

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ FRP

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ
ΣΥΜΕΩΝΟΓΛΟΥ ΙΩΣΗΦ**

Περίληψη

Συχνά βρισκόμαστε αντιμέτωποι με το δίλημμα για το αν μια κατασκευή που έχει υποστεί βλάβες για διάφορους λόγους (σεισμός, διάβρωση των υλικών, άλλα τυχαία αίτια) είναι δυνατό να επισκευαστεί ή ν' ανακατασκευαστεί πλήρως εξ' αρχής, έτσι ώστε ν' αντεπεξέλθει επιτυχώς στο ρόλο για τον οποίο δημιουργήθηκε. Στο ερώτημα αυτό προσπαθούμε να απαντήσουμε παρουσιάζοντας μια πτυχή του θέματος της ενίσχυσης – επισκευής – προστασίας υπαρχόντων κατασκευών, της χρήσης FRP σε υποστυλώματα. Σ' αυτήν την εργασία παρουσιάζονται επίσης συμπεράσματα από διάφορα πειράματα που έχουν γίνει από ερευνητές τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό, καθώς και παρατηρήσεις σε πραγματικές κατασκευές υπό την επίδραση δυσμενούς περιβάλλοντος. Ελπίζουμε τα γραφόμενα να παρακινήσουν το ενδιαφέρον του αναγνώστη, έτσι ώστε να βρει περισσότερες λεπτομέρειες στις πηγές από τις οποίες αντλήσαμε το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρακολουθούμε τη γοργή εξέλιξη με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς στους περισσότερους τομείς. Ανάλογη εξέλιξη έχουμε και στον τομέα των μηχανικών και συγκεκριμένα στον τομέα των ενισχύσεων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιείται λοιπόν μια νέα τεχνική ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών σε υποστυλώματα, τα οποία είναι δυνατό είτε να έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό, είτε να παρουσιάζουν ανεπάρκεια αντοχής ή πλαστιμότητας, είτε γιατί απαιτείται αλλαγή χρήσης, κάτι που παρατηρείται ν' αντιμετωπίζεται συχνά σε γέφυρες, οι οποίες χρειάζεται ν' αντέξουν μεγαλύτερο φορτίο από αυτό, για το οποίο κατασκευάστηκαν. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ινοπλισμένα πολυμερή, ονομάζονται FRP (**F**ibre **R**einforced **P**olymers) και αποτελούνται από συνεχείς ίνες κυρίως γυαλιού ή άνθρακα και σπανιότερα αραμιδίου, σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη. Στην αγορά κυκλοφορούν σε μορφή δύσκαμπτων λωρίδων (πάχους της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (πάχους της τάξης του 0,1-0,4 mm), από γυαλί, άνθρακα ή αραμίδη, με τις ίνες κατανεμημένες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Η ενίσχυση των υποστυλωμάτων είναι δυνατό να επιτευχθεί είτε με περιτύλιξή τους με ταινίες από σύνθετα υλικά, είτε με χρήση κατάλληλων μανδύων των ιδίων υλικών. Αυτοί οι μανδύες υπερτερούν σε σχέση με τους παραδοσιακούς, γιατί εφαρμόζονται εύκολα, αναπτύσσουν σύντομα πλήρη αντοχή κι έχουν μικρό πάχος, το οποίο δε μειώνει το διαθέσιμο χώρο της εκάστοτε οικοδομής, ούτε δημιουργεί αντιαισθητικές προσθήκες στο εσωτερικό του κτιρίου. Γενικά τέτοιου είδους ενισχύσεις συνήθως επιβάλλουν τόσο παθητική, όσο κι ενεργητική περίσφιγξη, η οποία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, είτε με προένταση των οριζοντίων ταινιών περιτύλιξης, είτε αφήνοντας ένα κενό ανάμεσα στο μανδύα από σύνθετα υλικά και στο υποστυλώμα, το οποί το γεμίζουμε με εποξειδική ρητίνη υπό πίεση.

2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Κύριο χαρακτηριστικό των ινών είναι η εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή, παράλληλα με το μέτρο ελαστικότητας E_f , το οποίο μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα σε 30 και 300 GPa, κάτι που εξαρτάται από την εκάστοτε ενίσχυση και την αντίστοιχη μελέτη. Επιπλέον, πρέπει να τονίσουμε το χαμηλό τους βάρος που αντιστοιχεί περίπου στο 1/4 αυτού του χάλυβα και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, η οποία παρουσιάζεται μεγάλη στις ίνες από άνθρακα, ενώ είναι μέτρια για τις ίνες από γυαλί. Επιβάλλεται βέβαια να επισημάνουμε το γεγονός ότι η τεχνική ενίσχυσης με τα συγκεκριμένα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία κι ευελιξία στην τοποθέτηση, μικρό χρονικό διάστημα που απαιτείται γι' αυτήν, καθώς και ταχύτητα εφαρμογής, κάτι το οποίο αυξάνει την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα των δομικών στοιχείων και συγκεκριμένα των υποστρωμάτων, ενώ παράλληλα δε μεταβάλλεται η γεωμετρία τους και δεν αυξάνεται η δυσκαμψία τους. Επίσης, κυρίως τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν υψηλή χημική αντίσταση σε όξινο περιβάλλον, καθώς κι εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, ερπυσμό και χαλάρωση, ενώ γενικά τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα υλικό αισθητικά φιλικό προς το περιβάλλον. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι η τεχνική αυτή κρίνεται ως ιδιαίτερα ανταγωνιστική σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνικές, όπως η επικόλληση χαλυβοελασμάτων, η χρήση μεταλλικών μανδύων κ.α. και γι' αυτό, κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, εφαρμόζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στο εξωτερικό κατά κύριο λόγο, αλλά και στη χώρα μας.

Όμως, απαιτείται να επισημάνουμε και ορισμένα μειονεκτήματα που διέπουν τα ινοπλισμένα πολυμερή. Πρέπει να μην αγνοηθεί το σχετικά υψηλό κόστος που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά και όχι πάντα η επέμβαση με χρήση τους ακόμα στη σημερινή μας εποχή, καθώς και η γραμμική συμπεριφορά του υλικού μέχρι τη θραύση.

Παράλληλα, επιβάλλεται τα σύνθετα υλικά να προστατεύονται από βανδαλισμούς, πυρκαγιά (με αυξημένο βαθμό ενίσχυσης) και υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ κρίνονται ως ιδιαίτερα ευπαθή σε αλκαλικό περιβάλλον. Επιπλέον, απαιτείται να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός ότι στις μέρες μας, υπάρχει κάποια άγνοια γύρω από το θέμα των ινοπλισμένων πολυμερών, επειδή η τεχνική της ενίσχυσης με αυτά τα υλικά αποτελεί μια νέα τεχνική και προφανώς κρίνεται ως άγνωστο αντικείμενο για πολλούς μηχανικούς, εργολάβου και τεχνίτες. Έτσι, χρειάζεται κατάλληλα εξειδικευμένο προσωπικό για τη σωστή κι αποδοτική εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής, ενώ οφείλουμε να επισημάνουμε και την απουσία ενιαίων κανονισμών σχεδιασμού, η οποία δημιουργεί κάποιες επιφυλάξεις και προβλήματα.

3. ΓΕΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ FRP

Παρακάτω παραθέτουμε γενικούς κανόνες που διέπουν την εφαρμογή των συνθετών υλικών στην ενίσχυση δομικών στοιχείων και κατ' επέκταση των υποστρωμάτων:

- Χρειάζεται κατάλληλη κι επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας, στην οποία θα γίνει η επικόλληση των σύνθετων υλικών, δηλαδή πρέπει ν' αφαιρεθούν τα χαλαρά τμήματα, να πληρωθούν οι ρωγμές και να εξασφαλισθεί επίπεδο και "υγιές" υπόστρωμα, ενώ όταν

Material	Modulus of Elasticity		Ultimate Tensile Strength, f_u		Ultimate Strain, ϵ_u (%)	Approximate Cost, 1995	
	GPa	Msi	MPa	ksi		ECU/kg	\$U.S./lb
Fibers							
Carbon	160-270	25-40	1400-6800	200-1000	1.0-2.5	24-80	12-40
Aramid (Kevlar 29)	62-83	9-12	2800	400	3.6-4.0	16-24	8-12
Glass	81	12	3400	500	4.9	2-6	1-3
Polyethylene (Spectra 900)	117	17	2600	380	3.5	2	1
Resin							
Epoxy	2.0-4.5	0.3-0.65	27-62	4-9	4-14	2-4	1-2
Vinylester	3.6	0.49	80	12	4	2-3	1-1.5

επικολλούνται εύκαμπτα υφάσματα, πρέπει τα υλικά να εφαρμόζονται με τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τάνυση ινών.

- Για τη σωστή ανάληψη των πρόσθετων εντατικών μεγεθών, δηλαδή της ροπής κάμψης, της τέμνουσας, της αξονικής δύναμης κ.α., τα σύνθετα υλικά πρέπει να δράσουν ως εφελκόμενος οπλισμός και να παραλάβουν τις δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών.
- Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται εύκαμπτα υφάσματα, δηλαδή ανθρακονήματα ή υαλοϋφάσματα, οι υπολογισμοί γίνονται βάσει της ονομαστικής διατομής των υφασμάτων και όχι του “τελειωμένου” σύνθετου υλικού, κι αυτό γιατί υπάρχει κάποια αβεβαιότητα ως προς το βαθμό εμποτισμού της εφαρμοζόμενης επί τόπου ρητίνης.
- Στην οριακή κατάσταση φέρουσας ικανότητας, δεν έχουμε διαρροή του οπλισμού ενίσχυσης σύνθετων υλικών, όπως συμβαίνει με το χάλυβα, αλλά επιτυγχάνεται ελαστική παραμόρφωση, η οποία οδηγεί σε μεγάλη παραμόρφωση. Η συγκεκριμένη παραμόρφωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα που έχει το υπόστρωμα να μεταφέρει, μέσω διάτμησης, τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά και η οποία συνήθως είναι μικρότερη από τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση θραύσης των συνθετών υλικών (ϵ_{tu}).
- Βασική προϋπόθεση για να εξασφαλισθεί η ανάληψη σημαντικών δυνάμεων από τα σύνθετα υλικά είναι να επιτευχθεί καλή αγκύρωση των οπλισμών ενίσχυσης στα άκρα τους.
- Ο βαθμός ενίσχυσης επιβάλλεται να περιορίζεται σε τέτοιο βαθμό, έτσι ώστε, στην περίπτωση που αστοχούν οι οπλισμοί ενίσχυσης, το δομικό στοιχείο ν' αναλαμβάνει με ασφάλεια τουλάχιστον τα μόνιμα φορτία. Ο συγκεκριμένος βαθμός ενίσχυσης ισοδυναμεί με το λόγο της ροπής αντοχής μετά την ενίσχυση προς την αντίστοιχη αρχική, για την περίπτωση ενίσχυσης στοιχείου σε κάμψη.

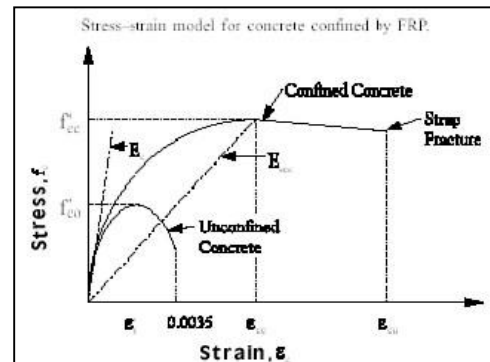
Επιπλέον, 4 κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συνεισφορά των ινών είναι οι εξής:

1. Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες της εκάστοτε επιλεγμένης ίνας.
2. Η επιφάνεια αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ίνα και την εποξειδική ρητίνη.
3. Το ποσοστό της εκάστοτε ίνας στην καθολική ενίσχυση.
4. Ο προσανατολισμός των ινών στην επιφάνεια ενίσχυσης.

4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ FRP

Η εφαρμογή των φύλλων FRP με τις ίνες προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα του υποστυλώματος, με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιδρά στις τάσεις της περιμέτρου του υποστυλώματος, οι οποίες αναπτύσσονται καθώς το υποστυλώμα φορτίζεται θλιπτικά, αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο περίσφιξης. Η αύξηση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνει σημαντικά την πλαστιμότητα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του υποστυλώματος. Αρκετές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων έχουν προταθεί για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, οι οποίες όμως είναι για εξειδικευμένες περιπτώσεις (π.χ. κυκλικές διατομές, ορθογωνικές διατομές). Το πιο διαδεδομένο μοντέλο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι του Mander et al και αρχικά αναπτύχθηκε για να περιγράψει την περίσφιξη υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, επεκτάθηκε από τους Myrmidon και Shahawy και για την περίπτωση FRP που καλύπτουν υποστυλώματα.

Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων στο περισφιγμένο και απερίσφικτο σκυρόδεμα, είναι αυτή που φαίνεται στο διπλανό σχήμα.



Η σχέση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση [1] :

$$f_c = f_{cc}' * x * r / (r - 1 + x') \quad [1] \quad \text{όπου} \quad x = e_c / e_{cc} \quad [2]$$

$$e_{cc} = e_{co}' [1 + 5 * (f_{cc}' / f_{co}' - 1)] \quad [3]$$

$$r = E_C / (E_C - E_{SEC}) \quad [4]$$

$$E_{SEC} = f_{c\epsilon}' / e_{cc} \quad [5]$$

$$f_{c\epsilon}' = f_{co}' * (-1.254 + 2.254 * \sqrt{1 + (7.94 * f_l) / f_{co}'} - 2 * f_l / f_{co}') \quad [6]$$

$$E_C = 5000 * \sqrt{f_{co}'} \quad (\text{Mpa}) \quad [7]$$

στις παραπάνω σχέσεις:

f_{cc}' θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

f_{co}' αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος

e_c διαμήκης θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος

e_{cc} η παραμόρφωση στην μέγιστη τάση του f_{cc}' σκυροδέματος

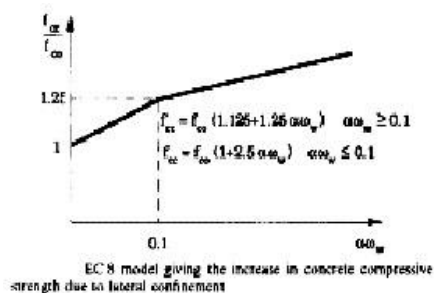
e_{co}' η παραμόρφωση στην μέγιστη f_{co}' τάση του απερίσφικτου σκυροδέματος (ίση με 0.002)

E_C το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας του απερίσφικτου σκυροδέματος

f_l η πλευρική τάση περίσφιξης του FRP

Αν στη σχέση [6] βάλουμε $f_l = 0$, τότε προκύπτει το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για το απερίσφικτο σκυροδέμα.

Ο ευρωκώδικας 8 προτείνει εναλλακτικά για την [6] τη σχέση: $f_{cc}' = b * f_{co}'$ και αντί για τη σχέση [3] τη $e_{co}' = b^2 * e_{cc}$ σχέση . Οι σχέσεις αυτές προέκυψαν βάσει αποτελεσμάτων πειραμάτων που έκανε ο Τάσσιος με περίσφιξη χαλύβδινων



συνδετήρων. Οι ίδιες σχέσεις χρησιμοποιούνται και για περίσφιγξη με FRP.

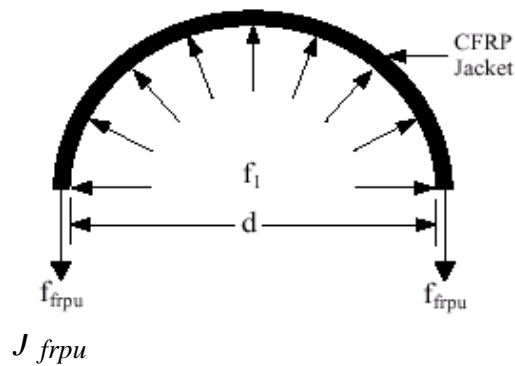
Η τάση λόγω περίσφιγξης που εισάγεται στον πυρήνα του σκυροδέματος υπολογίζεται αν κάνουμε το διάγραμμα ελεύθερου σώματος μιας διατομής και εφαρμόσουμε ισορροπία δυνάμεων. Προκύπτει ότι η τάση λόγω περίσφιγξης είναι (για κυκλικό υποστύλωμα):

$$f_l = 2 * f_{frpu} * t_{frp} / d \quad \text{όπου}$$

τάση θραύσης frp

t_{frp} πάχος frp

Free body diagram of section of confined concrete.



d διάμετρος υποστυλώματος

Η τάση λόγω εγκιβωτισμού αποτελεί την αντίδραση του μανδύα του πολυμερούς στις εγκάρσιες παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Επομένως, στην περίπτωση της ενίσχυσης, το FRP λειτουργεί για το επιπλέον φορτίο που καλείται να αναλάβει το υποστύλωμα. Για την βελτίωση του μηχανισμού περίσφιγξης χρησιμοποιούνται ειδικά μηχανήματα που προεντείνουν το μανδύα (προτείνονται άνω και κάτω όρια για τις τιμές προέντασης). Όμως, σύμφωνα με άρθρο της Σ. Πανταζοπούλου, σε πειράματα που έγιναν για την επισκευή διαβρωμένων με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος δοκιμίων, η χρήση διογκωτικού κονιάματος, ώστε να δημιουργηθεί εσωτερική πίεση και άρα προένταση του FRP, δε βελτίωσε τη συμπεριφορά, γιατί μείωσε τη διαθέσιμη παραμορφωσιμότητα του μανδύα.

Ένα σημείο άξιο προσοχής που αξίζει να αναφέρουμε είναι ότι κατά την ενίσχυση υποστυλώματος το επιπλέον φορτίο που καλείται να αναλάβει, δεν πρέπει να προκαλέσει αστοχία σε λυγισμό. Ο Καναδικός κανονισμός (CSA Standard A23.3-94) προτείνει για μέλη με $l_u / h \leq 3$ να ταξινομούνται ως υποστυλώματα και να ελέγχεται αν ικανοποιείται η σχέση [8] έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία σε λυγισμό.

$$l_u / h \leq 6.25 / \sqrt{P_f / (f_c ' * A_g)} \quad [8]$$

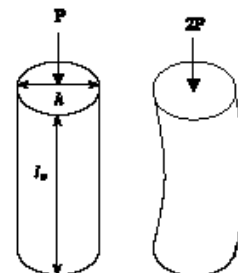
όπου:

P_f = τελικό αξονικό φορτίο που καλείται να αναλάβει το υποστύλωμα

f_c = αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος

A_g = εμβαδόν διατομής υποστυλώματος

Short column buckling under high load.

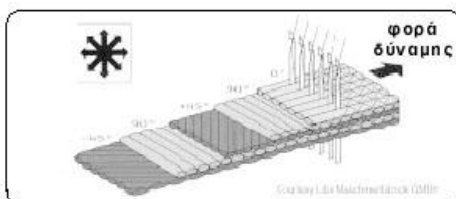


5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΣΩ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο άνθρακας ως άτομο συνάπτει με άλλα στοιχεία ισχυρούς και σταθερούς δεσμούς. Τα υλικά των οποίων τα στοιχεία συνδέονται με τέτοιους δεσμούς, είναι άκαμπτα κι ανθεκτικά σε πολλούς δυσμενείς παράγοντες, όπως τα χημικώς επιβλαβή περιβάλλοντα, καθώς και οι σχετικώς υψηλές θερμοκρασίες, ενώ επιβάλλεται να σημειώσουμε ότι η πυκνότητα τους είναι χαμηλή και οι πρώτες τους ύλες άφθονες.

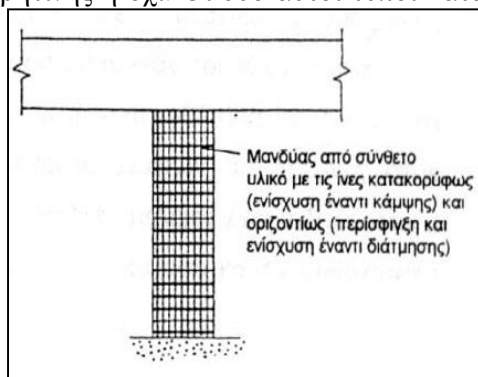
Το υλικό, το οποίο χρησιμοποιούμε για την ενίσχυση υποστυλωμάτων είναι ίνες άνθρακα που έχουν εμποτιστεί σε μια μήτρα, οι συνθέστεροι της οποίας είναι η εποξειδική ρητίνη, ο πολυεστέρας και το βινύλιο. Η διαδικασία παραγωγής του τελικού προϊόντος είναι σύνθετη. Ο άνθρακας ως πρώτη ύλη είναι πολύ σκληρό υλικό, γι' αυτό παρουσιάζει και τα ανάλογα πλεονεκτήματα που οφείλονται στην ιδιότητα αυτή. Όμως, ουσιαστικά δεν έχει χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό λόγω της ψαθυρότητάς του. Η παρουσία κάποιων ατελειών στο εσωτερικό ομοιογενούς μάζας είναι δυνατό να προκαλέσει ξαφνική και καταστροφική αστοχία ενός υποστυλώματος κατασκευασμένου από τέτοιο υλικό, ενώ παράλληλα δεν μπορούμε ν' αποφύγουμε την ύπαρξη τέτοιων ατελειών.

Έχουν γίνει πειράματα σε γρανίτη, υλικό παρόμοιο με τον άνθρακα, τα οποία έχουν δείξει ότι η αντοχή του αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό, όταν παρήχθη σε μορφή ινών. Η πιθανότητα αστοχίας ενός δοκιμίου, στο οποίο η παρουσία ατελειών είναι ικανή να οδηγήσει σε ψαθυρή θραύση, μειώνεται όσο μικρότερο είναι το ποσοστό του υλικού στο εκάστοτε δοκίμιο, ενώ και η παρουσία ακόμα και ρωγμής σε σύνθετο υλικό δε διαδίδεται τόσο άμεσα όσο σ' ένα συμπαγές δοκίμιο, αφού η παρουσία ατέλειας σε μια ίνα δεν προκαλεί πάντα αστοχία. Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται, είναι ανισότροπο κι ανάλογα με τον τύπο εφαρμογής, μπορούμε να τοποθετήσουμε τις ίνες σε πολλές διευθύνσεις με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού στην κατεύθυνση που επιθυμούμε. Επιπλέον, πρέπει να σημειώσουμε ότι παρά το ότι η συμπεριφορά των



σύνθετων υλικών είναι γραμμική κι ελαστική, η αστοχία προκαλείται σε σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα η αστοχία υποστυλωμάτων ενισχυμένων με τέτοιου είδους υλικά να πραγματοποιείται όταν τα βέλη είναι μεγάλα.

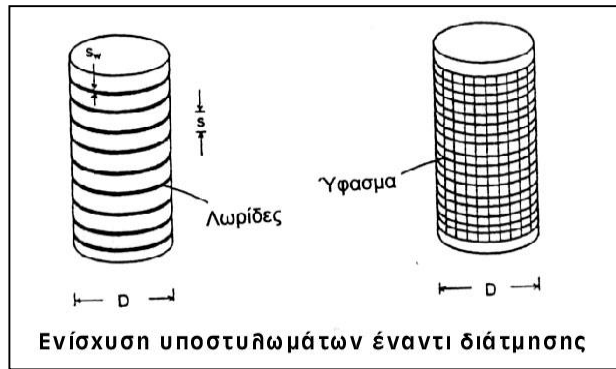
Σήμερα, το πολυμερές που ενισχύεται με ίνες άνθρακα διατίθεται σε δύο τύπους: α) έλασμα και β) ύφασμα. Το έλασμα έχει πάχος 0,5 – 1,5 mm και πλάτος 50 – 300 mm και το ποσοστό των μονοδιάστατων ινών στην εποξειδική ρητίνη είναι 55 με 65 %. Το ύφασμα προέρχεται από μονοδιάστατες ή διδιάστατες ίνες, οι οποίες είναι πιθανό να είναι εμβαπτισμένες σε μήτρα ρητίνης ή όχι. Οι δύο αυτοί τύποι κατασκευάζονται κάτω από αυστηρό ποιοτικό έλεγχο, με



αποτέλεσμα οι ιδιότητές τους να είναι γνωστές με ακρίβεια.

Οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ενισχύονται έναντι κάμψης με σύνθετα υλικά, όταν αυτά τοποθετούνται με εποξειδική κόλλα στην εφελκυστική ζώνη των μελών, με τις ίνες παράλληλα στη διεύθυνση των υψηλών εφελκυστικών τάσεων, δηλαδή στον άξονα μέλους. Αυτό το διαπιστώνουμε στο διπλανό σχήμα, όπου μανδύας από σύνθετο υλικό χρησιμοποιείται για την ενίσχυση υποστυλώματος.

Οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ενισχύονται έναντι διάτμησης με σύνθετα υλικά, όταν αυτά τοποθετούνται με εποξειδική κόλλα στα μέλη και με τη διεύθυνση των ινών τους όσο το δυνατόν παράλληλη στη διεύθυνση των κύριων εφελκυστικών τάσεων. Αυτό το διαπιστώνουμε στο διπλανό σχήμα, όπου λωρίδες κι ύφασμα από σύνθετο υλικό χρησιμοποιείται για την ενίσχυση υποστυλώματος.



Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε αξονικό φορτίο ενός υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με χρήση περίσφιγξης, η οποία επιτυγχάνεται με τοποθέτηση μανδύων από σύνθετο υλικό στην περίμετρο των υποστυλωμάτων, με τις ίνες στην περιμετρική διεύθυνση. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα σύνθετα υλικά κρίνονται ως αποτελεσματικά τόσο σε κυκλικά όσο σε ορθογωνικά υποστυλώματα.

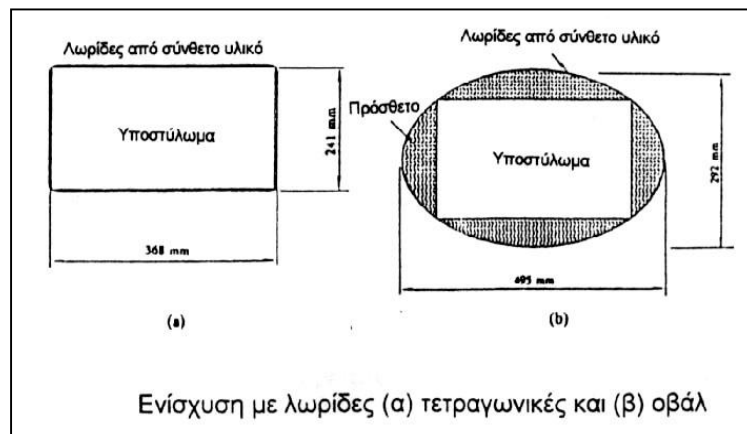
Οι Katsumata, Vochirou και Toshikaza, το 1988, ενίσχυσαν υποστυλώματα οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα. Χρησιμοποιήθηκαν 10 υποστυλώματα κλίμακας 1/4 με τετραγωνική διατομή 200x200 mm. Επειδή η μεταφορά τάσεων μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος γίνεται στις γωνίες, τις στρογγύλευσαν με σκοπό να μειώσουν τις συγκεντρωμένες τάσεις στις ίνες. Στα μισά δοκίμια τοποθετήθηκε λεπτό μονωτικό στρώμα ανάμεσα στο σκυρόδεμα και το σύνθετο υλικό, ενώ στα άλλα μισά το σύνθετο υλικό επικολλήθηκε απ' ευθείας στο σκυρόδεμα με εποξειδική ρητίνη. Παρατηρήθηκε γραμμική αύξηση της τελικής μετατόπισης με την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ινών άνθρακα, ενώ το λεπτό στρώμα δεν επέφερε ουσιαστική διαφορά στην τελική μετατόπιση.

Οι Eshani, EERI και Saadatmanesh, το 1997, προχώρησαν σε πειράματα όπου ενίσχυσαν τυπικά ορθογωνικά υποστυλώματα γέφυρας με λωρίδες σύνθετου υλικού. Κατασκευάστηκαν

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ
R-1	Αναμονές	2,70%	-
R-2	Αναμονές	2,70%	Τετραγωνική
R-3	Συνεχείς ράβδοι	5,45%	-
R-4	Συνεχείς ράβδοι	5,45%	Τετραγωνική
R-5	Συνεχείς ράβδοι	5,45%	Οβάλ

5 υποστυλώματα υπό κλίμακα 1/5 με ανεπαρκή εγκάρσιο οπλισμό και μικρά μήκη αγκύρωσης. Στον παραπάνω πίνακα έχουμε τα χαρακτηριστικά τους και στο σχήμα που ακολουθεί έχουμε τους 2 τύπους λωρίδας που σχεδιάστηκαν για την απαιτούμενη ενίσχυση.

Τα συμπεράσματα των παραπάνω πειραμάτων ήταν η ψαθυρή αστοχία των υποστυλωμάτων χωρίς ενίσχυση, η σημαντική βελτίωση σε αντοχή και πλαστιμότητα των ενισχυμένων υλικών, καθώς και ασήμαντες διαφορές ανάμεσα στους 2 διαφορετικούς τύπους λωρίδας.

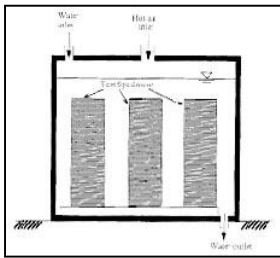


6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ FRP ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Μια από τις χρήσεις των FRPs είναι η ενίσχυση υποστυλωμάτων κατασκευών, οι οποίες βρίσκονται κοντά ή μέσα στη θάλασσα. Η επίδραση δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η επίδραση εναλλαγών υγρού και ξηρού περιβάλλοντος με τη χρήση θαλασσινού νερού, ερευνώνται για τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή, τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων και την πλαστιμότητα δοκιμίων σκυροδέματος τυλιγμένων με φύλλα FRP.

Τα πειράματα που διεξήγαγε ο Houssam Toutanji περιλαμβάνουν τη δημιουργία 36 συνολικά δοκιμίων, τα οποία περιτυλίγονται με στρώσεις μιας διεύθυνσης, οι οποίες αποτελούνται από ίνες άνθρακα (CFRP) και ίνες γυαλιού (GFRP). Σαν σύνδεσμος μεταξύ των φύλλων FRP και του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν δύο εποξειδικές ρητίνες, η Epoxy Type A (modified amine / epoxy resin blend) και η Epoxy Type B (polyxypropylenediamine / epoxy resin).

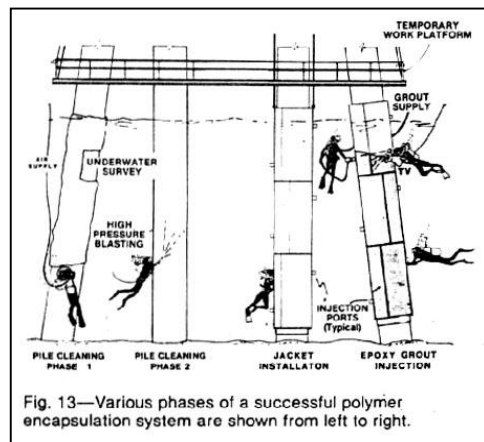
Τα μισά από αυτά τα δείγματα δεν υποβλήθηκαν σε εναλλαγές ξηρού / υγρού περιβάλλοντος, ενώ τα άλλα μισά τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο, όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Εκεί υποβλήθηκαν σε 300 εναλλαγές υγρού και ξηρού περιβάλλοντος. Το νερό περιείχε 35 gr/lt αλάτι, όπως περίπου το θαλασσίνο, ενώ ο ζεστός αέρας ήταν στους 35^o C και είχε 90% υγρασία. Οι μεταβολές της μάζας των δοκιμίων, καθώς και η ταχύτητα παλμού που πέραγε μέσα από αυτά μετριόνταν ανά 30 κύκλους. Στο τέλος των 300 κύκλων εκτιμήθηκε η αντοχή, δυσκαμψία και η πλαστιμότητα αυτών των δοκιμίων κι έγιναν συγκρίσεις με όσα φυλάχτηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.



Γενικά βελτιώθηκε η αντοχή και η πλαστιμότητα των περισφιγμένων δοκιμίων σε σχέση με τα μη περισφιγμένα. Η συγκεκριμένη βελτίωση εξαρτάται από τον τύπο των φύλλων FRP. Για τα δοκίμια που διατηρήθηκαν σε περιβάλλον δωματίου και για τα οποία χρησιμοποιήθηκαν Epoxy Type A και Epoxy Type B μετρήθηκαν περίπου ίδια αποτελέσματα ως προς την αντοχή, την πλαστιμότητα και την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων. Τα δείγματα με GFRP και Epoxy Type A παρουσίασαν μείωση της αντοχής, εξαιτίας των εναλλαγών υγρού και ξηρού περιβάλλοντος, ενώ αντίθετως χρησιμοποιώντας Epoxy Type B είχαμε ως αποτέλεσμα μια αμελητέα απώλεια αντοχής. Τα δείγματα με CFRP ανεξάρτητα από τον τύπο εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε, παρουσίασαν αμελητέα μείωση της αντοχής εξαιτίας των εναλλαγών ξηρού / υγρού περιβάλλοντος. Η έκθεση σε ξηρό / υγρό περιβάλλον δε μετέβαλε την πλαστιμότητα δειγμάτων με CFRP, σε αντίθεση με τα GFRP που παρατηρήθηκε μείωση.

Μια παρόμοια ερευνά έκανε και ο R.Snow για τη συμπεριφορά των FRP στην επιδιόρθωση και ενίσχυση υποστυλωμάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η εργασία αυτή στηρίχθηκε κυρίως σε έρευνα πεδίου και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν βασίστηκαν κυρίως σε οπτικές παρατηρήσεις σε πραγματικές συνθήκες.

Ένα από τα συμπτώματα που παρουσιάστηκαν ήταν η ασυνέχεια της πολυμερικής κόλλας μεταξύ του FRP και του υποστυλώματος. Κυρίαρχη αιτία αυτού του συμπτώματος, ήταν η έκχυση της κόλλας με φορά από πάνω προς τα κάτω στο χώρο μεταξύ FRP και επιφάνειας σκυροδέματος, για την αντιμετώπιση της οποίας καλό θα ήταν ν'



αντιστραφεί η φορά έκχυσης. Αν η έκχυση γίνει από κάτω προς τα πάνω, τότε η πολυμερική κόλλα θα αντικαταστήσει το νερό που υπάρχει στη διεπιφάνεια, σπρώχνοντας το προς τα πάνω, χωρίς να δημιουργηθούν ασυνέχειες.

Μια ακόμη αιτία αστοχίας στη χρήση FRP για την ενίσχυση υποστυλωμάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον, είναι η αδύναμη σύνδεση μεταξύ επιφάνειας FRP - κόλλας και κόλλας - σκυροδέματος. Συνήθως πριν την εφαρμογή των FRP, η επιφάνεια σκυροδέματος καθαρίζεται καλά, έτσι ώστε ν' απομακρυνθούν οι θαλάσσιοι μικροοργανισμοί (marine biofilm), καθώς και τα χαλαρά τμήματα σκυροδέματος. Επίσης, ορισμένοι παρασκευαστές μανδύων FRP φροντίζουν να παραμείνει καθαρή η εσωτερική επιφάνεια των προϊόντων τους με τη χρήση ενός προστατευτικού φύλλου που αφαιρείται λίγο πριν τη χρήση των μανδύων.



Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής από τις πολυμερικές κόλλες. Για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της θερμικής διαστολής και συστολής των υλικών, προτείνεται από τους προμηθευτές τους η εφαρμογή να γίνεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, έτσι ώστε και τα δύο υλικά να βρίσκονται στο μέγιστο βαθμό διαστολής.

Τέλος, από επιτόπιες παρατηρήσεις, παρουσιάστηκαν αστοχίες μανδύων από FRP εξαιτίας της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Ιδιαίτερα ευάλωτα είναι τα πολυμερή με ίνες γυαλιού, γι' αυτό το λόγο προτείνεται η επικάλυψή τους με μπογιά που φιλτράρει τις ακτίνες UV.

7. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η συγκεκριμένη τεχνολογία ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αναπτύχθηκε στα μεγαλύτερα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια των Ηνωμένων Πολιτειών στα μέσα της δεκαετίας του '80, ενώ παράλληλα εφαρμόστηκε σε διάφορα κράτη του εξωτερικού, όπως οι Η.Π.Α., Ο Καναδάς, η Ιαπωνία κ.α.. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό για την αποκατάσταση κι ενίσχυση κατασκευών στις πλέον σεισμογενείς χώρες του κόσμου, όπως οι Δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες (California, Oregon κλπ.), η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία. Μια εταιρεία που παρασκευάζει σύνθετα υλικά είναι και η SP-systems, ενώ μια άλλη που είναι υπεύθυνη για την τοποθέτηση τέτοιου είδους υλικών σε μεγάλα έργα του εξωτερικού είναι η XX-sys, εφαρμογή της οποίας είναι και η εικόνα που παραθέτουμε.

Στην Ελλάδα, η τεχνολογία εισήχθη κι εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Όμιλο exelTEK A.E., στις αρχές του 1998. Η συγκεκριμένη εταιρεία εφάρμοσε τα υψηλής ποιότητας σύνθετα υλικά XL-Wrap (ανθρακούφασματα και υαλοϋφάσματα) στον πρόσφατο καταστροφικό σεισμό της Αθήνας για την ενίσχυση δημοσίων κι ιδιωτικών έργων. Η τεχνολογία σύνθετων υλικών XL-Wrap συνδυάζει μικρό πάχος και βάρος με την υψηλή μηχανική αντοχή, την ταχύτητα εφαρμογής και το μικρό κόστος κι έχει δοκιμαστεί πειραματικά σε πολλά ερευνητικά κέντρα του εξωτερικού, καθώς και σε Ελληνικά Ανώτατα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα και Πολυτεχνεία, ενώ είναι πιστοποιημένα κατά το Σύστημα Ποιότητας ΕΛΟΤ EN ISO 9002.



8. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, όσον αφορά την τεχνική ενίσχυσης με σύνθετα υλικά, το ερώτημα που τίθεται είναι ποιο είναι το κατάλληλο και καλύτερο υλικό ίνας που πρέπει να επιλεγεί στην εκάστοτε περίπτωση που αποφασισθεί η χρήση της. Συνήθως, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα αποτελούν τη βέλτιστη λύση, σε σχέση με τις ίνες γυαλιού, γιατί οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, με αποτέλεσμα ν' απαιτούνται μικρού πάχους μανδύες, καθώς κι εξαιρετική ανθεκτικότητα έναντι διαβρωτικών παραγόντων. Κύριο πλεονέκτημα των ινών με γυαλί αποτελεί το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα αντοχής, το οποίο μάλλον δε θα ισχύει για πολύ καιρό ακόμα, λόγω της ολοένα αυξανόμενης χρήσης ινών άνθρακα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ανάλογη μείωση του κόστους τους.

Τέλος, επιβάλλεται να επισημάνουμε ότι αν γίνει η κατάλληλη επιλογή ινών και πλαστικού, το σύνθετο υλικό που προκύπτει, έχει εντυπωσιακές ιδιότητες, οι οποίες δύσκολα επιτυγχάνονται με χρήση συμβατικών υλικών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες εξέλιξης και βελτιστοποίησης κι αυτό οφείλεται στο μεγάλο αριθμό πιθανών συνδυασμών ινών που μπορούν να επιτευχθούν και στις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού εμφάνισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

- 1. “Σχεδιασμός επεμβάσεων σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Συμπεριφορά τοιχοποιιών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά”**
Α. Τριανταφύλλου, Μάιος 2000, από ημερίδα “Ενίσχυση σκυροδέματος με σύνθετα πολυμερή”
- 2. “Συμπεριφορά υποστυλωμάτων και κόμβων δοκών υποστυλωμάτων ενισχυμένων με σύνθετα υλικά”**
Α. Τσώνος, Μάιος 2000, από ημερίδα “Ενίσχυση σκυροδέματος με σύνθετα πολυμερή”
- 3. “Μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σύνθετων υλικών”**
Σ. Πανταζοπούλου, Μάιος 2000, από ημερίδα “Ενίσχυση σκυροδέματος με σύνθετα πολυμερή”
- 4. “Ενίσχυση υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω υφάσματος με ίνες άνθρακα”**
Διπλ. Εργασία, Ε. Λαμπρινού, Ε.Μ.Π., 1998
- 5. “SP SYSTEMS – Εταιρεία παρασκευής FRP”**
Από την ιστοσελίδα του διαδικτύου: “<http://www.spsystems.com>”
- 6. “XX-sys Technologies, INC.– Εταιρεία τοποθέτησης FRP”**
Από την ιστοσελίδα του διαδικτύου: “<http://www.xxsys.com/>”
- 7. “exelTEK – Ελληνική εταιρεία τοποθέτησης FRP”**
Από cd-rom “Αγορά Μηχανικών 2000 – Αποκατάσταση βλαβών και ενίσχυση σεισμόπληκτων κτιρίων” - Εκδόσεις Bonfire
- 8. “Seismic design and retrofit of bridges”**
M. J. N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi, 1996 – Έκδοση John Wiley & sons, INC.
- 9. “Design equations for axially loaded reinforced concrete columns strengthened with fibre reinforced polymer wraps”**
Therialt M., Neale K.W.
CANADIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING V.27 no.5 pp. 1011-1020 (2000)
- 10. “Structural repair/strengthening of RC columns”**
M. Frangou, K. Pilakoutas, S. Dritsos
CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS V.9 no. 5 pp. 259-266 (1995)
- 11. “Durability characteristics of concrete columns confined with advanced composite materials”**
Houssam A. Toutanji
COMPOSITE STRUCTURES V.44 pp. 155-161 (1999)
- 12. “Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets”**

Burt K. Purba, Aftab A. Mufti

CANADIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING V.26 pp. 590-596 (1999)

13. “Polymer pile encapsulation: factors influencing performance”

Richard K. Snow

CONCRETE INTERNATIONAL pp. 230-236 May 1990