατόπιση στο μέσο της δοκού. Τρεις τύποι καμπυλών διαμορφώθηκαν ανάλογα με τον τύπο της αστοχίας, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



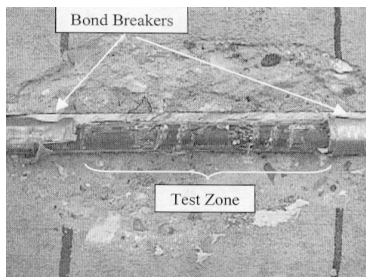
Διάγραμμα φορτίου - παραμόρφωσης

Η καμπύλη a αντιστοιχεί σε διαχωρισμό της ρητίνης επικάλυψης, η b σε αστοχία από ολίσθηση, ενώ η c σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος που περιβάλλει την εγκοπή.

Παρατηρήθηκαν διαφορετικοί τρόποι αστοχίας των δοκιμών για τις δύο κατηγορίες επιφάνειας ράβδων.

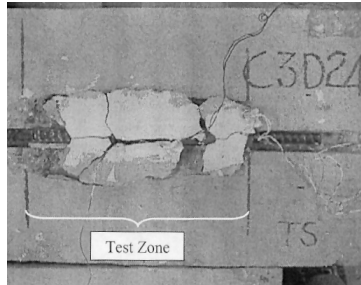
2.2.1 Ράβδοι με ραβδώσεις :

1. Σε όλα τα δοκίμια με ραβδωτές ράβδους παρατηρήθηκε διαχωρισμός ρητίνης με την οποία είχαν επικαλυφθεί οι ράβδοι, συνοδευόμενος ή όχι από ρηγμάτωση του σκυροδέματος που περιέβαλε την εγκοπή. Κατά τη διάρκεια του πειράματος θόρυβος ρηγμάτωσης επισήμανε την αυξανόμενη ρηγμάτωση της ρητίνης μέχρι την τελική της αστοχία οπότεν το φορτίο μειώθηκε ξαφνικά.



2. Στην περίπτωση των GFRP ράβδων οι ραβδώσεις κοντά στο φορτιζόμενο άκρο είχαν μερικώς καταστραφεί, γεγονός που δεν παρατηρήθηκε στις περισσότερες CFRP ράβδους. [3]

3. Για μεγαλύτερο μέγεθος εγκοπής παρατηρήθηκε οριζόντια και κεκλιμένη ρηγμάτωση της ρητίνης η οποία διαδόθηκε και στο παρακείμενο της εγκοπής σκυρόδεμα.



Ο τρόπος αστοχίας με διαχωρισμό της ρητίνης επικάλυψης προσομοιάζει του τρόπου αστοχίας της επικάλυψης από σκυρόδεμα.

Το φορτίο αστοχίας του συγκεκριμένου μηχανισμού επηρεάζεται από

- την επιφανειακή μορφή των ράβδων
- την εφελκυστική αντοχή του υλικού επικάλυψης
- το πάχος της επικάλυψης που με τη σειρά που εξαρτάται από το βάθος της εγκοπής.

Τυπικά, η ρητίνη έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από το σκυρόδεμα, ωστόσο το πάχος επικάλυψης του nsm οπλισμού από τη ρητίνη είναι μικρότερο από αυτό του σκυροδέματος στο συμβατικό οπλισμό, γεγονός που καθιστά την πρώτη μειονεκτικότερη.

Εάν η ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα συμβεί πριν ή μετά από τη δημιουργία ρωγμών στη ρητίνη ή ακόμα την ολική καταστροφή της επικάλυψης, εξαρτάται από το μέγεθος της εγκοπής και από την εφελκυστική αντοχή των δύο υλικών (σκυροδέματος και ρητίνης).

2.2.2 Ράβδοι αμμοβολημένης επιφάνειας :

Παρατηρήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι αστοχίας στη συγκεκριμένη κατηγορία επιφάνειας ράβδων.

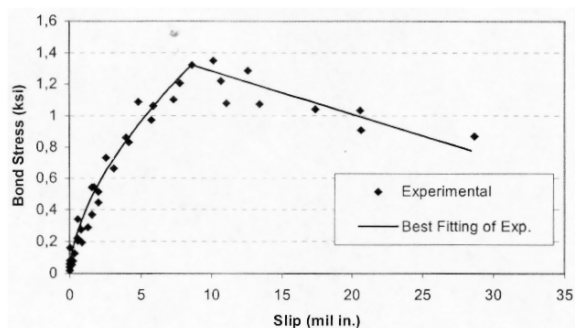
1. Διαχωρισμός της ρητίνης επικάλυψης
2. Αποσύνθεση της ρητίνης σε μικρά κομμάτια
3. Διαχωρισμός επικάλυψης σε δύο κομμάτια κατά μήκος οριζόντιας ρωγμής.
4. Αστοχία στη διεπιφάνεια μεταξύ ρητίνης και CFRP ράβδου.

Στον τελευταίο τρόπο αστοχίας δεν παρατηρείται φθορά του δοκιμίου, εφόσον η αστοχία είναι εσωτερική και χημικής φύσης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο βαθμός της επιφανειακής τραχύτητας των αμμοβολημένων ράβδων δεν επιτρέπει την μηχανική αλληλοεμπλοκή με τη ρητίνη, συνεπώς η συνάφεια αρχικά είναι χημικής φύσης και στη συνέχεια μεταπίπτει σε τριβή.

Επομένως, επισυμβαίνει αστοχία κατά τη στιγμή που χάνεται η χημική συνάφεια. [3]

2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.

- Επίδραση της επιφανειακής μορφής των ράβδων :
 - Οι ραβδωτές ράβδοι έχουν την τάση να αστοχούν με διαχωρισμό της ρητίνης περισσότερο απ' ό τι οι αμμοβολημένες.
 - Την καλύτερη απόδοση όσο αφορά στο μέγιστο φορτίο και τη σχέση συνάφειας – ψευδοόγκιμης ολίσθησης παρουσιάζουν οι αμμοβολημένες ράβδοι.[7]
 - Εξετάζοντας την απόδοση όσο αφορά στη συνάφεια, συγκρίνοντας τις CFRP ραβδωτές και αμμοβολημένες ράβδους και κρατώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους αμετάβλητες, οι ράβδοι που φέρουν ραβδώσεις είναι καταλληλότερες.[3]
- Επίδραση του μεγέθους της εγκοπής :
 - Το μέγιστο φορτίο αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους της εγκοπής .
 - Εάν η αστοχία συμβαίνει στη διεπιφάνεια ρητίνης-σκυροδέματος ή κονιάματος-σκυροδέματος η μέση τάση συνάφειας μειώνεται εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων συνάφειας.
 - Εάν ο μηχανισμός αστοχίας είναι η ρηγμάτωση της ρητίνης, η μέση τάση συνάφειας αυξάνεται.[7]
- Επίδραση του συναπτόμενου μήκους :
 - Το μέγιστο φορτίο αυξάνει με την αύξηση του συναπτόμενου μήκους.
 - Η μέση τάση συνάφειας μειώνεται εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων συνάφειας.
- Επίδραση του υλικού πλήρωσης της εγκοπής.
 - Τα πληρούμενα με κονίαμα δοκίμια αστοχούν σε μικρότερα φορτία.
 - Τα πληρούμενα με κονίαμα δοκίμια δίνουν περισσότερο πλαστική αστοχία.
- Επίδραση των επιφανειακών συνθηκών της εγκοπής :
 - Σε λείες εγκοπές η αστοχία παρουσιάζεται στη διεπιφάνεια ρητίνης-σκυροδέματος (ή κονιάματος-σκυροδέματος) και η συμπεριφορά συνάφειας-ολίσθησης είναι ψευδοόγκιμη εξαιτίας της εναπομένουσας τριβής.



Σχέση συνάφειας-ολίσθησης ψευδοόγκιμης συμπεριφοράς.

-Σε τραχείς εγκοπές η αστοχία στις περισσότερες περιπτώσεις οφείλεται σε διάρρηξη της ρητίνης. Η όλκιμη συμπεριφορά συνάφειας-ολίσθησης εξαρτάται από την επιφάνεια της ράβδου και το υλικό πλήρωσης της εγκοπής.
-Τραχείς εγκοπές δίνουν μεγαλύτερη τοπική τάση συνάφειας.
Ωστόσο, εάν η συμπεριφορά συνάφειας-ολίσθησης είναι ψαθυρή, οι λείες εγκοπές δίνουν μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο για μεγάλα συναπτόμενα μήκη και προτιμούνται.[7]

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ.

Η διαφορική εξίσωση που διέπει τη συνάφεια είναι η παρακάτω :

$$(d^2s / dx^2) - (4 / d_b * E_b) * (\tau(s(x))) = 0$$

και

$$\tau = K*s$$

με K σταθερά ολίσθησης.

Έχοντας γνωστή τη σχέση τάσης – ολίσθησης μπορούμε να υπολογίσουμε το φορτίο στο οποίο ξεκινάει η ολίσθηση, λύνοντας τη διαφορική εξίσωση με τις συνοριακές συνθήκες:

$$s(0) = 0$$

$$ds/dx = \epsilon_b(0) = 0 \text{ για } x = 0.$$

όπου:

E_b : μέτρο ελαστικότητας ράβδου

d_b : διάμετρος ράβδου

$s(x)$: ολίσθηση στο μήκος x

τ : τοπική τάση συνάφειας.

ϵ_b : παραμόρφωση ράβδου.

Η παραπάνω διαδικασία δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του φορτίου αστοχίας κατά την απώλεια συνάφειας για δεδομένα συναπτόμενα μήκη.

Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που πρέπει να εφαρμοστεί στη ράβδο είναι:

$$\sigma_1 = (8 * E_b * \tau_m * s_m) / (d_b * (1 + \alpha))$$

ενώ το αντίστοιχο ελάχιστο συναπτόμενο μήκος /μήκος αγκύρωσης είναι:

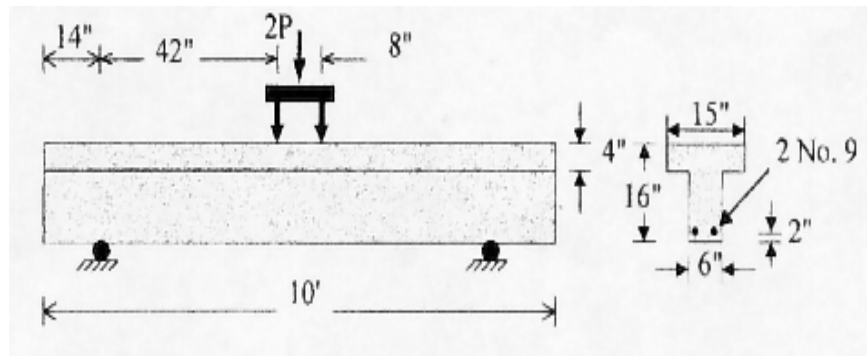
$$l_m = (\sigma_1 * d_b (1 + \alpha)) / (4 * \tau_m (1 - \alpha)) \quad [3]$$

όπου:

$$\alpha = \sqrt{(4K / (E_b * d_b))}$$

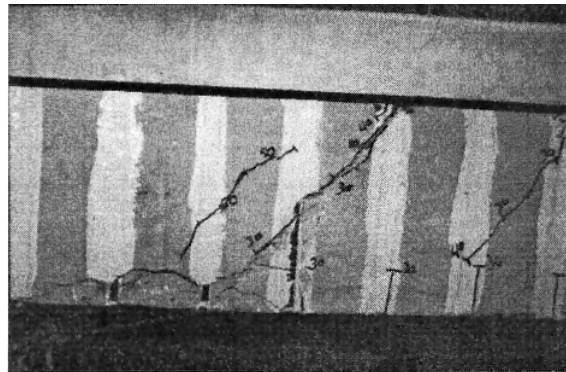
3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Σύμφωνα με την παρακάτω πειραματική διάταξη έγιναν πειράματα σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίοι δεν είχαν χαλύβδινο οπλισμό διάτμησης, αλλά ενισχύθηκαν έναντι διάτμησης με ινοπλισμένες ράβδους.



Πειραματική διάταξη

Αποτέλεσμα των πειραμάτων ήταν να αστοχήσουν σε διάτμηση όλα τα δοκίμια. Παρουσιάστηκαν διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και η μορφή της αστοχίας ήταν διάρρηξη της ρητινικής επικάλυψης στα σημεία όπου οι ινοπλισμένες ράβδοι τέμνονταν από τη μεγαλύτερη διατμητική ρωγή. [5]



Διατμητική αστοχία δοκού.

3.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ NSM FRP ΡΑΒΔΩΝ ΣΤΗΝ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η ονομαστική διατμητική αντοχή (V_n) στοιχείων οπλισμένων με πολυμερικές ράβδους δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_n = V_c + V_s + V_{FRP}$$

Η διατμητική αντοχή σχεδιασμού λαμβάνεται πολλαπλασιάζοντας την V_n με ένα μειωτικό συντελεστή ϕ για τον οποίο συντηρητικά θεωρούμε $\phi = 0.70$.

Για να υπολογιστεί η παραπάνω σχέση πρέπει να ποσοτικοποιήσουμε τη διατμητική ικανότητα των FRP ράβδων. [5]

3.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΡΑΒΔΩΝ.

$$V_{FRP} = \min(V_{FRP1}, V_{FRP2})$$

Όπου :

V_{FRP1} : η συμβολή της FRP ράβδου στη διατμητική αντοχή σχετιζόμενη με την αστοχία από απώλεια συνάφειας.

V_{FRP2} : η συμβολή της FRP ράβδου στη διατμητική αντοχή που αντιστοιχεί σε μέγιστη τάση ίση με 4000 με_b.

ϵ_b : εφελκυστική τάση της frp ράβδου.

Στους υπολογισμούς συνίσταται μία μειωμένη τιμή του μήκους της ράβδου ίση με :

$$d_{net} = d_r - 2*c$$

Όπου :

d_r : το μήκος της ράβδου

c : η επικάλυψη σκυροδέματος του εσωτερικού κατά μήκος του άξονα οπλισμού. [5]

3.3.1 Υπολογισμός της V_{FRP1} .

Η V_{FRP1} υπολογίζεται κάνοντας τις παρακάτω υποθέσεις:

- Η γωνία των διατμητικών ρωγμών ισούται με 45°.
- Οι τάσεις συνάφειας κατανέμονται ομοιόμορφα κατά το μήκος της ράβδου στο μέγιστο βαθμό.
- Η μέγιστη τάση συνάφειας παρουσιάζεται σε όλες τις ράβδους που τέμνονται από τη μέγιστη διατμητική ρωγμή.[5]

Η διατμητική δύναμη που αναλαμβάνεται από την frp ράβδο μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα των διατμητικών δυνάμεων που εμφανίζονται στις ράβδους frp που κόβονται από μια ρωγμή. Κάθε ράβδος που τέμνεται από μία ρωγμή, μπορεί να χωριστεί θεωρητικά σε δύο τμήματα εκατέρωθεν της ρωγμής. Η δύναμη σε καθεμία από αυτές τις ράβδους στην περιοχή της ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο της μέσης τάσης συνάφειας και της επιφάνειας του μικρότερου τμήματος της τεμνόμενης από τη ρωγμή ράβδου (ενεργό μήκος).

Έτσι:

$$V_{FRP1} = 2 * \sum A_i * f_i = 2 * \pi * d_b * \tau_b * L_{tot}$$

$$\text{ή } V_{FRP1} = 2 * \pi * d_b * \tau_b * L_{tot, min}$$

και

$$L_{tot, min} = d_{net} - s \quad \text{εάν } d_{net} / 3 < s < d_{net}$$

$$L_{tot, min} = 2 * d_{net} - 4 * s \quad \text{εάν } d_{net} / 4 < s < d_{net} / 3$$

Όπου:

A_i : επιφάνεια τεμνόμενης διατομής ράβδου

f_i : εφελκυστική δύναμη της ράβδου στο σημείο της ρωγμής

L_{tot} : το άθροισμα των ενεργών μηκών όλων των ράβδων που τέμνονται από την ίδια ρωγμή. Υπολογίζεται στην πιο δυσμενή θέση της ρωγμής, όπου λαμβάνει και την ελάχιστη τιμή του.

s : απόσταση των NSM FRP ράβδων. [5]

3.3.2 Υπολογισμός της V_{FRP2} . [5]

Για τον υπολογισμό της V_{FRP2} γίνονται οι ίδιες υποθέσεις όπως και για την V_{FRP1} . Το ενεργό μήκος μιας frp ράβδου, που τέμνεται από ρωγμή και αντιστοιχεί σε τάση ίση με 4000 με_b και μέση τάση συνάφειας τ_b , είναι:

$$L_t = 0.001 (d_b * E_b / \tau_b)$$

Σε περίπτωση που κάποιο από τα ενεργά μήκη προκύψει μεγαλύτερο του L_t , τότε θεωρούμε ότι τα μήκη αυτά φέρουν εφελκυστικό φορτίο που αντιστοιχεί σε τάση ίση με 4000 με_b, ενώ το φορτίο των υπόλοιπων υπολογίζεται ως το γινόμενο $\tau_b * A_i$.

Ανάλογα με τις αποστάσεις τοποθέτησης των NSM FRP ράβδων υπολογίζεται και η V_{FRP2} . Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. $d_{net} / 2 < s < d_{net}$

- Εάν $L_t > d_{net} - s$ έχουμε απώλεια συνάφειας πριν η μέγιστη τάση πάρει την τιμή 4000 με_b, συνεπώς δεχόμαστε ως τιμή την V_{FRP1} .
- Εάν $L_t < d_{net} - s$ τότε:
 - $V_{FRP2} = 2 * \pi * d_b * \tau_b * L_t$

2. $d_{net} / 3 < s < d_{net} / 2$

- Εάν $L_t > s$ δεχόμαστε ως τιμή την V_{FRP1} .
- Εάν $L_t < s$ δεχόμαστε την V_{FRP2} με τιμή :

▪ $V_{FRP2} = 2 * \pi * d_b * \tau_b * (L_t + d_{net} - 2s)$	εάν	$d_{net} - 2s < L_t < s$
▪ $V_{FRP2} = 4 * \pi * d_b * \tau_b * L_t$	εάν	$L_t < d_{net} - 2s$

3. $d_{net} / 4 < s < d_{net} / 3$

- Εάν $L_t > d_{net} - 2s$ δεχόμαστε ως τιμή την V_{FRP1} .
- Εάν $L_t < d_{net} - 2s$ δεχόμαστε την V_{FRP2} με τιμή :

▪ $V_{FRP2} = 2 * \pi * d_b * \tau_b * (L_t + d_{net} - 2s)$	εάν	$s < L_t < d_{net} - 2s$
▪ $V_{FRP2} = 2 * \pi * d_b * \tau_b * (2L_t + d_{net} - 3s)$	εάν	$d_{net} - 3s < L_t < s$
▪ $V_{FRP2} = 6 * \pi * d_b * \tau_b * L_t$	εάν	$L_t < d_{net} - 3s$

4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η μέθοδος ενίσχυσης με NSM FRP ράβδους είναι μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος, εφόσον μπορεί να αυξήσει την αντοχή ενός μέλους σε ποσοστό της τάξης του 30%. [8] Αποτελεί σημαντική ενίσχυση σε κάμψη και διάτμηση δοκών και άλλων στοιχείων, αλλά δεν προσδίδει πλαστιμότητα.
- Πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων εξωτερικής ενίσχυσης, οι οποίες υπόκεινται σε φθορά από την έκθεσή τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Βάσει των τύπων που παρουσιάστηκαν, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος αγκύρωσης, το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο της ράβδου και η συνεισφορά των nsm frp ράβδων στη διατμητική αντοχή του μέλους.
- Κατά την επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της εγκοπής και των διαστάσεων των nsm frp ράβδων, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η επίδραση της μεταβολής κάθε παραμέτρου στη συνάφεια και στον πιθανό τρόπο αστοχίας.
- Περαιτέρω έρευνα απαιτείται για τον πλήρη χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των nsm frp ράβδων, των παραμέτρων που τις επηρεάζουν και την επίδραση κάθε μεταβολής στη συμπεριφορά των ράβδων.
- Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί, ώστε να γίνει ασφαλής και συντηρητική εφαρμογή της μεθόδου.

5.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Joaquim Barros, José Sena-Cruz, Salvador Dias, Débora Ferreira, Andriano Fortes
“**Near surface mounted CFRP-based technique for the strengthening of concrete structures**”,
JORNADA TÉCNICA EN HONOR A RAVINDRA GETTU.5 DE OCTUBRE DE 2004.
- [2] STUCTURAL GROUP (www.Structural.net), “**Strengthening Highway Bridges with CFRP Composites**”, Concrete Repair Bulletin, May/ June 2002.
- [3] De Lorenzis and A.Nanni
“**Bond Between Near Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural Strengthening**”,
ACI Structures Journal, Vol.99, No.2, March-April 2002, p.123-133.
- [4] “**Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) REBAR Aslan 200**” by Hughes Brothes,
December 2002.
(www.hughesbros.com)
- [5] Laura De Lorenzis and Antonio Nanni,
“**Characterization of FRP Rods as Near-Surface Mounted Reinforcement**”
Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.2, May 2001.

- [6] Tarek Hassan, Sami Rizkalla,
“Bond Mechanisms of Near Surface Mounted FRP Bars and Strips for Flexural Strengthening of Concrete Structures”
- [7] Laura De Lorenzis, Andrea Rizzo, Antonio La Tegola
“Anchorage Length of NSM FRP Rods in Concrete”,
ACIC 2002 Southampton, UK, April 15th-17th, 2002.
- [8] Tarek Alkhrdaji, Antonio Nanni, Genda Chen, Michael Barker,
“Upgrading the transportation infrastructure: Solid RC decks strengthened with FRP”, Concrete International: Design and Construction, Vol.21, No.10, Oct.1999,
pp. 37-41.