

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΜΑΜΟΥΝΑΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΕΡΖΗΣ**

Περίληψη εργασίας

Σε αυτή την εργασία γίνεται παρουσίαση των λόγων που μας οδηγούν στη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών και δίνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο μηχανισμός αστοχίας και γίνεται ιδιαίτερη μνεία για τη συμπεριφορά τους κάτω από αντίζοες συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και για τον τρόπο που μπορεί αυτή να προβλεφθεί μέσα από μαθηματικές σχέσεις (νόμος του Fick). Τέλος παρουσιάζονται πειράματα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά τους,

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

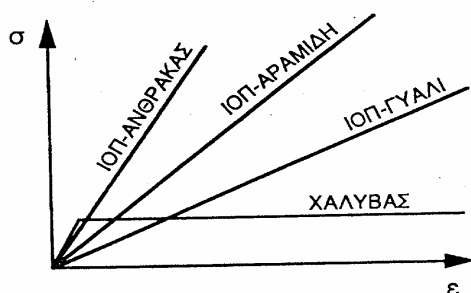
Τα τελευταία χρόνια είναι μεγάλο το πρόβλημα της φθοράς των υαρχόντων κατασκευών και είναι αναγκαία η αναζήτηση μεθόδων για την επισκευή και ενίσχυση τους. Αρκετές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου εξασθενούν λόγω της διάβρωσης του οπλισμού, της ελλιπής συντήρησης τους, του κακού σχεδιασμού και ανάλυσης καθώς και της αύξησης των κινητών φορτίων. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα στην αναγκαιότητα των ενισχύσεων είναι αυτό της Αμερικής. Λόγω της αύξησης των φορτίων, το 40% των γεφυρών της βορείου Αμερικής πρέπει να ενισχυθούν ή να αντικατασταθούν. Στα παραπάνω θα πρέπει να προσθέσουμε και κάποιους τυχηματικούς παράγοντες όπως ο σεισμός. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται επιτυχώς με τη χρησιμοποίηση φύλλων ινοπλισμένων πλαστικών (ΙΟΠ) υλικών (σύνθετων υλικών), που αποτελούνται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμίδης σε εποξειδική ή πολυεστερική μήτρα

2.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ[1]

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ανόργανες ή οργανικές ίνες (γυαλιού, άνθρακα ή αραμίδης) υψηλής εφελκυστικής αντοχής (που οφείλεται στην πολύ μικρή διάμετρο τους, της τάξης των 5-25 μm), σε μήτρα από πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κ.τ.λ.) και έχουν βάρος ίσο με 1/4 περίπου του χάλυβα. Το μητρικό υλικό (ρητίνη) έχει φτωχές μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του εξαρτάται από τη διάρκεια και το είδος της φόρτισης καθώς και από την θερμοκρασία. Οι ίνες γυαλιού είναι οι οικονομικότερες αλλά η ευπάθειά τους σε αλκαλικές και όξινες ενώσεις σε συνδυασμό με την μη ικανοποιητική τους αντοχή σε κόπωση τις κάνει ακατάλληλες για χρήση σε ΙΟΠ φύλλα για ενίσχυση κατασκευών. Οι ίνες άνθρακα και αραμίδης έχουν αντοχή πολύ καλύτερη από τις ίνες γυαλιού με τις ίνες άνθρακα να έχουν σχεδόν τη διπλάσια ακαμψία από τις ίνες αραμίδης, ενώ είναι και λιγότερο ευπαθείς από τους άλλους δυο τύπους ινών κι έτσι προτιμώνται για την ενίσχυση κατασκευών. Για τη συνηθέστερη περίπτωση που χρησιμοποιούνται συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης σε αναλογία 50-70% κατ' όγκο, οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών συγκρίνονται ως εξής με αυτές του χάλυβα όπως φαίνεται στον πίνακα 1 και στο σχήμα 1.

ΙΝΕΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m ³	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (%)
ΧΑΛΥΒΑΣ	7860	200	700-2000	3.5
ΓΥΑΛΙ	2540	50	3500	3
ΑΡΑΜΙΔΗ	1440	65-120	2900	2-3
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	1900	135-190	1800	1-1.5

Πίνακας 1. Ιδιότητες των ινών



Σχήμα 1. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για ιοπ (ινοπλισμένα πλαστικά) και χάλυβα.

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ[1][3]

Συμβατικές λύσεις ενίσχυσης στοιχείων είναι η χρήση χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων και μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η τοποθέτησή τους είναι σχετικά δύσκολη γιατί στα μεταλλικά ελάσματα δεν είναι εύκολο να δοθούν επίπεδα σχήματα, να ταιριάζουν σε σύνθετες πλάγιες όψεις, είναι βαριά και άκαμπτα, ο χειρισμός τους είναι δύσκολος και το μήκος τους περιορισμένο με αποτέλεσμα την ανάγκη να γίνονται συχνά επαλληλίες, καθώς και ειδικές σκαλωσιές πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να κρατηθούν τα ελάσματα στη σωστή θέση μέχρι η κόλλα να αναπτύξει την αντοχή της και βέβαια το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ο κίνδυνος διάβρωσης. Αντιθέτως τα ΙΟΠ έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα

- Έχουν πολύ μικρό βάρος άρα δεν αυξάνουν σημαντικά το ίδιο βάρος της δοκού
- Είναι διαθέσιμα σε πολύ μεγάλες διαστάσεις
- Μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις
- Δεν χρειάζονται προστασία έναντι διάβρωσης
- Η τοποθέτησή τους είναι σχετικά εύκολη

Σαν μειονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν η μεγάλη ευπάθεια τους στη φωτιά (που όμως μπορεί να αντιμετωπισθεί είτε με χρήση χημικών προσθέτων, είτε με χημική μεταβολή των πολυμερικών αλυσίδων), το μεγάλο κόστος καθώς και η έλλειψη εξειδικευμένων και κατάλληλα εξοπλισμένων συνεργείων στην Ελλάδα.

4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ [1]

Μια δοκός από σκυρόδεμα που έχει ενισχυθεί σε κάμψη με χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πλαστικά μπορεί να αστοχήσει σύμφωνα με πολλούς διαφορετικούς μηχανισμούς που ανάλογα με το ποσοστό εξωτερικού οπλισμού της δοκού είναι οι εξής : α) αστοχία λόγω θραύσεως του σύνθετου πολυμερούς της οποίας έχει προηγηθεί διαρροή του χάλυβα, που δημιουργείται σε περιπτώσεις μικρών ποσοστών υπάρχοντος και εξωτερικού οπλισμού (ρ_{fc}). β) αστοχία που οφείλεται σε θραύση του σκυροδέματος ασχέτως αν θα διαρρεύσει ή όχι ο χάλυβας (αυτό εξαρτάται από το ποσοστό του). Συμβαίνει όταν το ποσοστό εξωτερικού οπλισμού είναι σχετικά υψηλό. Οι ροπές σχεδιασμού για τις παρακάτω μορφές αστοχίας υπολογίζονται από ισορροπία δυνάμεων και ροπών σε επίπεδο διατομής και με βάση τους καταστατικούς νόμους των υλικών για μονοαξονική ένταση.

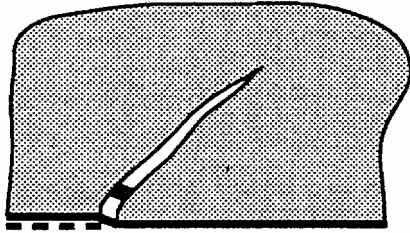
Η απώλεια συνάφειας δημιουργεί πρόσθετους μηχανισμούς αστοχίας όπως : α) διάδοση οριζοντίων ρωγμών στη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού, υπεύθυνες για την διάδοση των οποίων είναι κυρίως οι διατμητικές τάσεις και το πρόβλημα επιλύεται βάσει της θεωρίας θραυστομηχανικής για διάδοση ρωγμών τύπου II, με ταυτόχρονη χρήση της μεθόδου “ευκαμψίας” (Triantafillou and Plevris 1992). β) αποκόλληση του σύνθετου φύλλου λόγω του κατακόρυφου και οριζόντιου ανοίγματος ενδεχόμενων λοξών (διατμητικών) ρωγμών (Σχ. 2). Η ροπή σχεδιασμού είναι ανάλογη του αθροίσματος των διατμητικών δυσκαμψιών του υπάρχοντος διαμήκους οπλισμού και του οπλισμού ενίσχυσης. γ) διατμητική αστοχία της στρώσης του σκυροδέματος μεταξύ οπλισμού ενίσχυσης και υπάρχοντος διαμήκους οπλισμού κοντά στα άκρα του σύνθετου φύλλου (Σχ.3). Εμφανίζεται όταν η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια εξωτερικού οπλισμού και σκυροδέματος γίνει ίση με την αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση.

Επειδή οι αποκολλήσεις των σύνθετων φύλλων προηγούνται των κλασσικών μηχανισμών αστοχίας, όταν τα ποσοστά (άρα και πάχη) του οπλισμού ενίσχυσης είναι αρκετά υψηλά είναι σκόπιμη η βελτίωση της αγκύρωσης των σύνθετων υλικών, μηχανικά, όπως π.χ. με περίσφιξη των άκρων των φύλλων μέσω κατακόρυφου εξωτερικού οπλισμού (Σχ. 4).

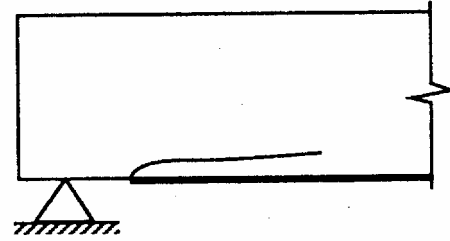
Για τους κλασσικούς μηχανισμούς αστοχίας στα τυπικά διαγράμματα κανονικοποιημένης ροπής σχεδιασμού ροπών χωρίς θλιβόμενο οπλισμό, συναρτήσει του ποσοστού οπλισμού ενίσχυσης που δίνονται στο σχήμα 5 για δύο διαφορετικά ποσοστά υπάρχοντος οπλισμού και τρεις τύπους Ι.Ο.Π. ορίζονται οι εξής μηχανισμοί αστοχίας: 1) διαρροή χάλυβα - θραύση Ι.Ο.Π., 2) διαρροή χάλυβα - θραύση σκυροδέματος, 3) θραύση σκυροδέματος. Συμπεραίνουμε ότι όσο μικραίνουν τα ποσοστά υπάρχοντος οπλισμού τόσο αποτελεσματικότερη γίνεται η τεχνική της ενίσχυσης. Επίσης όταν χρησιμοποιούνται υλικά με ίνες αραμίδης ή γυαλιού αποκλείεται το ενδεχόμενο εμφάνισης μηχανισμού αστοχίας από θραύση των υλικών αυτών λόγω μεγάλης μήκυνσης - θραύσης που τα χαρακτηρίζει.

Τέλος αν η ενισχυμένη δοκός φορτιστεί με το μέγιστο φορτίο τότε η αστοχία είναι απότομη και καταστροφική. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζεται από μια διατμητική ρωγμή από την εφελκυστική ζώνη μέχρι το σημείο που ασκείται το φορτίο, ενώ η επικάλυψη του εφελκυστικού χάλυβα αποκολλάται. Έτσι ο σχεδιασμός πρέπει να ακολουθεί τα εξής βήματα: α) το δοκάρι με το έλασμα πρέπει να μελετηθεί για κάμψη με την προϋπόθεση ότι αν χρησιμοποιηθεί σύνθετο υλικό αυτό θα δώσει όλη την αντοχή του μέχρι την θραύση του. β) έλεγχος των τάσεων στην διεπιφάνεια ώστε να εξασφαλιστεί η αποφυγή αποκόλλησης και γ) η διατμητική ικανότητα του δοκαριού πρέπει να ελεγχθεί ώστε

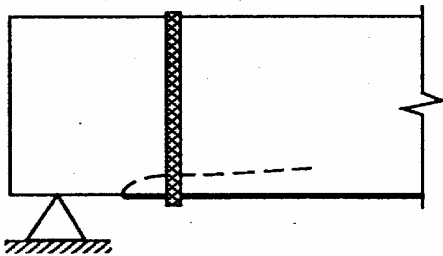
να εξασφαλιστεί μη ξαφνική αστοχία λόγω σχισίματος της επίστρωσης του σκυροδέματος. Συμπερασματικά πρέπει να εξασφαλίσουμε πλαστική μορφή αστοχίας σε ακραίες συνθήκες.



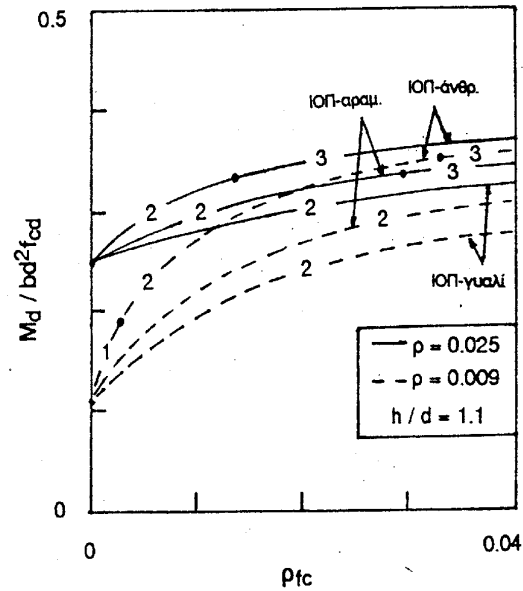
Σχήμα 2. Αποκόλληση σύνθετου φύλλου λόγω διατμητικών ρωγμών



Σχήμα 3. Διατμητική αστοχία στρώσης σκυροδέματος



Σχήμα 4. Περίσφιξη άκρων των ινοπλισμένων φύλλων



Σχήμα 5. Ροπή σχεδιασμού συναρτήσει ποσοστού οπλισμού

5. Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ[2]

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα συμβατικά είναι ότι δεν διαβρώνονται και παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση ακόμα και σε ισχυρά χημικά. Το κυριότερο πρόβλημα των σύνθετων υλικών είναι ότι είναι υδρόφιλα και απορροφούν νερό. Για να εξετάσουμε την επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στην εφελκυστική δύναμη σύνθετων τενόντων χρησιμοποιούμε τον πρώτο Νόμο του Fick για την εξομοίωση της διάδοσης των μορίων του νερού και ελεύθερων ιόντων. Η διάδοση της υγρασίας θα προκαλούσε χάσμα στην περιοχή των ινών. Για να μελετήσουμε τη διάδοση της υγρασίας πρέπει να καθοριστεί η ποσοστιαία αύξηση βάρους ενός σύνθετου στοιχείου. Ο Νόμος του Fick μπορεί να γραφτεί σαν :

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

όπου D είναι συντελεστής της διάδοσης της μάζας, C η συγκέντρωση ιόντων, x το βάθος εισχώρησης (mm).

Ο συντελεστής χρόνου G σχετίζεται με τη διάδοση D σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$G = \frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{\exp[(-2j)^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{h^2}\right)]}{(2j+1)^2}$$

όπου h είναι το πάχος του στοιχείου, m_i το αρχικό βάρος, m_m το τελικό βάρος.

Η σχέση μεταξύ της αύξησης βάρους και της διάδοσης κατά τη διάρκεια του αρχικού γραμμικού σταδίου αύξησης βάρους για ένα κυλινδρικό δοκίμιο είναι η εξής:

$$\frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 4 \sqrt{\left(\frac{Dt}{\pi r^2}\right)}$$

Η εισχώρηση της υγρασίας (m) και το ποσοστό της αύξησης βάρους του σύνθετου υλικού M συσχετίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$M = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100$$

όπου W και W_d είναι τα βάρη του υγρού και ξηρού δοκιμίου αντίστοιχα.

Το βάθος της κατεστραμμένης ζώνης x δίνεται τελικά απ' τον τύπο:

$$x = \sqrt{2 \cdot D \cdot C \cdot t} \quad (1)$$

Η προβλεπόμενη εναπομείνουσα εφελκυστική δύναμη P_p δίνεται σαν συνάρτηση της αρχικής εφελκυστικής δύναμης P_u και της αρχικής r_0 και τελικής r_f ακτίνας δοκιμίου από τον εξής τύπο:

$$P_p = P_u \left(1 - \frac{x}{r_0} \right)^2 = P_u \left(\frac{r_r}{r_0} \right)^2 \quad (2)$$

Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κάτω από τις δυνατές συνθήκες περιβάλλοντος τα πολυμερή τοποθετήθηκαν σε επτά διαφορετικά χημικά διαλύματα, που εξομοιώνουν παρόμοιες συνθήκες. Τα αποτελέσματα τους συγκρινόμενα με τα θεωρητικά από τις παραπάνω σχέσεις, παρουσιάζονται παρακάτω.

Ανθεκτικότητα στο νερό

Γενικά η απώλεια της ελαστικής αντοχής των υλικών FRP rebars και τενόντων ήταν σε χαμηλά επίπεδα. Ο Νόμος του Fick εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της διασκόρπισης, αλλά οι σχέσεις (1) και (2) δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ελαστικής αντοχής καθώς η συγκέντρωση ιόντων είναι 0 επιπλέον έχουμε σαν αποτέλεσμα μηδενική διάτρηση υγρασίας (δηλαδή $\chi=0$). Για παράδειγμα η μείωση στην ελαστική αντοχή των 10 mm ινών γυαλιού - πολυεστέρα ή βινυλεστέρα ήταν 7,3% και 5,8% αντίστοιχα. Η οριακή αλλαγή των ελαστικών μοντέλων που παρατηρήθηκε ήταν εντός του 5% της αρχικής αντοχής. Γενικά η μείωση αντοχής παρατηρήθηκε μεγαλύτερη στις ίνες 10 mm από αυτές των 19mm του πειράματος. Όσον αφορά τους τένοντες FRP η διασκόρπιση (d) και η μέγιστη περιεκτικότητα υγρασίας (Mm) ήταν χαμηλότερη για το LeadLine και το CFCC στο νερό απ'ότι σε άλλες συνθήκες. Τα μεγέθη διασκόρπισης και Mm είχαν υπερεκτιμηθεί για το CFCC. Αυτό οφείλεται στην υφή της επιφάνειας του CFCC η οποία δεν επιτρέπει στην υγρασία να φιλτράρεται ανάμεσα στα κενά και τις κοιλότητες που δημιουργούνται από τις ίνες του carbon γύρω από την πλέξη των 2.5mm. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι το νερό έχει περιορισμένη επίδραση πάνω στην ελαστική αντοχή και των τριών ειδών τενόντων. Για παράδειγμα η μείωση ελαστικής αντοχής για το LeadLine μετά από ένα χρόνο ήταν 0,7%. Επίσης καμία αλλαγή δεν επήλθε στη δομή τους.

Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον (Ph 12, T=25° C και T=60° C)

Σε όλες τις περιπτώσεις η διασκόρπιση αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας δείχνοντας άμεση σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών. Για το υλικό E-glass η μείωση στην ελαστική αντοχή ήταν η υψηλότερη στην αλκαλική κατάσταση. Χαμηλότερη διασκόρπιση καταγράφηκε για τον βινυλεστέρα απ'ότι για πολυεστέρα που φάνηκε και από το μικρότερο βάθος διάτρηση υγρασίας (χ) και μείωσης της ελαστικής αντοχής. Για τις θερμοκρασίες 25° C και 60°C η μείωση αντοχής των πολυεστερικών υλικών των 10mm ήταν 25% και 28,6% αντίστοιχα, ενώ για τα βινυλεστερικά υλικά των 10mm ήταν 13,0% και 20,3% αντίστοιχα. Για τα AR-glass, τα πολυεστερικά παρουσίασαν μικρότερη διασκόρπιση και αυξανόμενη ανάλογα με τη θερμοκρασία, μεγαλύτερη όμως μείωση ελαστικής αντοχής. Σε πείραμα μετά από 6 μήνες σε αλκαλικό διάλυμα στους 60° C τα ποσοστά μείωσης αντοχής για πολυεστερικά και βινυλεστερικά AR-glass πάχους 10mm ήταν 28% και 22,6% αντίστοιχα. Γενικά συμπεραίνουμε ότι ο Νόμος του Fick είναι αποδεκτή μέθοδος προσέγγισης της απώλειας αντοχής που οφείλεται στη διασκόρπιση σε αλκαλικό διάλυμα. Επίσης αποδείχθηκε μικρή επίδραση του αλκαλικού περιβάλλοντος στις μεταβολές της ελαστικής αντοχής των μοντέλων. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνει όσο αυξάνει και η θερμοκρασία για όλους τους τύπους τενόντων. Η υπολειμματική αντοχή αποδεικνύεται υποτιμημένη από το νόμο του Fick που για το CFCC προέβλεπε 83% έναντι 98,8% της πραγματικής για διάστημα 12 μηνών.

Ανθεκτικότητα σε όξινο περιβάλλον

Σε αυτή την περίπτωση οι μειώσεις αντοχών που παρατηρήθηκαν ήταν χαμηλότερες απ'ότι σε αλκαλικό διάλυμα. Αυτό συνέβη λόγω χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων Cl^- που είναι υπεύθυνα για σημαντική μείωση ελαστικής αντοχής. Αυτό δείχνει ότι άλλοι παράγοντες συντέλεσαν στη μείωση της αντοχής όπως η διάχυση νερού και τα ιόντα H^+ . Ο νόμος του Fick προέβλεπε μείωση αντοχής σε ποσοστό μέχρι 15% που και πάλι ήταν υπεράνω της πραγματικής. Από τους τένοντες καλύτερα συμπεριφέρθηκε το LeadLine χωρίς αξιοσημείωτη μείωση της ελαστικής αντοχής. Ενώ η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στο Arapree και ήταν 8.30% μετά από 12 μήνες.

Ανθεκτικότητα σε θαλασσινό νερό και ρευστό διάλυμα αλατιού $T=25^\circ C$

Χαμηλότερη μείωση σε ελαστική αντοχή παρατηρήθηκε στο θαλασσινό νερό απ'ότι στο δ/μα αλατιού, ενώ οι διαχύσεις ήταν παρεμφερείς. Αυτό οφείλεται σε υψηλές περιεκτικότητες Cl^- στο δ/μα αλατιού. Για τα E-glass από πολυεστέρα και βινυλεστέρα, η μείωση ελαστικής αντοχής σε θαλασσινό νερό ήταν 10.9 και 6.5% αντίστοιχα, ενώ σε δ/μα αλατιού 26.7% και 22.9% αντίστοιχα. Πανομοιότητες ήταν οι παρατηρήσεις και για τα AR-glass. Ο νόμος του Fick ήταν επαρκής για την εκτίμηση της μείωσης των παραπάνω αντοχών. Το LeadLine αποδείχθηκε ισχυρό σε διαχυτικότητα με σχετικά μικρή μείωση της αντοχής και για τις δύο περιπτώσεις. Το CFCC ακολούθησε διαχυτικότητα ανεξάρτητη από το νόμο του Fick και περιορισμένη μείωση στην ελαστική αντοχή που οφείλεται στην άριστη ικανότητα του carbon PAN να αντέχει στην επίδραση του Cl^- . Το arapree ακολούθησε διάχυση κατά το νόμο του Fick ανεξάρτητη από τον τύπο του αλατιού και τη συγκέντρωση. Επιπλέον η διαχυτικότητα και το ποσοστό υγρασίας ήταν υψηλότερα σε όξινα και αλάτινα δ/τα απ'ότι σε αλκαλικά. Γενικά πρέπει να τονίσουμε ότι τα αποτελέσματα των δειγμάτων σε άμεση έκθεση σε όξινα και ανθρακικά δ/τα υπερβάλλουν την πραγματική έκθεση στο χώρο.

Ανθεκτικότητα κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία

Έκθεση σε υπεριώδες φως προκάλεσε τον χρωματισμό των δειγμάτων σε <<σκοτεινά>> χωρίς να προκαλέσει αλλαγή στη δομή τους. Η εκτιμηθείσα μείωση στην ελαστική αντοχή ήταν λιγότερο από 3%.

Ανθεκτικότητα σε κύκλους παγώματος-ξεπαγώματος

Μετά από 1200 τέτοιους κύκλους μεταξύ $-30^\circ C$ και $60^\circ C$ δεν συνέβησαν μετρήσιμες αλλαγές στη δομή των LeadLine CFCC και arapree. Άρα κάτω από ξηρές συνθήκες οι κύκλοι παγώματος-ξεπαγώματος δεν έχουν αποτέλεσμα πάνω στα υλικά.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ[3]

Γενικά

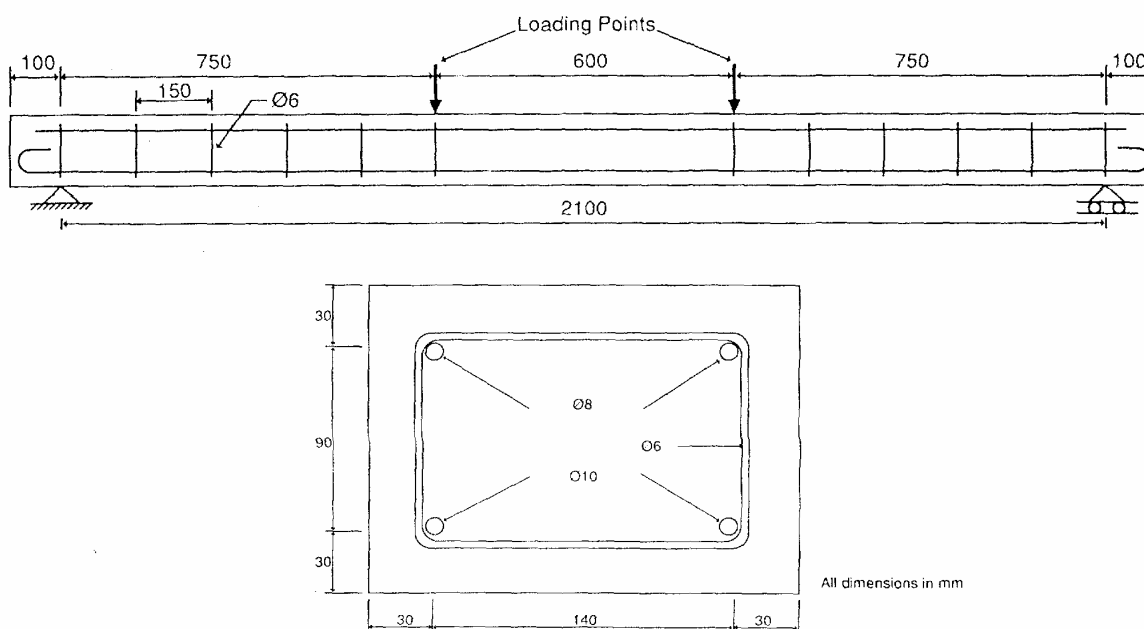
Στο πείραμα που έγινε χρησιμοποιήθηκαν 15 δοκοί από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 2,3 m που ενισχύθηκαν εξωτερικά με ινοπλισμένα πλαστικά ελάσματα. Λεπτομέρειες των δοκών φαίνονται στο σχήμα 6. Ενδεικτικά είχαν διαστάσεις 2300 mm μήκος, 200 mm πλάτος, και 150 mm ύψος. Ο εφελκόμενος οπλισμός αποτελείται από δυο ράβδους διαμέτρου 10 mm με χάλυβα υψηλής αντοχής και ο θλιβόμενος οπλισμός από δυο ράβδους διαμέτρου 8 mm υψηλής αντοχής. Οι οπλισμοί διάτμησης ήταν από χάλυβα μέσης αντοχής, διαμέτρου 6

mm και τοποθετήθηκαν σε απόσταση 150 mm μεταξύ τους, όχι όμως και στο κέντρο της δοκού.

Οι αναλογίες υλικών σκυροδέματος ήταν 1 : 1,6 : 2,9 (τσιμέντο : λεπτόκοκκα αδρανή : χονδρόκοκκα αδρανή) και η αναλογία νερού προς τσιμέντου ήταν 0,45.

Η αντοχή των κύβων σκυροδέματος κυμαίνονταν μεταξύ των 54 έως 69 N/mm² και η εφελκυστική τους αντοχή από 3 έως 3,8 N/mm²

Στην προσπάθεια να υπολογίσουν την αποτελεσματικότητα της τεχνικής της ενίσχυσης με ινοπλισμένα πλαστικά ελάσματα σε 'κατεστραμμένες' κατασκευές, πήραν δυο δοκούς χωρίς ελάσματα και τις φόρτισαν έως την ένδειξη των 20 KN και μετά τις αποφόρτισαν. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να βρεθεί η αντοχή του σκυροδέματος και η απόδοση του εφελκυστικού οπλισμού. Το ποσό της προφόρτισης (20 KN) αντιπροσωπεύει το 80% της μέγιστης αντοχής των μη ενισχυμένων δοκών.



Σχήμα 6. Δοκοί σκυροδέματος περάματος

Ιδιότητες ινοπλισμένων πλαστικών υλικών

Τα ινοπλισμένα πλαστικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από ίνες άνθρακα, εποξειδομένες. Το πάχος τους ήταν 0,78 mm το οποίο βρέθηκε σαν το ελάχιστο με το οποίο μπορούσαν να κατασκευαστούν, χωρίς να καταστραφούν. Αυτά τα υλικά όταν εξετάστηκαν σε εφελκυσμό παράλληλα στην διεύθυνση των ινών έδειξαν γραμμική ελαστική συμπεριφορά έως την αστοχία. Λεπτομέρειες των δοκών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 2.

Επιφανειακή κατεργασία

Η επιφανειακή κατεργασία των σύνθετων ελασμάτων, έγινε με την αποφλοιώση τους από ένα στρώμα ναύλων, που ήταν τοποθετημένο στη μια τους πλευρά. Αυτή η μέθοδος κατεργασίας αφήνει μια ομοιόμορφη τραχιά επιφάνεια που συμβάλει στην καλή σύνδεση τους με την επιφάνεια της δοκού. Για την σύνδεση τους με το σκυρόδεμα, τοποθετούμε το

συγκολλητικό υλικό στο σκυρόδεμα και στην επιφάνεια των σύνθετων ελασμάτων και στη συνέχεια περιτυλίγουμε το σημείο σύνδεσης με ειδικό περίβλημα έως ότου το συγκολλητικό να πάρει τη μέγιστη αντοχή του. Έτσι επιτυγχάνεται ομοιόμορφη εφαρμογή της πίεσης σε όλο το μήκος σύνδεσης.

Μέθοδος και οργάνωση του πειράματος

Καμπτική δύναμη τεσσάρων σημείων εφαρμόζεται σε άνοιγμα 2,1 m της δοκού. Οι δοκοί φορτίζονται σταδιακά μέχρι την αστοχία τους και το φορτίο τους καθώς και το βέλος κάμψης στο μέσο καταγράφονται αυτόματα. Με τη βοήθεια ειδικών ηλεκτρονικών μετρητών υπολογίζονται οι τάσεις. Συνδέονται με ένα σύστημα αυτόματης καταγραφής δεδομένων και αποτελέσματα παίρνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Από τον πίνακα 3 προκύπτει ότι όλα τα δοκάρια που έχουν ενισχυθεί εξωτερικά με ινοπλισμένα ελάσματα αυξάνουν σημαντικά την αντοχή και την ακαμψία από ότι στα μη ενισχυμένα δοκάρια. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναληφθεί από τις ενισχυμένες δοκούς είναι έως και 230% μεγαλύτερο από ότι στις μη ενισχυμένες. Ο μέσος όρος του μεγίστου βέλους κάμψης για τα περισσότερα από τα ενισχυμένα δοκάρια ήταν περίπου 30 mm ενώ το αντίστοιχο βέλος κάμψης στα μη ενισχυμένα ήταν περίπου 50 mm, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη ευκαμψία τους.

Από την καμπτική συμπεριφορά των δοκών φαίνεται ότι πέρα από ένα οριακό ποσό φορτίου δεν υπάρχει σημαντική αύξηση στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου που μπορεί να αναληφθεί. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην διατμητική ικανότητα των δοκών. Είναι επίσης σημαντικό να συμπεριλάβουμε στον υπολογισμό τον συντελεστή διάτμησης από τα σύνθετα ελάσματα χωρίς συγκεκριμένη διεύθυνση των ινών τους, ο οποίος είναι μικρότερος κατά 5% από τον συντελεστή εφελκυσμού, ενώ για μεταλλικά ελάσματα η τιμή αυτή είναι της τάξεως του 25-30%

Η κατανομή των τάσεων στα εξωτερικά επικολλητά σύνθετα ελάσματα δείχνουν διαφορές στις τιμές των τάσεων σε όλα τα επίπεδα φόρτισης στο μέσο των δοκών. Στο επίπεδο φόρτισης των 60KN για ελάσματα 6 ινοπλισμένων πλαστικών φύλλων (πάχους 1,15 mm) εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή των τάσεων στα εξωτερικά ινοπλισμένα πλαστικά στο μέσο, όπως αναμενόταν.

Τα μη ενισχυμένα δοκάρια άρχισαν να αναπτύσσουν εξωτερικές ρωγμές σε επίπεδο φόρτισης 6KN. Με την αύξηση του φορτίου παρατηρήθηκε βαθμιαία αύξηση του αριθμού και του ύψους των ρωγμών. Αυτά τα δοκάρια τελικά αστόχησαν σε επίπεδο φόρτισης 26KN από θλιπτική αστοχία και χαρακτηρίζονται από την κλασική θραύση του σκυροδέματος των δοκών στη θλιβόμενη ζώνη.

Με τα ενισχυμένα δοκάρια, οι ρωγμές δεν άρχιζαν να εμφανίζονται παρά μόνο στο επίπεδο φόρτισης των 12 KN. Αυτές οι ρωγμές αναπτύσσονται σταδιακά στον αριθμό τους καλύπτοντας περισσότερα διαστήματα στο μήκος της δοκού και κινούνται προς τη θλιβόμενη περιοχή των δοκών. Η αστοχία ήταν ξαφνική και καταστρεπτική. Σε πολλές περιπτώσεις ο τρόπος αστοχίας χαρακτηρίζεται από εμφάνιση διατμητικών ρωγμών που ξεκινούν από την εφελκυσόμενη ζώνη και κατευθύνονται προς το σημείο φορτίσεως και επίσης συμπληρώνονται με αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος του εφελκυσόμενου οπλισμού.

Αριθμός δοκού	Είδος ενίσχυσης	Διαστάσεις ελασμάτων (mm)		
		Μήκος	Πλάτος	Πάχος
B1 B2 B3	Κανένα	-	-	-
B4 B5	Τετράφυλλο έλασμα	1930	150	0,78
B6 B7	εξάφυλλο έλασμα	1930	150	1,15
B8 B9	Τετράφυλλο έλασμα ταινιωτό	1930	150	0,78
B10 B11	Τετράφυλλο έλασμα ταινιωτό Ανά αποστάσεις	1930	150	0,78
B12 B13	Τετράφυλλο έλασμα σε Προφορτισμένη δοκό	1930	150	0,78
B14 B15	Τετράφυλλο έλασμα σε όλο το μήκος της δοκού	1930	150	0,78

Πίνακας 2. Λεπτομέρειες των δοκών του πειράματος

Αριθμός δοκού	Είδος ενίσχυσης	Μέγιστο φορτίο (KN)	Μέγιστο βέλος κάμψης (mm)	Τρόπος αστοχίας
B1 B2 B3	Κανένα	26,2 26,2 26,8	48,3 60 49,7	Θραύση σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη
B4 B5	Τετράφυλλο έλασμα	61,9 63,2	33,1 23,1	Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού Διάτμηση
B6 B7	εξάφυλλο έλασμα	59,4 71,7	23,1 27,9	Διάτμηση Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού
B8 B9	Τετράφυλλο έλασμα ταινιωτό	45,1 60,1	18,1 29,3	Διάτμηση Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού
B10 B11	Τετράφυλλο έλασμα ταινιωτό Ανά αποστάσεις	62,4 66,3	28,8 34,4	Διάτμηση Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού
B12 B13	Τετράφυλλο έλασμα σε Προφορτισμένη δοκό	65,2 63,9	30 33	Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού
B14 B15	Τετράφυλλο έλασμα σε όλο το μήκος της δοκού	67,5 69,4	41,2 40	Διάτμηση και αποκόλληση επικάλυψης του εφελκόμενου οπλισμού Διάτμηση

Πίνακας 3. Αποτελέσματα του πειράματος**7. ANTI EΠΙΛΟΓΟΥ**

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε ιδιαίτερη μνεία για τη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών κάτω από αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και για τον τρόπο που μπορεί

αυτή να προβλεφθεί μέσα από μαθηματικές σχέσεις (νόμος του Fick), καθώς και πειράματα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά τους. Πιστεύουμε τέλος ότι η επισκευή αυτού του είδους θα επικρατήσει έναντι των συμβατικών, μια και το μειονέκτημα του κόστους φαίνεται να μην υπάρχει, κάνοντας κατάλληλες συγκρίσεις κόστους[1] με τις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Θ. Χ. ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ** <<ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ>>, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1999 σελ. 45-74
- [2] **FARES E. TANNOUS , HAMID SAADDATMANESH AND MOHAMMAD R. EHSANI** <<DURABILITY OF NON-METALLIC FIBER REINFORCED PLASTIC REBARS AND TENDONS>> σελ. 147-159
- [3] **A. R. HUTCHINSON AND H.RAHIMI** <<BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH EXTERNALLY BONDED FIBER REINFORCED PLASTICS>> σελ. 221-228