

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΣΕ ΣΤΡΕΨΗ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP).

ΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΗΣ

### Περίληψη

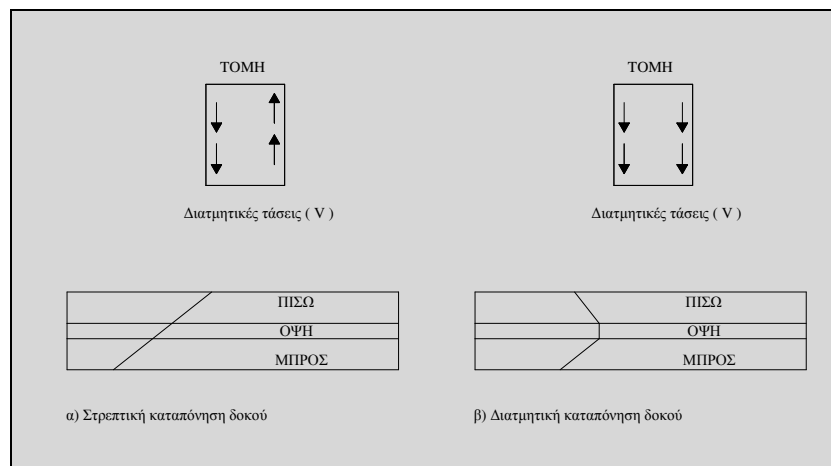
Στην εργασία αυτή εξετάζεται η αποτελεσματικότητα ενίσχυσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος σε στρέψη με την χρήση ελασμάτων ή υφασμάτων από Ινοπλισμένα Πολυμερή. Παρουσιάζονται διάφορες δυνατότητες χρήσης των σύνθετων αυτών υλικών για τέτοιου είδους ενισχύσεις και ελέγχονται πιθανοί τρόποι αγκύρωσής τους. Τέλος παρουσιάζεται ένας απλός τρόπος για τον υπολογισμό των υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για μια τέτοια ενίσχυση.

### 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επισκευή και ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος εφαρμόζεται ευρέως στις μέρες μας. Πολλοί είναι οι λόγοι που υπαγορεύουν την επέμβαση σε υφιστάμενα κτήρια. Αρχικά, τα φαινόμενα διάβρωσης που προκαλούν μείωση της διατομής των οπλισμών, έχουν ως άμεσο επακόλουθο τη μείωση της αντοχής του μέλος στο οποίο βρίσκονται. Ακόμη, οι φθορές σε ένα κτήριο μετά από κάποιο σεισμό πρέπει να επισκευάζονται έτσι ώστε το κτήριο αυτό να γίνει ξανά λειτουργικό και να μπορεί να φέρει τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε. Τέλος σχεδιαστικά ή κατασκευαστικά λάθη ή η αλλαγή των φορτίων σχεδιασμού χρίζουν επέμβασης για την ενίσχυση ορισμένων μελών ενός κτηρίου<sup>1,6</sup>.

Εδώ και δέκα τουλάχιστον χρόνια έχουν προταθεί και εφαρμοσθεί διάφορες τεχνικές για την αύξηση της αντοχής μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, διάτμηση και στρέψη.

Ειδικότερα για την ενίσχυση σε στρέψη, οι τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα είναι παρόμοιες με αυτές που εφαρμόζονται για την ενίσχυση σε διάτμηση, αφού αυτές οι δύο καταπονήσεις προκαλούν περίπου ίδια φαινόμενα στα γραμμικά μέλη με μία όμως βασική διαφορά<sup>1,6</sup>: Ενώ κατά την διατμητική αστοχία οι λοξές ρωγμές που εμφανίζονται στις δύο πλευρές μίας δοκού είναι



Σχήμα 32.1: Διατμητική και στρεπτική καταπόνηση δοκού

παράλληλες, στην στρέψη έχουν αντίθετη κατεύθυνση (Σχήμα 32.1), λόγω του αντίθετου προσήμου των διατμητικών τάσεων στις δύο εξωτερικές επιφάνειες της δοκού αυτής.

Ως επί το πλείστον, σήμερα, η ενίσχυση σε στρέψη σε μέλη κτηρίων, γεφυρών και άλλων έργων γίνεται με τις παρακάτω τεχνικές<sup>1,4</sup>:

- Αύξηση διατομής και τοποθέτηση νέου οπλισμού
- Χρήση εξωτερικών μεταλλικών στοιχείων
- Χρήση προέντασης

## 2.ΣΤΡΕΨΗ, ΑΜΕΣΗ Ή ΕΜΜΕΣΗ;

Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος εμφανίζονται δύο είδη στρέψης: η στρέψη “λόγω συμβιβαστού” ή “έμμεση” και η στρέψη “λόγω ισορροπίας” ή “άμεση”<sup>1-7</sup>. Η πρώτη είναι αποτέλεσμα της ανάγκης συμβιβαστού των γωνιών στροφής στους κόμβους πλαισιωτών φορέων με γραμμικά μέλη ( π.χ. η γωνία στροφής λόγω κάμψης ενός μέλους στον κόμβο προκαλεί στρέψη στο εγκάρσιο μέλος με το οποίο συνδέεται.). Για αυτό το είδος στρέψης οι κανονισμοί θεωρούν ότι δεν χρειάζεται έλεγχος για την αντοχή των μελών αυτών σε στρέψη.

Η στρέψη “λόγω ισορροπίας” σε ένα γραμμικό μέλος σκυροδέματος προκύπτει από την δράση εξωτερικών φορτίων που προκαλούν άμεσες στρεπτικές ροπές, δηλαδή ροπές με διάνυσμα παράλληλο στον άξονά του, που δεν μπορούν να αναληφθούν χωρίς την ανάπτυξη στρέψης. Για παράδειγμα, ένα μπαλκόνι καταπονεί την δοκό στην οποία στηρίζεται σε στρέψη “ισορροπίας”, αφού αν δεν αναπτυχθεί στρέψη στη δοκό το μπαλκόνι δεν ισορροπεί.

Εν αντιθέσει με την έμμεση, για την άμεση στρέψη οι κανονισμοί δίνουν σαφείς οδηγίες για τον υπολογισμό της οριακής κατάστασης αστοχίας τέτοιων μελών και για την διαστασιολόγησή τους.

Η αντοχή ενός γραμμικού μέλους σε καθαρή στρέψη ( $T_{sd}$ ) υπολογίζεται με βάση την αντοχή του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη ( $T_{rd1}$ ), την ποσότητα των συνδετήρων που θα παραλάβουν τις διατμητικές τάσεις που προκαλεί η στρεπτική καταπόνηση ( $T_{rd2}$ ) και την ποσότητα των διαμήκων ράβδων που συνεισφέρουν σε στρέψη ( $T_{rd3}$ ).

$T_{sd} \leq T_{rd1} = v f_{cd} A_k t \sin 2\theta$	για συμπαγείς διατομές: $v=0.7\max(0.5, 0.7 - f_{ck}(\text{MPa})/200)$
$T_{sd} \leq T_{rd2} = 2(A_{sw}/s)A_k f_{ywd} \cot\theta$	$u_k$ : Η περίμετρος της μέσης γραμμής της ισοδύναμης κοίλης διατομής
$T_{sd} \leq T_{rd3} = 2(A_l/u_k)A_k f_{yld} \tan\theta$	$A_k$ : Το εμβαδόν που περικλείεται από την $u_k$

Τέλος στην περίπτωση της σύνθετης καταπόνησης πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση της κάμψης αλλά και της διάτμησης στον υπολογισμό της στρεπτικής αντοχής.

## 3.ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των Ινοπλισμένων Πολυμερών για την ενίσχυση μελών σκυροδέματος σε κάμψη και διάτμηση έχει αυξηθεί. Η ευκολία τοποθέτησης, το χαμηλό βάρος τους, η ανθεκτικότητα σε διάβρωση και η ακαμψία τους αντισταθμίζουν το αυξημένο κόστος τους έναντι χαλύβδινων στοιχείων.

Παρόλο που η χρήση των FRP για ενίσχυση σε κάμψη και διάτμηση είναι πλέον εκτεταμένη και έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες και κανονισμοί για την τοποθέτησή τους, για την περίπτωση των ενισχύσεων σε στρέψη προτιμώνται ακόμη οι παραδοσιακές μέθοδοι.

Για την ενίσχυση σε στρέψη ακολουθούνται οι ίδιες αρχές κατά τις οποίες γίνεται η ενίσχυση σε διάτμηση. Ωστόσο λόγω των διαφορών των δύο φαινομένων ορισμένοι παράγοντες όπως ο τρόπος τοποθέτησης και η αγκύρωση των νέων στοιχείων πρέπει να ελεγχθούν εκ νέου.

Τα πειράματα που παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιούνται τρόπος υπολογισμού και διαστασιολόγησης νέων στοιχείων από Ινοπλισμένα Πολυμερή σε μορφή ελασμάτων και υφασμάτων. Ακόμη ερευνώνται οι επιπτώσεις από διαφορετικού τύπου αγκυρώσεις για συγκεκριμένες λύσεις.

### 3.1.ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ<sup>1,2</sup> – Ghobarah et al. (2002)

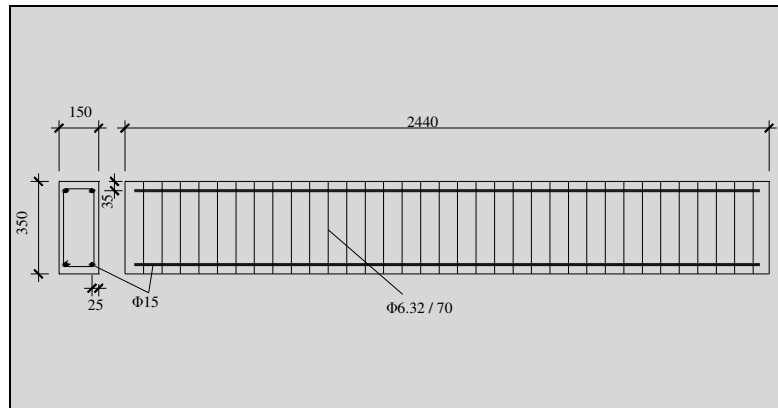
Στο πείραμα αυτό, εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα διαφόρων τρόπων επικόλλησης υφάσματος από CFRP (ίνες άνθρακα) και από GFRP (ίνες γυαλιού) σε ορθογωνικές δοκούς με διατομή 150 mm x 350 mm. Οι δοκοί είχαν μήκος 2440 mm ενώ το μήκος του ανοίγματος σε καθαρή στρέψη ήταν 1000 mm. Συνολικά ελέγχθηκαν σε στρέψη 11 δοκοί, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 32-2 και στο Σχήμα 32.2.

Οι δοκοί N1,N2,N3 ήταν δοκοί ελέγχου, οι C1 έως C6 ενισχύθηκαν με υφάσματα από ίνες άνθρακα και οι G1 και G2 με υφάσματα από ίνες γυαλιού. Τα χαρακτηριστικά των υφασμάτων, τα οποία κολλήθηκαν στις δοκούς με ειδική εποξειδική ρητίνη φαίνονται στον Πίνακα 32-1.

Πιο συγκεκριμένα η δοκός C1 τυλίχθηκε με ύφασμα σε όλο το μήκος της. Η C2 τυλίχθηκε με 5 κατακόρυφα υφάσματα 100 mm ανά 100 mm. Στη δοκό C3 τοποθετήθηκαν 3 λωρίδες υφάσματος 100 mm μονόπλευρα σε γωνία 45°. Η C4 τυλίχθηκε με 3 κατακόρυφες λωρίδες υφάσματος πλάτους 200mm ανά 100 mm. Η C5 με 5 κατακόρυφες λωρίδες υφάσματος πλάτους 100mm ανά 150 mm και η C6 με 3 λωρίδες 100 mm σε γωνία 45° περιελιγμένες σε όλο το μήκος καθαρής στρέψης της δοκού (Σχήμα 32.3).

Ακόμη η δοκοί G1 και G2 ενισχύθηκαν κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τις δοκούς C1 και C2 μόνο που αντί για CFRP το ύφασμα ήταν από GFRP.

Από τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας (Πίνακας 32-2) είναι φανερό ότι οι δοκοί που είχαν



Σχήμα 32.2: Χαρακτηριστικά ορθογωνικών δοκών

Ιδιότητες	CFRP (ίνες άνθρακα)	GFRP (ίνες γυαλιού)
Πάχος (mm)	0.165	0.353
Πυκνότητα ινών (gm/cm <sup>3</sup> )	1.82	2.58
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	3.550	1.700
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	235	71
Μέγιστη μήκυνση (%)	1.5	2

Πίνακας 32-1: Ιδιότητες υφασμάτων Ινοπλισμένων Πολυμερών

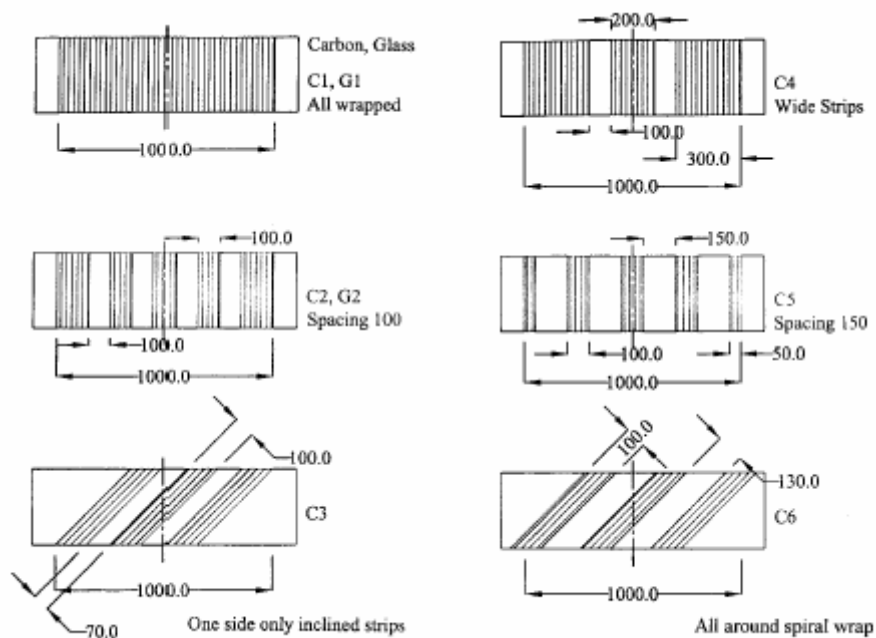
τυλιχθεί σε όλο το μήκος τους είτε με ίνες άνθρακα είτε με γυαλιού εμφάνισαν μεγαλύτερη αύξηση αντοχής, όμως το δοκίμιο από ίνες γυαλιού είχε μικρότερη πλαστιμότητα.

Ακόμη στο δοκίμιο C3 υπήρξε εφελκυστική αστοχία των ινών. Έτσι παρά την αυξημένη στρεπτική αντοχή η πλαστιμότητα που εμφάνισε ήταν αρκετά μικρή.

Δοκός	Οπλισμός κάτω πέλματος	Ροπή διαρροής (MPa)	Αποστάσεις συνδετήρων	Ροπή διαρροής συνδετήρων (MPa)	Μέγιστο Φορτίο	Αύξηση Αντοχής (%)
N1	2Φ15	409	120	456.8	19.45	-
N2	2Φ15	409	70	456.8	19.67	-
N3	2Φ20	461	200	567	19.02	-
C1	2Φ15	409	70	456.8	32.10	63
C2	2Φ15	409	70	456.8	24.93	27
C3	2Φ15	409	70	456.8	21.95	12
C4	2Φ15	409	70	456.8	28.27	44
C5	2Φ15	409	70	456.8	23.96	22
C6	2Φ15	413	120	567	30.05	-
G1	2Φ15	409	70	456.8	33.81	71
G2	2Φ15	409	70	456.8	23.48	19

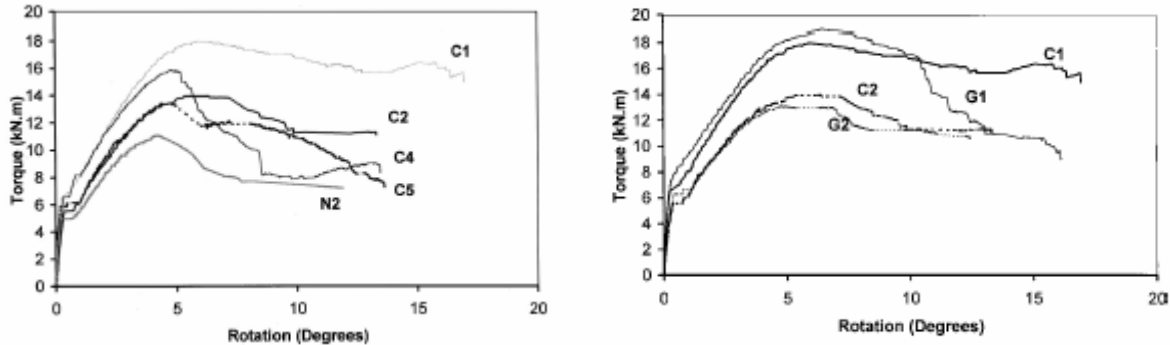
Πίνακας 32-2:Χαρακτηριστικά δοκών και αύξηση αντοχής.

Ακόμη είναι φανερό ότι και τα δύο ήδη Ινοπλισμένων Πολυμερών συμπεριφέρονται όμοια. Μικρή διαφορά που προκύπτει μετά την εμφάνιση της μέγιστης στρεπτικής ροπής οφείλεται στην ευκαμψία των ινών γυαλιού, λόγω της οποίας το σκυρόδεμα περισφίγγεται σε μικρότερο βαθμό κι έτσι υπάρχει ταχύτερη εμφάνιση ρωγμών και αποκόλληση του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 32.3:Διάταξη σύνθετων υλικών στις δοκούς του πειράματος

Τέλος από τα παραπάνω αποτελέσματα αλλά και από τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για τις δοκούς (Σχήμα 32.4) η αντοχή μετά την ενίσχυση φαίνεται αυξημένη μέχρι και 70%. Για να επιτευχθεί τέτοια αύξηση όμως πέρα από την σωστή τοποθέτηση των υλικών (προετοιμασία επιφάνειας, σωστή ανάμειξη των συστατικών της ρητίνης κλπ.), η δοκός που πρόκειται να ενισχυθεί πρέπει να μπορεί να τυλιχθεί περιμετρικά με ύφασμα, μια δυνατότητα που στην πράξη σπανίως υπάρχει.



Σχήμα 32.4: Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων δοκών C1 έως C5 και G1, G2.

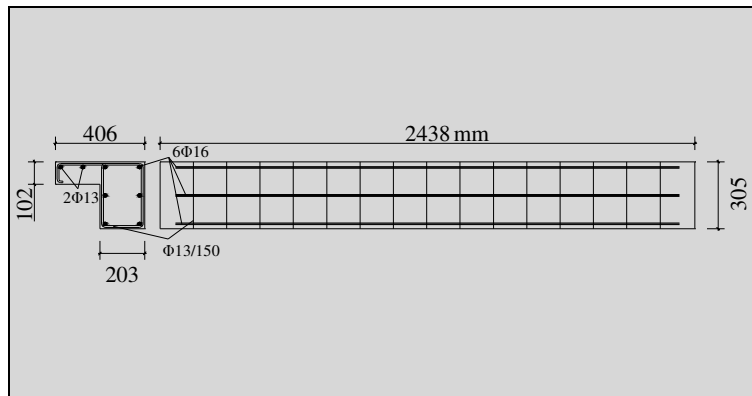
### 3.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΤΥΠΟΥ L<sup>1,4</sup> – Salom et al. (2004)

Όπως είναι φανερό από το παραπάνω πείραμα και από αντίστοιχα πειράματα διάτμησης<sup>1,3</sup>, καλύτερα αποτελέσματα για την ενίσχυση σε στρέψη προκύπτουν όταν ύφασμα από FRP τυλιχθεί γύρω από την κρίσιμη περιοχή. Αλώστε αυτός ο τρόπος και καλύτερη αγκύρωση επιτρέπει και αύξηση στην πλαστιμότητα λόγω περίσφιξης του σκυροδέματος που περιβάλλεται από τα σύνθετα υλικά. Όμως στην πράξη και ιδιαίτερα για περιμετρικές δοκούς κτηρίων δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμος.

Σε αυτό το πείραμα στόχος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά δοκών τύπου L (πλακοδοκοί) που συνήθως συναντώνται στην περίμετρο κτηρίων καθώς και η χρήση συγκεκριμένου τύπου αγκύρωσης σε συνδυασμό με ρητίνη για να εξακριβωθεί η συνεισφορά του στην αγκύρωση του πρόσθετου υλικού.

Έτσι κατασκευάστηκαν 6 δοκοί τύπου L με διαστάσεις και οπλισμούς που φαίνονται στο Σχήμα 32.5. Οι δοκοί ήταν υποδιαστασιολογημένες σε στρέψη και με βάση το “στήσιμο” του πειράματος το μήκος καθαρής στρέψης στο οποίο ελέγχθηκαν ήταν 1.219 mm.

Η ενίσχυση των δοκών αυτών με ελάσματα από CFRP (ίνες άνθρακα), έγινε ως εξής (Πίνακας 32-3):



Σχήμα 32.5: Διαστάσεις πλακοδοκών L

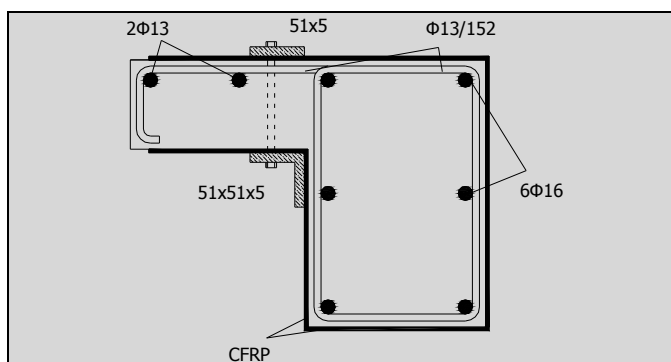
Οι δοκοί TB1 και TB6 χρησιμοποιήθηκαν ως δοκοί ελέγχου, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η αρχική αντοχή σε καθαρή στρέψη που είχαν τα δοκίμια.

Δοκός	FRP	Αγκύρωση	Μέγιστη Στρεπτική Ροπή (kNm)	Αύξηση Ροπής (kNm)	Αύξηση Ροπής %
TB1	Ελέγχου	-	20.3	-	-
TB2	[0/90]	Όχι	33.0	8.6	35
TB3	[±45]	Ναι	43.4	19.0	77
TB4	[0/90]	Ναι	37.3	12.9	53
TB5	[90]	Ναι	35.7	11.3	46
TB6	Ελέγχου	-	24.4	-	-

Πίνακας 32-3: Χαρακτηριστικά δοκών και ενίσχυσης τους

Στις υπόλοιπες δοκούς έλασμα από FRP κολλήθηκε στις πέντε από τις έξι πλευρές τους, με την έκτη ελεύθερη αφού θεωρητικά αποτελεί τμήμα της διατομής της πλάκας. Η δοκός TB2 ενισχύθηκε με έλασμα με ίνες σε διάταξη 0 και 90 μοίρες σε όλο το μήκος της δοκού. Ενώ οι ίνες που βρίσκονται στον κάθετα στον διαμήκη άξονα παίζουν το ρόλο των συνδετήρων, οι διαμήκεις ίνες ελέγχονται για την ικανότητα τους να παραλάβουν στρέψη ως διαμήκεις οπλισμοί.

Οι δοκοί TB3, TB4, TB5 είναι ενισχυμένες με έλασμα με διάταξη ινών σε ±45°, 0/90°, 90° αντίστοιχα. Και οι τρεις δοκοί χρησιμοποιούν το σύστημα αγκύρωσης που περιγράφεται παρακάτω (Σχήμα 32.6). Μεταλλικές πλάκες η μία γωνιακή διαστάσεων 51x51x5 mm και η άλλη 51x5 mm τοποθετημένες κατά μήκος των δοκών, όπως φαίνεται στο σχήμα, συνδέονται μεταξύ τους με αγκύρια διαμέτρου 6 mm ανά 305 mm. Αυτές οι πλάκες παρέχουν καλή αγκύρωση του

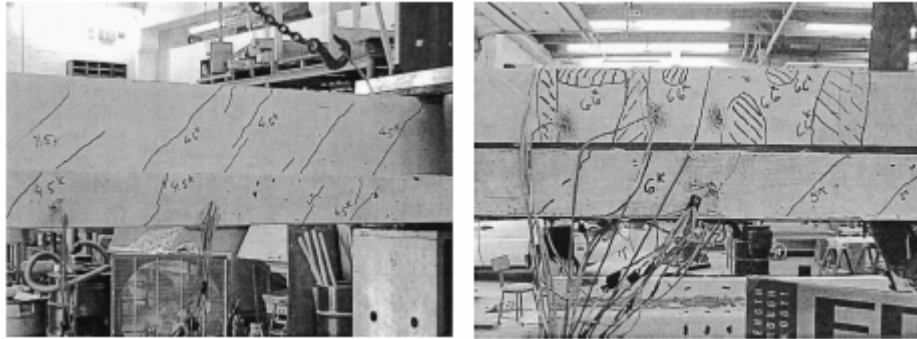


Σχήμα 32.6: Διάταξη FRP και σύστημα αγκύρωσης

ελάσματος και εμποδίζουν την αποκόλλησή του στην εσωτερική γωνία της δοκού.

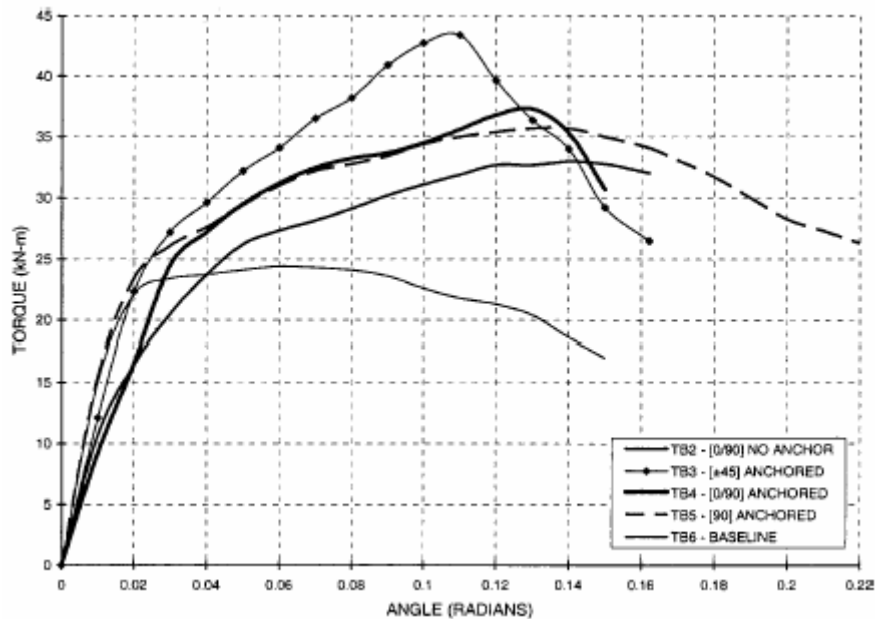
Τα παραπάνω πειράματα έδειξαν τα εξής αποτελέσματα: Οι δοκοί ελέγχου (TB1 και TB6), όπως ήταν αναμενόμενο, αστόχησαν λόγω δημιουργίας ρωγμών γωνίας 45° μεγάλου εύρους (Σχήμα 32.7). Η ενισχυμένη δοκός TB2, στην οποία δεν είχε χρησιμοποιηθεί σύστημα αγκύρωσης, αστόχησε με αποκόλληση των σύνθετων υλικών σε ακραία διατμητική ρωγή γωνίας 45°. Ενώ η αστοχία των υπολοίπων δοκών επήλθε από αποκόλληση των σύνθετων υλικών έπειτα από έντονη ριγμάτωση του σκυροδέματος.

Από τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος (Πίνακας 32-3) προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Αρχικά είναι εμφανές από τις δοκούς TB2 και TB4 ότι η χρήση αγκυριών παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αντοχής σε στρέψη. Ακόμη φαίνεται ότι έλασμα με ίνες σε διάταξη ± 45° είναι αποτελεσματικότερο αφού η γωνία των ινών είναι περίπου κάθετη με εκείνη των ρωγμών που προκαλούνται από τη στρέψη και στις δύο πλευρές της δοκού.



(α) (β)  
Σχήμα 32.7: Αστοχία δοκών (α)TB6 (ελέγχου) και (β)TB5

Επίσης ίνες σε διάταξη 0 και 90 μοίρες δεν παρέχουν αξιόλογη διαφορά στην αύξηση της στρεπτικής αντοχής από ίνες διατεταγμένες μόνο σε γωνία 90 μοιρών. Τέλος αναφορικά με την πλαστικότητα όλοι οι δοκοί εμφανίζουν πλαστική συμπεριφορά (Σχήμα 32.8), με αυτές που έχουν σύστημα αγκύρωσης να εμφανίζουν λίγο μεγαλύτερες στροφές από τις υπόλοιπες.



Σχήμα 32.8: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για τις δοκούς TB2 έως TB6

#### 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω πειράματα η ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε στρέψη με την χρήση Ινοπλισμένων Πολυμερών επιτυγχάνεται και μάλιστα δίνοντας αύξηση αντοχής έως και 70%. Έτσι για την διαστασιολόγηση τέτοιων επεμβάσεων έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα υπολογισμού, ένα από τα οποία φαίνεται παρακάτω.

Αντίστοιχα με την συμβολή των σύνθετων υλικών στη διάτμηση υπολογίζεται η συμβολή τους σε στρέψη. Έτσι η πρόσθετη στρεπτική ροπή που αναλαμβάνουν τα FRP,  $T_{fd}$ , για

την περίπτωση καλά αγκυρομένων υφασμάτων ή ελασμάτων (είτε τυλιγμένα γύρω από τη δοκό είτε με το παραπάνω σύστημα αγκύρωσης) φαίνεται παρακάτω<sup>1.4</sup>:

$$T_{fd} = \frac{2A_o A_f E_f \varepsilon_{fde}}{s} (\cos a + \sin a)$$

Όπου:  $A_o$  είναι η επιφάνεια της δοκού που περικλείεται από τα σύνθετα υλικά,  $A_f$  η επιφάνεια των σύνθετων υλικών, με  $A_f = n w_f t_f$ ,  $n$  ο αριθμός των στρώσεων FRP,  $w_f$  το πλάτος τους και  $t_f$  πάχος κάθε στρώσης,  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών,  $a$  η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ινών και του διαμήκους άξονα της δοκού,  $s$  η απόσταση δύο διαδοχικών λωρίδων από FRP και  $\varepsilon_{fde}$  η ενεργή παραμόρφωση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών, με  $\varepsilon_{fde} = \varepsilon_{fmax} k / \gamma_a$  όπου  $k=0.8$  και  $\gamma_a=1.30$

Όπως και κατά την αστοχία λόγω τέμνουσας<sup>1.5</sup> έτσι και κατά την αστοχία λόγω στρέψης για τον υπολογισμό της  $\varepsilon_{fmax}$  χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μηχανισμοί αστοχίας:

#### 1.Θραύση των σύνθετων υλικών

Εμφανίζεται συνήθως σε κλειστούς μανδύες από υφάσματα ή ελάσματα που είναι επαρκώς αγκυρωμένοι. Σε αυτήν την περίπτωση η  $\varepsilon_{fmax}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon_{fmax} = \frac{f_{fd}}{E_f}, \quad f_{fd} \text{ η αντοχή σχεδιασμού των σύνθετων υλικών.}$$

#### 2.Αποκόλληση σύνθετων υλικών

Σε καλά αγκυρωμένους μανδύες η αποκόλληση των σύνθετων υλικών από το σκυρόδεμα μπορεί να προηγηθεί της θραύσης τους, Σε αυτήν την περίπτωση η  $\varepsilon_{fmax}$  μπορεί να υπολογισθεί από τις παρακάτω εξισώσεις<sup>1.6</sup>:

$$\varepsilon_{fmax} = 0.17 \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu}, \text{ για CFRP και}$$

$$\varepsilon_{fmax} = 0.048 \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu}, \text{ για GFRP.}$$

Με  $\varepsilon_{fu}$  την οριακή παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών και  $\rho_f$  το ποσοστό ενίσχυσης ίσο με:

$$\rho_f = 2t_f \sin a / b_w, \quad \text{για συνεχείς μανδύες}$$

$$\rho_f = (2t_f / b_w)(b_f / s), \quad \text{για μεμονωμένες λωρίδες}$$



Ακόμη  $b_f$  είναι το πλάτος κάθε λωρίδας και  $b_w$  το ελάχιστο πλάτος της διατομής της δοκού σε ύψος περίπου ίσο  $0.1d$  από την πάνω επιφάνειά της ( $d_f \approx 0.9d$  : Ύψος του μανδύα που διαπερνάται από ρωγμή).

### 3. Πρόωρη αστοχία λόγω μεγάλου ανοίγματος ρωγμών

Αντίστοιχα με την διατμητική αστοχία, μεγάλα ανοίγματα ρωγμών είναι πιθανό να μειώσουν την συνεισφορά του σκυροδέματος σε στρέψη ( $T_{rd1}$ ). Έτσι το μέλος μπορεί να αστοχήσει χωρίς να έχει προηγηθεί θραύση ή αποκόλληση των Ινοπλισμένων Πολυμερών. Έτσι η  $\epsilon_{fmax}$  πρέπει να περιορίζεται με μέγιστο το 0.4%.

Σε κάθε περίπτωση όμως θα πρέπει η αυξημένη στρεπτική αντοχή που προκύπτει για το μέλος να ελέγχεται έναντι της  $T_{rd1}$  (λοξή θλίψη του σκυροδέματος), η οποία είναι και η ανώτατη τιμή στρεπτικής αντοχής έπειτα από την οποία χρειάζεται αλλαγή διαστάσεων της διατομής της δοκού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να γίνει η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης μιας δοκού με FRP ως εξής: Αρχικά επιλέγεται το υλικό ( ύφασμα ή έλασμα , γυαλί ή άνθρακας) και ο τρόπος ενίσχυσης. Ακόμη επιλέγεται ο τρόπος διάταξης των ινών, ο αριθμός των στρώσεων και ο πιθανός τύπος αγκύρωσης. Έτσι από τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών, του σκυροδέματος και από το είδος της διατομής, με την βοήθεια των παραπάνω εξισώσεων, μπορεί να βρεθεί η πρόσθετη στρεπτική αντοχή που προσδίδουν στην διατομή τα νέα υλικά. Προσθέτοντας αυτήν με την αντοχή που προκύπτει από τους ήδη υπάρχοντες οπλισμούς μπορεί να υπολογισθεί η οριακή κατάσταση αστοχίας της δοκού αυτής.

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Όπως και στις άλλες περιπτώσεις ενίσχυσης με πρόσθετα υλικά και ειδικότερα σ' αυτές που χρησιμοποιείται ρητίνη είναι αναγκαίο η τοποθέτηση τους στην επιφάνεια στην οποία πρόκειται να επικολληθούν τα νέα υλικά να γίνεται προσεκτικά και σύμφωνα με τις οδηγίες του εκάστοτε κατασκευαστή των υλικών αυτών. Καθοριστικοί παράγοντες, ωστόσο, είναι η σωστή προετοιμασία της επιφάνειας στην οποία πρόκειται να επικολληθούν τα υλικά αυτά και η σωστή χρήση της ρητίνης.

Για την προετοιμασία της επιφάνειας ακολουθείται η παρακάτω μέθοδος<sup>1,1</sup>:

1. Λείανση και καθαρισμός της επιφάνειας σκυροδέματος που θα έρθει σε επαφή με τα σύνθετα υλικά.
2. Λείανση των γωνιών της διατομής της δοκού για καλύτερη λειτουργία των σύνθετων υλικών.
3. Διαβροχή της επιφάνειας με νερό υψηλής πίεσης και στέγνωμα.
4. Καθαρισμός της επιφάνειας από τυχόν σκόνες.

Ακόμη για την χρήση ρητίνης σύμφωνα με το είδος της και τις οδηγίες του κατασκευαστή σημαντικό είναι κατά την τοποθέτηση να είναι γνωστά ο χρόνος εργασιμότητας και ο χρόνος εφαρμογής της ( ενδεικτικά 90 λεπτά στους  $15^\circ$  και 30 λεπτά στους  $35^\circ$  ), ο τρόπος ανάμειξης των συστατικών της και η πιθανότητα χρήσης primer για καλύτερα αποτελέσματα.

Επίσης κατά την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών πρέπει να ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Η επιφάνεια να είναι καθαρή και στεγνή.
2. Η επιφάνεια εμποτίζεται με στρώση ρητίνης 1-2 mm. Στην κεντρική περιοχή η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερα πάχος. Έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση του ελάσματος ή υφάσματος να μην σχηματιστούν φυσαλίδες.
3. Τοποθετείται το έλασμα και πιέζεται ελαφρώς στην μεσαία περιοχή, μέχρι η κόλλα να κατανεμηθεί περίπου ομοιόμορφα.
4. Τέλος το έλασμα κρατιέται συμπιεσμένο στην επιφάνεια με κατάλληλη διάταξη για 24 ώρες.
5. Για περισσότερες στρώσεις σύνθετων υλικών ακολουθείται η ίδια διαδικασία.

Τέλος στην περίπτωση που σε συνδυασμό με την χρήση των Ινοπλισμένων Πολυμερών για την ενίσχυση χρησιμοποιηθούν και χαλύβδινα στοιχεία (π.χ. αγκύρια και ελάσματα) τότε είναι σκόπιμο αυτά να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, για να αποφεύγεται η γαλβανική διάβρωση του χάλυβα λόγω επαφής του με τα σύνθετα υλικά. Εξάλλου σε τέτοια σημεία τα χαλύβδινα στοιχεία είναι περισσότερο εκτεθειμένα στις περιβαλλοντικές επιδράσεις.

## 6.ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η ενίσχυση σε στρέψη με Ινοπλισμένα Πολυμερή επιτυγχάνεται με αρκετή ταχύτητα και ευκολία. Η αύξηση της αντοχής που μπορεί να επιτευχθεί όπως φαίνεται από τα παραπάνω πειράματα είναι αρκετά ικανοποιητική. Έτσι όχι μόνο η αυξημένη αντοχή αλλά και η δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών λύσεων κάνουν την μέθοδο αυτή αρκετά ευέλικτη.

## 7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 32.1. Δρίτσος, Σ., Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εκδ. Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004
- 32.2. Ghobarah, A., Ghorbel, M., and Chidiac, S., Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Using Fiber-Reinforced Polymers, ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 6, No. 4, November 1, 2002, pp 257-263.
- 32.3. Matthys, S., and Triantafillou, T., Shear and Torsional Strengthening with Externally Bonded FRP Reinforcement, Proceeding of the International Workshop, Capri July 20-21, 2001, pp 203-212.
- 32.4. Salom, P., Gergely, J., Young, D., Torsional Strengthening of Spandrel Beams with Fiber-Reinforced Polymer Laminates, ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 8, No. 2, April 1, 2004, pp 157-162.
- 32.5. Τριανταφύλλου, Αθ., Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά ( Ινοπλισμένα Πολυμερή ), Πάτρα 2003.
- 32.6. Triantafillou, T., Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures, *fib*, July 2001.
- 32.7. Φαρδής, Μ., Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέρος II, Εκδ. Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2003.