

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

ΛΥΓΝΟΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ
ΜΠΟΥΚΗ ΙΣΙΔΩΡΑ

Περίληψη

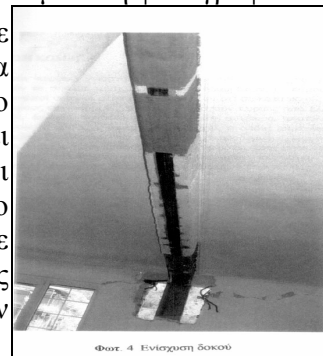
Η εργασία αυτή έχει στόχο να επισημάνει ορισμένα σημαντικά σημεία για την ενίσχυση δοκών με ινοπλισμένα πολυμερή. Παρακάτω γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής συγκριτικά με την επικόλληση μεταλλικών ελασμάτων, έτσι ώστε να κατανοήσει ο αναγνώστης την αναγκαιότητα που υπήρχε για εύρεση μιας καινούριας μεθόδου ενίσχυσης και τα προτερήματά της. Επιπλέον, για να έχει το κείμενο μια ολοκληρωμένη μορφή, γίνεται μια μικρή αναφορά και στις μηχανικές ιδιότητες των FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS). Η εργασία δεν αναφέρεται εκτενώς σε υπολογισμούς διαστασιολόγησης για αποφυγή επανάληψης του βιβλίου. Έμφαση δίνεται στον μηχανισμό και τους τρόπους αστοχίας, την αποτελεσματικότητα των ινοπλισμένων πολυμερών συγκριτικά με κάποιους παράγοντες που την επηρραάζουν καθώς και σε ορισμένα παραδείγματα διαστασιολόγησής δοκών με FRP.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, αλλά και όσο περνάει ο καιρός, γίνεται μεγαλύτερη η ανάγκη για επισκευή, λόγω σεισμών, αλλά και ενίσχυση κατασκευών εξαιτίας της μεγάλης ηλικίας αυτών. Η διάβρωση του οπλισμού ή η αλλαγή χρήσης της κατασκευής, που έχει ως πιθανή συνέπεια την αύξηση του κινητού φορτίου, είναι άλλοι δύο σημαντικοί λόγοι που οδήγησαν στην εύρεση τρόπων και υλικών για την αντιμετώπιση των θεμάτων της ενίσχυσης ή επισκευής.

Τα προβλήματα αυτά, μεταξύ πολλών, μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών που αποτελούνται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδής σε εποξειδική, βινυλεστερική ή πολυεστερική ρητίνη. Το σύνολο του νέου αυτού υλικού ονομάζεται σύνθετο υλικό για προφανείς λόγους. Μάλιστα τα FRP αποτελούνται συνήθως από συνεχείς ίνες άνθρακα ή γυαλιού και σπανιότερα αραμιδίου. Οι ίνες τίθενται σε μία ή και σε δύο διευθύνσεις ανάλογα με την ενίσχυση που θέλουμε να κάνουμε. Στη φωτογραφία που

ακολουθεί φαίνεται μια δοκός η οποία έχει ενισχυθεί με ινοπλισμένα πολυμερή. Πρέπει τέλος να αναφερθεί πως τα υλικά αυτά έχουν δοκιμαστεί (σίγουρα όμως όσο περνάει ο καιρός θα γίνονται πιο γνωστά και προσιτά στον άνθρωπο) και έχουν κριθεί σαν μια αποτελεσματική μέθοδος (πρόσφατοι σεισμοί Ιαπωνία-Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής), υπό τον όρο ότι θα επιλέγεται από τον μελετητή να γίνεται ενίσχυση σε συνδιασμό και με άλλες μεθόδους και μετά από μελέτη της συμπεριφοράς όλου του δομήματος και όχι μεμονωμένων στοιχείων και μελών [9].



2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (ΡΗΤΙΝΩΝ-ΙΝΩΝ)

ΜΗΤΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Το μητρικό υλικό που χρησιμοποιείται στην επικόλληση των συνθέτων υλικών είναι συνήθως θερμοσκληρηνώμενο, ανήκει δηλαδή στην κατηγορία των πολυμερών των οποίων οι ιδιότητες δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν κόλλα λοιπόν, για αυτή τη χρήση χαρακτηρίζονται από πυκνότητα 1100-1500 kg/m³, μέτρο ελαστικότητας 2-6 Gpa, λόγο Poisson περίπου ίσο με 0,4, εφελκυστική αντοχή 100 έως 250 Mpa, παραμόρφωση θραύσης 1-6% και συντελεστή θερμικής διαστολής 60-200x10⁻⁶/°C [1]. Ο πίνακας 1 που ακολουθεί περιγράφει την ανθεκτικότητα συστατικών FRP, του μητρικού υλικού [2].

ΡΗΤΙΝΕΣ

	Πολυεστερική	Βινυλεστερική	Εποξειδική
Απορρόφηση (%/24 ώρες)	0, 15-0, 6	0, 1-0, 2	0, 1
Ασθενή Οξειδία	ΠΜ	Α	Α
Ισχυρά Οξειδία	Π	Α	ΠΜ
Ασθενή Αλκαλικά	Π	Α	Α
Ισχυρά Αλκαλικά	Π	ΠΜ	Α
Οργανικοί Διαλύτες	ΠΜ	Α	Α

Πίνακας 1: Ανθεκτικότητα ρητινών σε διάφορες επιδράσεις.

Όπου: Α :Ανθεκτικά,
 ΠΜ : προσβάλλονται μετρίως,
 Π : προσβάλλονται,

ΙΝΕΣ - ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ

Τα νέα αυτά, σχετικά, σύνθετα υλικά έχουν πολύ μεγάλη αντοχή (κυρίως εφελκυστική), πολύ μικρό βάρος προς αντοχή, ίσο με το ένα τέταρτο του βάρους του χάλυβα και αρκετά καλή ανθεκτικότητα σε κάποιες δυσμενείς χημικές επιδράσεις. Παρόλα αυτά τα σύνθετα υλικά είναι πολλές φορές ευάλωτα σε περιβαλλοντικές επιδράσεις όπως για παράδειγμα η υγρασία, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η υπεριώδης ακτινοβολία.. Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι πιο ανθεκτικά στις παραπάνω επιδράσεις, δηλαδή δεν επηρεάζονται από την υγρασία, από διαλυτικά υγρά, βάσεις και μπορούν να ανταπεξέλθουν σε απευθείας επαφή με το σκυρόδεμα [3]. Επιπλέον δυσμενή επίδραση έχουν τα αλκάλια και η υπεριώδης ακτινοβολία στα υλικά με ίνες γυαλιού και αραμιδής αντίστοιχα [1]. Ο πίνακας που ακολουθεί (πίνακας 2) δίνει τις τιμές της πυκνότητας, του μέτρου ελαστικότητας, του λόγου Poisson, της εφελκυστικής αντοχής, και της παραμόρφωσης θραύσης των τριών προαναφερθέντων υλικών καθώς και του χάλυβα για σχετική σύγκριση.

	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m ³ *1000)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑ- ΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΛΟΓΟΣ POISSON	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (%)
ΙΝΕΣ					

ΧΑΛΥΒΑΣ	7, 86	200	0, 28	700-2000	3, 5
ΓΥΑΛΙ	2, 54	72-75	0, 25	3500	4, 8
ΑΡΑΜΙΔΗΣ	1, 44	70	0, 32	2900	4
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	1, 9	380	0, 35	1800	1, 2

Πίνακας 2 : Ιδιότητες των ινών

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά σαφώς υπερτερούν σε κάποια σημεία, αλλά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα σε σχέση με τους πιο κλασικούς τρόπους ενίσχυσης και επισκευής. Ξεκινώντας με πλεονεκτήματα, το μικρό τους βάρος και η μεγάλη εφελκυστική αντοχή είναι πιθανότατα τα πιο σημαντικά 'ατού' τους έναντι των μεταλλικών ελασμάτων. Είναι πιο εύκαμπτα (έκτος από το CFRP) και έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν «πλατώ» διαρροής. Η έλλειψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μια ψαθυρή αστοχία, η οποία δεν είναι επιθυμητή ή αποδεκτή σχεδιαστικά. [4]. Η ανυπαρξία της ταχύτατης ηλεκτροχημικής διάβρωσης των πολυμερικών ελασμάτων σε σύγκριση με τα μεταλλικά είναι αυτή που οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον κατασκευαστικό τομέα, παρ' όλα αυτά η έκθεση τους στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει κάποιες μηχανικές τους ιδιότητες, λόγω του αλκαλικού περιβάλλοντος ή της υπερϊώδους ακτινοβολίας όπως προαναφέρθηκε. Τα frp εκτός από την διάθεσή τους σε σχετικά δύσκαμπτες λωρίδες (πάχους της τάξης του 1 mm) υπάρχουν και εύκαμπτα 'υφάσματα' (πάχους της τάξης του 0, 1-0, 4 mm) τα οποία μπορούν να έρθουν σε πλήρη επαφή με το υπό ενίσχυση μέλος και να "πάρουν" όχι μόνο τα ήδη υπάρχοντα βέλη κάμψης τους αλλά και να αποκτήσουν μία καλή συνάφεια κάτι πολύ σημαντικό και ουσιώδες για την επιτυχία της ενίσχυσης ή επισκευής. Ένα άλλο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι η μεγάλη ευκολία, ευελιξία και ταχύτητα εφαρμογής με την οποία επιτυγχάνεται η τεχνική ενίσχυσης, η οποία συνίσταται στην μέσω ρητινών επικόλληση των σύνθετων υλικών στις εξωτερικές επιφάνειες των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων. Έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας της διατομής χωρίς να μεταβάλλεται ουσιαστικά η γεωμετρία της. Στα θετικά πρέπει να συμπεριλάβουμε και το ότι υφίστανται αξιόπιστα προσομοιώματα σχεδιασμού και ένταξη στο σύστημα των ισχύοντων κανονισμών (Μάλιστα το S&P Lamela είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης H/Y για πλάκες και δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος που πρέπει να ενισχυθούν με ελάσματα frp). Ένα μειονέκτημα που πρέπει να τονιστεί για τα σύνθετα υλικά είναι το υψηλό κόστος, το οποίο όμως μειώνεται, όσο η ζήτηση του υλικού αυξάνεται και η παραγωγή μεγαλώνει. Συνυπολογίζοντας και τα εργατικά, τα οποία στην περίπτωση των μεταλλικών ελασμάτων είναι προφανώς μεγαλύτερα, βλέπουμε ότι το κόστος της ενίσχυσης με FRP συγκριτικά και με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η λύση είναι αποδεκτό. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η μικρή εμπειρία για το υλικό και για τις κατασκευαστικές εφαρμογές της πράξης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι έντονες ερπυστικές παραμορφώσεις αποτελούν ένα ακόμα αρνητικό της μεθόδου.

4. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ

Μία ενισχυμένη ή επισκευασμένη δοκός μπορεί να αστοχήσει σύμφωνα με αρκετούς διαφορετικούς μηχανισμούς. Έτσι λοιπόν Α)αν το ποσοστό του υπάρχοντος οπλισμού είναι σχετικά μικρό, η αστοχία θα οφείλεται σε θραύση του ινοπλισμένου πολυμερούς, της οποίας έχει ήδη προηγηθεί διαρροή σε χάλυβα. Β)αν το ποσοστό του υπάρχοντος οπλισμού είναι σχετικά υψηλό, η αστοχία θα οφείλεται σε θράση του σκυροδέματος ενώ ο χάλυβας μπορεί να έχει διαρρεύσει ή όχι, ανάλογα με το ποσοστό του. Γ)η διαστασιολόγηση των εξωτερικών

οπλισμών πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να ενεργοποιείται ο μηχανισμός της αστοχίας σύμφωνα με τον οποίο αστοχεί πρώτα ο χάλυβας και κατόπιν θραύεται το σκυροδέμα, χωρίς να αστοχεί το σύνθετο φύλλο. (Από πειράματα που έγιναν από τους Malvar, Warren και Inaba αποδείχτηκε ότι μια σωστή διαστασιολόγηση της διατομής οδηγεί σε αύξηση της αντοχής κατά 90% και παρουσιάζει τον παραπάνω τρόπο αστοχίας, με τη διαφορά ότι τελικά θραύεται ο διαμήκης εξωτερικός οπλισμός.) . Εδώ θα πρέπει να προστεθούν και Δ)οι αστοχίες της ενίσχυσης λόγω κακής συνάφειας σκυροδέματος-FRP. Διακρίνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις: α)διάδοση οριζοντίων ρωγμών στη διεπιφάνεια μεταξύ του σκυροδέματος και του ινοπλισμένου πολυμερούς β)Αποκόλληση του ινοπλισμένου πολυμερούς λόγω του κατακορύφου και του οριζοντίου ανοίγματος ενδεχομένων λοξών ρωγμών γ)διατμητική αστοχία της στρώσης του σκυροδέματος μεταξύ του οπλισμού ενίσχυσης και του υπάρχοντος διαμήκους οπλισμού, στην περιοχή αγκύρωσης του συνθέτου υλικού [1]. Το ενισχυμένο δοκάρι πρέπει να συμπεριφέρεται διαρκώς σαν σύνθετο υλικό, μέχρι την αστοχία του. Αυτή η συμπεριφορά εξαρτάται αρχικά από την ικανότητα και την δραστηριότητα της κόλλας να μεταφέρει τάσεις και αυτό με τη σειρά του εξαρτάται από την σύνδεση μεταξύ κόλλας - σκυροδέματος και κόλλας - ελάσματος και στις διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας, όπως επίσης στην δυσκαμψία και στην ρευστότητα της κόλλας. Αδυναμίες και ανεπάρκειες σε κάποια από τα χαρακτηριστικά αυτών των ιδιοτήτων μπορεί να θεωρηθεί επιζήμιο στην συμπεριφορά του συνθέτου στοιχείου [4].

Οι παράγοντες που κυριαρχούν στο σχεδιασμό με μεταλλικά ή μη μεταλλικά ελάσματα είναι :

- 1) πάχος του ελάσματος
- 2) αγκύρωση του ελάσματος
- 3) αντοχή του ελάσματος
- 4) σχεδιασμός σε πλαστιμότητα
- 5) διατμητική αντοχή

ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ

Ο στόχος της παρακάτω μελέτης ήταν να διαπιστωθούν οι μηχανισμοί αστοχίας του σκυροδέματος, των οποίων η συμπεριφορά μπορούσε να επηρεαστεί από την παρουσία των εξωτερικών οπλισμών ενίσχυσης. Για της ανάγκες της παραπάνω μελέτης έγιναν πειράματα κάμψης σε μεσαίου μεγέθους δοκούς με επικολλητά ελάσματα από AFRP και GFRP από τους ARDUINI, DI TOMMASO, MANFRONI. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα με στόχο να εξασφαλιστούν οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, της κόλλας και των συνθέτων ελασμάτων. Τελικά η χρήση διδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, θα προσδιορίσει την πιθανότητα να εκφραστεί η μηχανική συμπεριφορά των δοκών με επικολλητά ελάσματα από ένα μοντέλο με μη γραμμική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία .

Ο πίνακας 3 που ακολουθεί δείχνει τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

Τύπος σκυρ.	Είδος κόλλας	FRP	Μέγεθοςδοκού (mm)	Μέγεθος ε-λάσματος(mm)	Ονομασία	Αρ.πείρ. κάμψης	Αρ.πείρ. διάτμησης
SFRC	-	-	600*100*100	-	UNPL	3	-
SFRC	S31	GFRP	500*150*150	400*100*5	G1	2	-
SFRC	S32	GFRP	500*150*150	400*100*2,5	G2	2	-
SFRC	S33	GFRP	600*100*100	L500*50*2,8	GP	3	-

SFRC	S34	AFRP	600*100*101	500*63*2	A	3	3
SFRC	S35	AFRP	600*100*102	500*63*3	A+S	3	-

Πίνακας 3: Δείγματα πειράματος

SFRC: ινοπλισμένο σκυρόδεμα με κεκαμμένες ίνες χάλυβα (0,8*50 mm)

AFRP: ενιαίο σύνθετο υλικό με 50% κατ' όγκο ίνες αραμιίδης σε εποξειδική ρητίνη.

GFRP: ενιαίο σύνθετο υλικό με 60% κατ' όγκο ίνες γυαλιού σε εποξειδική ρητίνη.

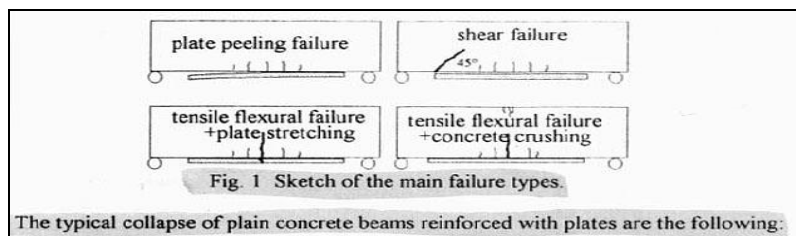
Οι τυπικοί μηχανισμοί αστοχίας επιπέδων δοκών σκυροδέματος ενισχυμένων με ελάσματα (όπως φαίνεται και απ' το πείραμα) είναι οι ακόλουθοι και διακρίνονται στο σχήμα 1:

α) αποκόλληση του ελάσματος κοντά στο άκρο του.

β) διατμητικές ρωγμές στο σκυρόδεμα, μεταξύ του FRP και των ήδη υπάρχοντων οπλισμών, που ξεκινούν από τα άκρα των ελασμάτων.

γ) καμπτικές εφελκυστικές ρωγμές στο σκυρόδεμα με θραύση και του επικολλητού ελάσματος.

δ) καμπτικές εφελκυστικές ρωγμές στο σκυρόδεμα μαζί με ταυτόχρονη θραύση του στη θλιβόμενη ζώνη.



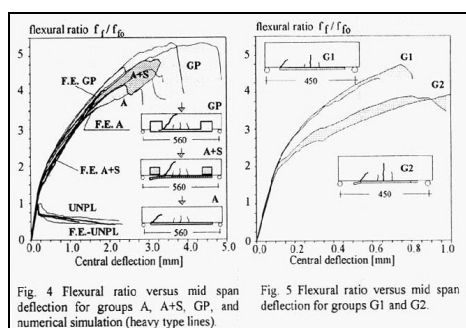
Σχήμα 1: Μηχανισμοί αστοχίας

Οι παραπάνω τρόποι αστοχίας συμπίπτουν με κάποιους που προαναφέρθηκαν από το βιβλίο του κ. Τριανταφύλλου.

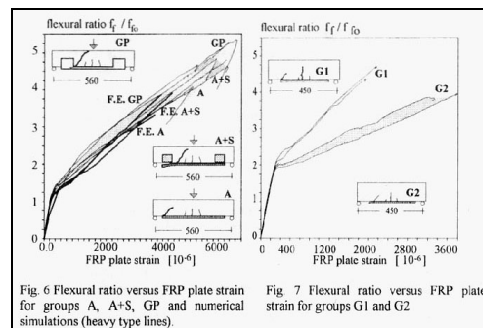
Η επικόλληση των ελασμάτων στην φορτιζόμενη επιφάνεια των δειγμάτων σκυροδέματος ορίζει κυρίως το μηχανισμό θραύσης του ίδιου του σκυροδέματος, που εξαρτάται από το σχήμα του ελάσματος και το πάχος του, τον τύπο του υλικού, την διεπιφάνεια επικόλλησης και τις ιδιότητες φόρτισης του σκυροδέματος. Οι δύο πρώτοι μηχανισμοί κατάρρευσης πρέπει να αποφεύγονται καθώς η αποκόλληση του ελάσματος και η διατμητική αστοχία υποδηλώνουν έναν ψαθυρό τρόπο αστοχίας. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η κ. Βιντζηλαίου. Όπως επισημαίνει οποιαδήποτε προσπάθεια ενίσχυσης και επισκευής δοκού, υποοπλισμένης σε τέμνουσα, θα πρέπει να αποσκοπεί στην όπλιση με σύνθετα υλικά ώστε να μεταβάλλουμε το τρόπο αστοχίας από διάτμητικό σε κάμπτικό. Πρέπει εδώ να επισημανθεί βέβαια όπως ήδη τονίστηκε, ότι η διαστασιολόγηση των εξωτερικών οπλισμών πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να διαρρέει πρώτα ο χάλυβας και κατόπιν να θραύεται το σκυρόδεμα, χωρίς να αστοχεί το σύνθετο φύλλο. Για να περιορίσουμε τα αποτελέσματα τις διατμητικής αστοχίας προτείνεται η βελτίωση της αγκύρωσης των σύνθετων υλικών με μηχανικούς τρόπους όπως π. χ με εξωτερική περίσφιξη των άκρων των φύλλων μέσω κατακόρυφου εξωτερικού οπλισμού. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται, ένα μέρος της τέμνουσας να παραλαμβάνεται από αυτά τα ελάσματα, που βελτιώνουν την πλάστιμη συμπεριφορά του δείγματος σε ένα βαθμό που σχετίζεται με την αντοχή τους. Για την ακρίβεια όταν τα πλευρικά ελάσματα είναι πλήρως συνδεδεμένα με αυτά στην κάτω επιφάνεια της δοκού, μπορεί να παραληφθεί μεγαλύτερο φορτίο και η καμπτική αστοχία να εκδηλωθεί με ένα μεγάλο εύρος ρωγμών γύρω από το μέσο άνοιγμα της δοκού, το οποίο γενικά μας εξασφαλίζει μια πιό πλάστιμη συμπεριφορά.

Ένας σωστός σχεδιασμός πρέπει να λάβει υπ' όψη του, όχι μόνο το τελικό όριο αντοχής της κατασκευής αλλά και την πλάσσιμη συμπεριφορά, η οποία εξασφαλίζει μια ανακατανομή τάσεων σε όλα τα μέλη του φορέα στη περίπτωση σεισμικής διέγερσης. Τα πειράματα έχουν σα στόχο να αυξήσουν τις γνώσεις μας στα παραπάνω θέματα. Μετά από προσαρμογή του μοντέλου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία σε ένα πείραμα κάμψης με δοκό, το μοντέλο αυτό αποδείχτηκε ότι μπορεί να αποτελέσει εξιδανίκευμα της συμπεριφοράς μιας δοκού με επικολητό έλασμα όταν μερικά στοιχεία 'επικοληθούν' καταλλήλως σε αυτό. Το επόμενο βήμα ήταν το μοντέλο αυτό να χρησιμοποιηθεί μόνο του για να επιτευχθεί μιά πιό ικανοποιητική συμπεριφορά της κατασκευής, λαμβάνοντας υπ' όψη τον τύπο του υλικού, το πάχος του ελάσματος, το σχήμα και τις θέσεις στις οποίες έχει επικοληθεί.

Τα αποτελέσματα των θεωρητικών και πειραματικών υπολογισμών φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Στα 1 και 2 σχεδιάστηκε ο καμπτικός λόγος, σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος της δοκού και στα 3 και 4 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση στο μέσο του ανοίγματος του ελάσματος. Με σύγκριση των διαγραμμάτων 1 και 2 διακρίνει κανείς την αύξηση της ονομαστικής αντοχής των δοκών που έχουν ενισχυθεί με επικολητά ελάσματα. Μετά από μια αρχικά γραμμική και ελαστική συμπεριφορά, κοινή για όλους τους τύπους των πειραμάτων, αναπτύσσεται μιά ζώνη θραύσης στην εφελκόμενη επιφάνεια του σκυροδέματος, με μια προφανή αλλαγή της κλίσης στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης. Η αστοχία εμφανίζεται μετά από γενική μείωση της δυσκαμψίας των δοκών, η οποία είναι πιο έντονη αν το πάχος του ελάσματος είναι αρκετά λεπτό και υπάρχει ενίσχυση πλευρικά για τέμνουσα.



Διαγράμματα 1 και 2



Διαγράμματα 3 και 4

Σε όλα τα πειράματα παρουσιάστηκε καμπτική θραύση στο σκυρόδεμα, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, και η τελική θραύση εμφανίστηκε με έναν από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- διατμητική ρωγή στο σκυρόδεμα, που ξεκινά από το άκρο του ελάσματος σε διεύθυνση περίπου 45 μοιρών. (ομάδες A και G1)
- αποκόλληση των ελασμάτων στα άκρα που συνοδεύεται με διατμητική ρωγή στο σκυρόδεμα σε γωνία 45 μοιρών στην περιοχή αποκόλλησης. (ομάδες A+S)
- αποκόλληση των ελεύθερων γωνιών του ελάσματος. (ομάδες G2)
- διαχωρισμός των ελασμάτων που ακολουθείται από ψαθυρή διατμητική ρωγή του σκυροδέματος. (ομάδες GP)

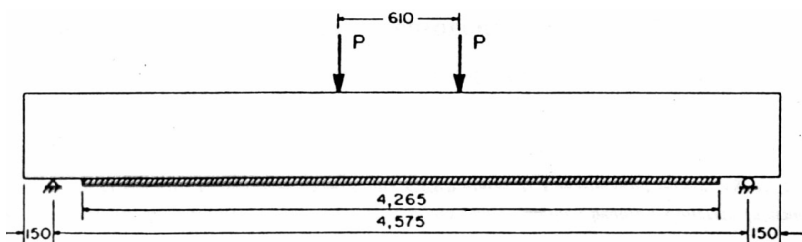
Συμπεράσματα :

Η χρήση των FRP, ως επικολητά ελάσματα, στην εφελκόμενη επιφάνεια των δοκών, αποδείχτηκε ένας ισχυρός και εύκολος τρόπος ενίσχυσης σε σύγκριση με τον παραδοσιακό τρόπο επικόλλησης μεταλλικών ελασμάτων. Γενικά η επικόλληση ελασμάτων αυξάνει την αντοχή των δοκών, αλλά μια κατάλληλη επιλογή τους με προσεκτική επιλογή του μεγέθους τους, του τύπου του ελάσματος και της κόλλας, της ενίσχυσης σε τέμνουσα και της

προετοιμασίας των επιφανειών μπορεί να καθορίσει την συμπεριφορά του δοκιμίου. Έχει παρατηρηθεί ότι ένα παχύτερο έλασμα μπορεί να οδηγήσει σε ένα φαινόμενο αποκόλλησης στα άκρα των ελασμάτων, το οποίο μπορεί να μειωθεί με επικόλληση μερικών πλευρικών ελασμάτων στις κατακόρυφες γωνίες των δοκών (σαν εξωτερικά τσέρκια), ή καλύτερα αν μερικά στοιχεία σχήματος L έρχονται απευθείας σε επαφή με αυτές τις επιφάνειες. Στην τελευταία περίπτωση ένα μεγάλο ποσοστό της πλαστιμότητας μπορεί να εκδηλωθεί μέχρι την πλήρη θράυση των διατμητικών ενισχύσεων, και μετά ξεκινά μια διαγώνια ρωγμή από τα άκρα των ελασμάτων οδηγώντας σε μια ψαθυρή αστοχία. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι ο τύπος των ινών που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από την ιδιομορφία της εφαρμογής και πρέπει να είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ του κόστους και της ανάγκης της κατασκευής [5].

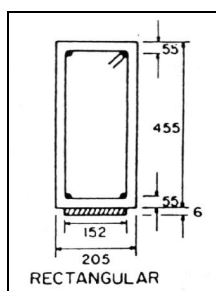
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΞΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ FRP ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Στο παρακάτω πείραμα παρουσιάζονται πέντε δοκοί ορθογωνικής διατομής (Α-Ε) και μια δοκός διατομής T (δοκός F). Γίνεται σύγκριση της αύξησης της αντοχής σε σχέση με τον προυπάρχον σπλισμό. Οι δοκοί έχουν μήκος 4,575 m, πλάτος 0,205 m και ύψος 0,565 m για την ορθογωνική δοκό και 0,455 m (μαζί με το πάχος της πλάκας) για την δοκό με διατομή T. Τέλος το συνεργαζόμενο πλάτος της τελευταίας δοκού είναι 0,61 m. Τα στοιχεία έχουν ενισχυθεί με ελάσματα ινών γυαλιού, πλάτους 152 mm, πάχους 6 mm και μήκους 4,26 m. Μάλιστα πριν από την τοποθέτηση του σύνθετου υλικού έγινε εφαρμογή αμμοβολής στην εφελκόμενη περιοχή των δοκών. Η φόρτιση ασκείται ισότιμα σε δύο σημεία

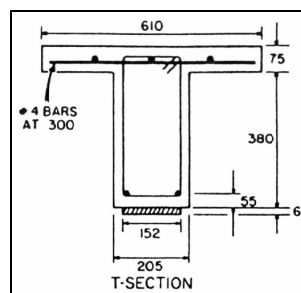


γύρω από το μέσο των ενισχυμένων δοκών με απόσταση του ενός από το άλλο 610 mm. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία των δοκών φαίνονται στα σχήματα (σχ2,3,4).

Σχήμα 2 : Αμφιέρριστη ενισχυμένη δοκός, φορτιζόμενη με δύο ομοιόμορφα και ίσα φορτία.



Σχήμα 3 : Τομή ορθογωνικής δοκού



Σχήμα 4 : Τομή δοκού διατομής T

Το γραμμοσκιασμένο ορθογωνικό τμήμα στο εφελκόμενο πέλμα των δοκών που φαίνεται καθαρά και στα δύο άνω σχήματα είναι το σύνθετο υλικό ενίσχυσης. Το συγκεκριμένο πείραμα εκπονήθηκε από τους Saadatmanesh H. & Ehsani M. R. με τον εξή τιτλο. 'Fiber composite plates can strengthen beams'. Χαρακτηριστική σημείωση για το

πείραμα είναι ότι δεν αναφέρεται ούτε σχεδιάζεται στα σχήματα κανένας ιδιαίτερος τρόπος αγκύρωσης των σύνθετων υλικών στα άκρα τους, αποτελώντας ένα σημείο που καταπονεί πολύ το ίδιο το υλικό. Η ονομαστική τιμή παραμόρφωσης της αστοχίας σύνθετου υλικού είναι 0,011. Τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού είναι : $f_t = 400 \text{ Mpa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E=37, 23 \text{ Gpa}$. Επίσης οι πέντε δοκοί διαφέρουν στο ποσοστό και τρόπο οπλισμού, και προφανώς στον τελικό τρόπο αστοχίας, βέλος κάμψης και φορτίο αστοχίας, όλα αυτά όμως παρουσιάζονται στον πίνακα 4 . Χαρακτηριστικό είναι μάλιστα πως η δοκός A είναι υποοπλισμένη έναντι τέμνουσας ενώ οι δοκοί B - F είναι ελαφρώς υπεροπλισμένες έναντι τέμνουσας.

Δοκός	Εφελκ. Οπλισμός	Θλιβόμ. Οπλισμός	Πλήθος συνδετήρων	Μέγιστο φορτίο (KN)	Βέλος κάμψης (mm)	Παραμόρφ. Ελάσματος (mm)	Τρόπος αστοχίας
A	3Φ25	2Φ13	14Φ9, 5/33	324	37, 5	0, 004	Σύνθλιψη σκυροδέματος
B	2Φ25	2Φ13	34Φ9, 5/15	259	44, 1	0, 0052	Αποκόλληση ελάσματος
C	2Φ13	2Φ13	34Φ9, 5/15	186	47, 3	0, 0078	Διατμ. αστοχία επικάλ. σκυρ/τος
D	2Φ25	2Φ13	34Φ9, 5/15	269	32, 5	0, 005	Διατμ. αστοχία επικάλ. σκυρ/τος
E	-	2Φ13	34Φ9, 5/15	63	20, 4	0, 003	Πρόωρη αστοχία από κάμψη
F	2Φ25	3Φ13	34Φ9, 5/15	302	37	0, 0075	Αποκόλληση ελάσματος

Πίνακας 4: Οι οπλισμοί των δοκών, το μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο & βέλος κάμψης καθώς και ο τρόπος αστοχίας.

Τα συμπεράσματα αυτού του πειράματος είναι :Αύξηση της καμπτικής αντοχής παρουσιάστηκε κυρίως στις περιπτώσεις με το μικρότερο ποσοστό διαμήκους οπλισμού. Κατά την διεξαγωγή του πειράματος μάλιστα σημειώθηκε μείωση του ανοίγματος των ρωγμών καθώς και της πλαστιμότητας. Η συνήθης θεωρία της κάμψης επιτρέπει τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του ενισχυμένου στοιχείου, εκτός από τις περιπτώσεις πρόωρης αστοχίας [6].

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ

Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης δοκού με f_{tr} σε τέμνουσα είναι αμφισβητούμενη, καθώς τα πειράματα που έχουν γίνει είναι πολύ λίγα και ορισμένες φορές τα συμπεράσματα αντιφατικά. Με στόχο την αύξηση των πειραματικών δεδομένων ο κ. Τριανταφύλλου εκπόνησε την παρακάτω μελέτη [7]. Το πειραματικό μέρος αυτής της μελέτης περιλαμβάνει δοκιμή αντοχής σε τέμνουσα σε έντεκα δόκους με διαφορετικά ποσοστά ενίσχυσης με c_{ftr} . Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης εξαρτάται από τον μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Το αν θα εμφανιστεί αποκόλληση ή θραύση κρίνεται από τις συνθήκες επικόλλησης, το μήκος αγκύρωσης, τον τύπο της σύνδεσης στα άκρα των f_{tr} και το πάχος των ελασμάτων. Η συμμετοχή του f_{tr} στην αντοχή σε τέμνουσα δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$V_{f_{frp},d} = 0,9 \cdot \rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}} \cdot \varepsilon_{f_{frp},e} \cdot b_w \cdot d \cdot (1 + \cot\beta) \cdot \sin\beta / \gamma_{f_{frp}}$ όπου :

$\rho_{f_{frp}}$: γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης

$E_{f_{frp}}$: μέτρο ελαστικότητας συνθέτου υλικού

$\varepsilon_{f_{frp},e}$: ενεργή παραμόρφωση

b_w, d : πλάτος και στατικό ύψος της διατομής

β : γωνία μεταξύ διεύθυνσης ινών και άξονα στοιχείου

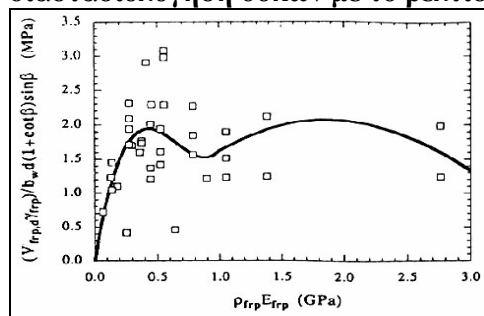
$\gamma_{f_{frp}}$: μερικός συντελεστής ασφάλειας του ffrp σε μονοαξονικό εφεκυσμό (1, 15 για CFRP, 1, 20 για AFRP, 1, 25 για GFRP).

Όλα είναι δεδομένα εκτός από την ενεργή παραμόρφωση, η οποία υπολογίζεται πειραματικά. Ποιοτικά μπορεί να πει κανείς ότι εξαρτάται απ' την περιοχή αποκόλλησης του ελάσματος ή με άλλα λόγια το ενεργό μήκος του ελάσματος, το οποίο ορίζεται σαν το απαραίτητο για να φτάσει το ffrp στην εφελκυστική θραύση πριν την αποκόλληση. Επιπλέον, το ενεργό μήκος του ελάσματος εξαρτάται (σχεδόν αναλογικά) από την αξονική δυσκαμψία, που εκφράζεται από το γινόμενο των $\rho_{f_{frp}}, E_{f_{frp}}$. Καθένας θα περίμενε η ενεργή παραμόρφωση να είναι αντιστρόφως ανάλογη του $\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}$. Οντως αποδεικνύεται ότι όσο το έλασμα γίνεται περισσότερο δύσκαμπτο και παχύτερο, η αποκόλληση υπερισχύει της εφελκυστικής αστοχίας και η ενεργή παραμόρφωση του ελάσματος μειώνεται. Επιπλέον, η ενεργή παραμόρφωση εξαρτάται από το αν είναι το ffrp τυλιγμένο ή όχι γύρω από την διατομή. Τα αποτελέσματα του πειράματος χρησιμοποιούνται παρακάτω για να προσδιοριστεί η εξάρτηση της ενεργής παραμόρφωσης από το $\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}$. Επίσης η αντοχή των δοκών αυξήθηκε κατά ένα ποσοστό 65-95 %. Οι εκφράσεις που προσαρμόζονται καλύτερα στη σχέση μεταξύ των $\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}$ και $\varepsilon_{f_{frp},e}$ είναι οι παρακάτω :

$$\text{Για } 0 < \rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}} < 1 \quad \varepsilon_{f_{frp},e} = 0,0119 - 0,0205 \cdot (\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}) + 0,0104 \cdot (\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}})^2$$

$$\text{Για } \rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}} > 1 \quad \varepsilon_{f_{frp},e} = -0,00065 \cdot (\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}) + 0,00245$$

Με τη βοήθεια αυτών των τύπων μπορεί κανείς να υπολογίσει τη συμβολή των ffrp σε αντοχή στην τέμνουσα. Το διάγραμμα 5 που παρουσιάζεται κάτω και προκύπτει από τα στοιχεία του πειράματος είναι ενδιαφέρον. Φαίνεται ότι για τιμές του $\rho_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}}$ μέχρι 0,4 GPa (στο οποίο παρουσιάζεται τοπικό μέγιστο) η συμμετοχή του ffrp σε αντοχή σε τέμνουσα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, πάνω από το οποίο μειώνεται λίγο και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά. Αυτό το στοιχείο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οριστεί το άνω όριο του $\rho_{f_{frp}}$, πάνω από το οποίο η συμβολή του ffrp παύει να είναι θετική, καθώς και για διαστασιολόγηση δοκών με το βέλτιστο ποσοστό οπλισμού ffrp.



Διάγραμμα 8

Σε αντιπαράθεση με τον τύπο που δίνεται από τον κ. Τριανταφύλλου για τον υπολογισμό της συμβολής του ffrp σε αντοχή σε τέμνουσα και για τη περίπτωση που ισχύει $V = V_c + V_{f_{frp}}$ όπου $V_c = 166,2 \cdot b \cdot d \cdot (f_c)^{1/2}$, από μελέτη των Chajes et al δίνεται $V_{f_{frp}} = A_{f_{frp}} \cdot E_{f_{frp}} \cdot \varepsilon_{v,f_{frp}} \cdot d$

και

$E_{f_{frp}}$: μέτρο ελαστικότητας του ffrp

$A_{f_{frp}}$: εμβαδό διατομής του ffrp

$\varepsilon_{v,f_{frp}}$: κατακόρυφη παραμόρφωση του ffrp

d : στατικό ύψος δοκού

Από μελέτη των Al-Sulaimani et al $V_{f_{frp}} = 2 \cdot \tau \cdot d \cdot (h/2)$ με $\tau = \eta$ διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας ίση με 3,5 Mpa. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους παραπάνω τύπους αποδείχθηκαν συντηρητικά κτά ένα ποσοστό 40%, σύμφωνα με το πείραμα που έγινε από τους [8].

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

•Μελετώντας την ανθεκτικότητα σε διάρκεια καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη επιλογή είναι οι ίνες άνθρακα παρά το ψηλότερο κόστος σε σύγκριση με τα άλλα υλικά. Για αυτό το λόγο και σε μελέτες που έγιναν για την επισκευή δοκών (στις αποβάθρες του αμερικάνικου ναυτικού) επιλέχθηκαν οι ίνες άνθρακα.

•Μελετώντας τα αποτελέσματα του πειράματος των M.ARDUINI,DI TOMMASO and O.MANFRONI διαπιστώσαμε ότι η αύξηση της αντοχής στις δοκούς ήταν αξιόλογη.

• Η συμβολή του f_{fr} στην αντοχή σε τέμνουσα αυξάνεται μέχρι το $\rho_{frp} * E_{frp}$ φτάσει περίπου τα 0,4 Gpa, πάνω από το οποίο τσαματάει να είναι θετική. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαστασιολόγηση μιας δοκού με το βέλτιστο ποσοστό οπλισμού με f_{fr} .

• Η συνεισφορά του f_{fr} σε τέμνουσα αυξάνεται όσο η διεύθυνση των ινών πλησιάζει την κάθετο στην διαγώνια ρωγμή.

• Απο τα πειράματα ενίσχυσης διαπιστώθηκε πως η μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής αντοχής στις δοκούς παρουσιάστηκε στα στοιχεία με τον λιγότερο εφελκόμενο οπλισμό, καθώς στις υποοπλισμένες δοκούς φαίνεται εντονότερα η θετική επιρροή του f_{fr} .

• Όσο αυξάνεται το πάχος του ελάσματος είναι πιθανότερη η αποκόλληση στα άκρα του, δημιουργώντας μια ψαθυρή αστοχία στη δοκό πριν το f_{fr} αποκτήσει την μέγιστη εφελκυστική του αντοχή.

• Το υψηλό κόστος μειώνεται, όσο η ζήτηση του υλικού αυξάνεται και η παραγωγή μεγαλώνει. Συνυπολογίζοντας και τα εργατικά, τα οποία στην περίπτωση των μεταλλικών ελασμάτων είναι προφανώς μεγαλύτερα, βλέπουμε ότι το κόστος της ενίσχυσης με FRP συγκριτικά και με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η λύση είναι αποδεκτό.

• Τέλος η εμπειρία και η κατανόηση των μηχανικών είναι πολύ περιορισμένη γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνουν πολλά πειράματα και μελέτες μέχρι η εφαρμογή αυτών των υλικών στον κατασκευαστικό τομέα να γίνεται με αυτοπεποίθηση και σιγουριά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Θ.Χ.Τριανταφύλλου (1997)“Προηγμένες τεχνολογίες υλικών και κατασκευών” σελ.45-60 .
- [2] Σ.Πανταζοπούλου “Μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σύνθετων υλικών” ημερίδα 18-5-2000, με θέμα “ενίσχυση σκυροδέματος με σύνθετα πολυμερή”.
- [3] L.J.MALVAR,G.E.WARREN and C.INABA (1995)“rehabilitation of navy pier beams with composite sheets” Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures.
- [4] R.N.SWAMY and P.MUKHOPADHYAYA (1995) “role and effectiveness of non-metallic plates in strengthening and upgrading concrete structures” Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures.
- [5] M.ARDUINI,DI TOMMASO and O.MANFRONI (1995) “fracture mechanisms of concrete beams bonded with composite plates” Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures.

- [6] Saadatmanesh H. & Ehsani M. R. (1990)“ Fiber composite plates can strengthen beams” Concrete international ,ACI,12(3).
- [7] Θ.Χ.Τριανταφύλλου (1998) “Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites” ACI structural journal.
- [8] M.J.CHAJES,T.A.THOMSON,JR and B.TARANTINO (1995) “reinforcement of concrete structures using externally bonded composite materials” Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures.
- [9] Θ.Χ.Τριανταφύλλου (2000) “Ενισχύσεις κατασκευών με σύνθετα υλικά-Υπολογισμοί” περιοδικό Σ.Π.Μ.Ε. Φεβρουάριος 2000.