

ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

**ΒΡΥΩΝΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

Περίληψη

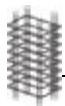
Σε αυτήν την εργασία, αρχικά γίνεται παρουσίαση των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών και των λόγων που μας οδηγούν στη χρησιμοποίησή τους. Στη συνέχεια αναλύεται το θέμα της περίσφιγξης με σύνθετα υλικά, γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος με χρήση FRP και χάλυβα, καθώς αναλύονται και οι διάφορες περιπτώσεις ενίσχυσης υποστυλώματος. Τέλος, αναφέρονται σημαντικοί κανόνες εφαρμογής της περίσφιγξης με σύνθετα υλικά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ζήτημα της ενίσχυσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα απασχολεί πολύ τα τελευταία χρόνια, τους Πολιτικούς Μηχανικούς, όσον αφορά την αρτιότερη αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται στις κατασκευές. Είναι γεγονός πως το πρόβλημα της φθοράς των υπαρχόντων κατασκευών είναι μεγάλο και επομένως είναι αναγκαία η αναζήτηση τρόπων και μεθόδων για την επισκευή και ενίσχυση τους. Σε αρκετές κατασκευές, με την πάροδο του χρόνου, παρουσιάζονται προβλήματα εξ' αιτίας διαφόρων παραγόντων όπως η διάβρωση του οπλισμού, η ελλιπής συντήρηση και ο κακός σχεδιασμός τους, η αύξηση των κινητών φορτίων κ.α. Αν, λοιπόν, στα παραπάνω συνυπολογίσουμε και την επίδραση τυχηματικών παραγόντων, όπως ο σεισμός τότε εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε την μεγάλη ανάγκη της ενίσχυσης των κατασκευών σήμερα. Μία νέα τεχνική ενίσχυσης, που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και στη χώρα μας, βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών (ινοπλισμένων πολυμερών-FRP) σε στοιχεία τα οποία, είτε έχουν υποστεί βλάβες, είτε παρουσιάζουν ανεπάρκεια αντοχής ή πλαστιμότητας. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από συνεχείς ίνες άνθρακα ή γυαλιού ή σπανιότερα αραμιδίου, σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη και διατίθενται σε μορφή δύσκαμπτων "λωρίδων" (πάχους της τάξης 1 mm) ή εύκαμπτων "υφασμάτων" (πάχους της τάξης 0.1-0.4 mm) με ίνες σε μία ή και περισσότερες διευθύνσεις.

2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (FRP) ΑΝΤΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Συμβατικές μέθοδοι ενίσχυσης των κατασκευών θεωρούνται οι μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς και η χρήση μεταλλικών ελασμάτων, μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται πολλά χρόνια. Ο λόγος για την αυξανόμενη χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών, τα τελευταία χρόνια, δεν είναι άλλος από την αντιμετώπιση κάποιων μειονεκτημάτων των παλαιότερων μεθόδων. Γενικά, μπορούμε να αναφέρουμε πως τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν πολύ μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή, μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ελαστικές



παραμορφώσεις, δεν χρειάζονται ειδική προστασία έναντι διάβρωσης, η τοποθέτησή τους είναι εύκολη και διατίθενται σε μεγάλες διαστάσεις.

Αντίθετα, μειονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών είναι η μεγάλη μείωση των ιδιοτήτων τους στις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και το μεγάλο κόστος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Ο τελευταίος παράγοντας είναι και η αιτία, που η μέθοδος με τα σύνθετα υλικά δεν έχει εξαπλωθεί περαιτέρω, παρά την μεγάλη ευκολία τοποθέτησης των ινοπλισμένων πολυμερών.

3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 Γενικές Ιδιότητες

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ανόργανες ή οργανικές ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής (που οφείλεται στην πολύ μικρή διάμετρό τους, της τάξης των 5-25 μm), σε μήτρα από πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κλπ.) και έχουν βάρος ίσο με το 1/4 περίπου του χάλυβα. Το μητρικό υλικό (ρητίνη) έχει πτωχές μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του εξαρτάται από τη διάρκεια και το είδος φόρτισης, καθώς και από τη θερμοκρασία. Για τη συνηθέστερη περίπτωση, που χρησιμοποιούνται συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης σε αναλογία 50-70 % κατ' όγκο, οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών συγκρίνονται ως εξής με αυτές του χάλυβα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.

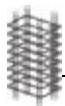
ΙΝΕΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m ³	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (%)
ΧΑΛΥΒΑΣ	7860	200	700-2000	3.5
ΓΥΑΛΙ	2540	50	3500	3
ΑΡΑΜΙΔΗ	1440	65-120	2900	2-3
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	1900	135-190	1800	1-1.5

Πίνακας 1. Τυπικές ιδιότητες ινών και χάλυβα

Από τις παραπάνω ιδιότητες, οι πλέον καθοριστικές για τη διαστασιολόγηση επεμβάσεων είναι το μέτρο ελαστικότητας, E_f , και η εφελκυστική παραμόρφωση θραύσης, ε_{fu} . Επίσης, πρέπει να επισημάνουμε την απουσία πλαστικής διαρροής, που είναι βασικό χαρακτηριστικό του χάλυβα, η οποία οδηγεί τα ινοπλισμένα πολυμερή σε γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους (Σχήμα 1, Τριανταφύλλου, Προηγμένες Τεχνολογίες Υλικών και Κατασκευών, 2001).

Οι παραπάνω ιδιότητες καθορίζονται από τις αντίστοιχες των ινών και του μητρικού υλικού. Ισχύει:

$$E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m$$



όπου : E_m το μέτρο ελαστικότητας του μητρικού υλικού
 E_{fib} το μέτρο ελαστικότητας των ινών
 V_m το ποσοστό κατ'όγκο του μητρικού υλικού
 V_{fib} το ποσοστό κατ'όγκο των ινών

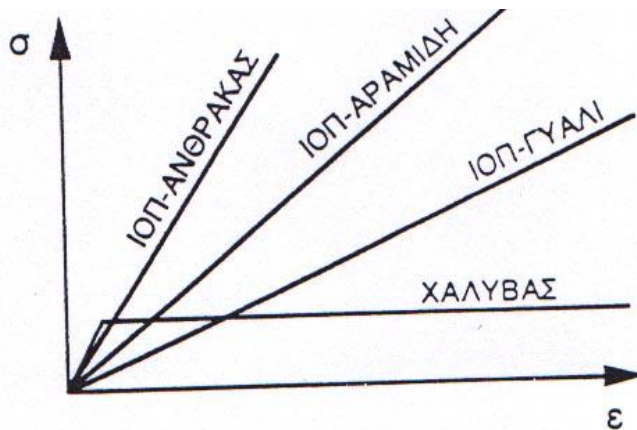
Είναι δηλαδή $V_m + V_{fib} = 1$, και επειδή $E_{fib} \gg E_m$, γίνεται προφανές ότι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού ισούται προσεγγιστικά:

$$E_f \approx E_{fib} V_{fib}$$

Ομοίως, η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού εξαρτάται κυρίως από τις ίνες.

$$f_f \approx f_{fib} V_{fib}$$

Με βάση, λοιπόν τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τις δύσκαμπτες λωρίδες οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι γνωστές εκ των προτέρων βάσει εργαστηριακών μετρήσεων, ενώ για τα υφάσματα, των οποίων ο εμποτισμός με ρητίνη γίνεται επί τόπου, υπάρχει μία σχετική αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ρητίνης, η οποία θα εμποτίσει τις ίνες, και άρα ως προς την τελική περιεκτικότητα ινών στο σύνθετο υλικό.



Σχήμα 1. Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά και χάλυβα σε εφελκυσμό

3.2 Ανθεκτικότητα

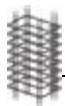
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών στην επίδραση ορισμένων εξωτερικών παραγόντων, όπως:

α) Θερμοκρασία

Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή T_g , η οποία λέγεται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, οι μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης ελαττώνονται σημαντικά. Για θερμοκρασίες 60-80 °C και πάνω μειώνεται κυρίως η ικανότητα της ρητίνης να μεταφέρει φορτία και άρα η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. Γίνεται προφανές, λοιπόν, ότι θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας έναντι των υψηλών θερμοκρασιών.

β) Υγρασία

Τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι της υγρασίας, εκτός κάποιων
Βρυώνης Ανδρέας- Δημόπουλος Γεώργιος



ακραίων περιπτώσεων, όπως διαρκής διαβροχή για μακρό χρονικό διάστημα. Γενικά, οι ίνες άνθρακα είναι εξαιρετικά απρόσβλητες, σε αντίθεση με τις ίνες αραμιδίου και γυαλιού που παρουσιάζουν προβλήματα στην υγρασία.

γ) Υπεριώδης ακτινοβολία.

Γενικά, η επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας περιορίζεται συνήθως στην επιφανειακή στρώση ρητίνης, στην οποία προκαλεί χρωματική αλλοίωση και ίσως μικρορηγματώση. Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού θεωρούνται απρόσβλητα, ενώ ενδεχομένως να παρουσιαστεί μικρή υποβάθμιση των ιδιοτήτων των ινών αραμιδίου.

δ) Αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον

Και σ' αυτήν την επίδραση εξωτερικού παράγοντα συνίσταται η χρήση ινών άνθρακα, καθώς οι ίνες γυαλιού είναι ευπαθείς τόσο σε αλκαλικό όσο και σε όξινο περιβάλλον και χρειάζονται ιδιαίτερη προστασία, όπως π.χ. επιμελημένη εφαρμογή του στρώματος ρητίνης ώστε να απομονώνονται.

ε) Διάβρωση υπό τάση

Η διάβρωση υπό τάση είναι ένα φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζει τις ίνες γυαλιού, η εφελκυστική αντοχή των οποίων μειώνεται χαρακτηριστικά όταν βρίσκονται συνεχώς υπό τάση. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις ενισχύσεων για αλλαγή χρήσης, όχι όμως σε ενισχύσεις έναντι σεισμού, καθώς τα υλικά τότε ενεργοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια του σεισμού, εκτός αν οι ίνες εφαρμοστούν με προένταση.

4. ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ

4.1 Εισαγωγή

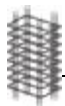
Γενικά η περίσφιγξη εφαρμόζεται σε μέλη που βρίσκονται σε θλίψη, με σκοπό να ενισχυθεί η αντοχή τους, σε περιπτώσεις αντισεισμικής αναβάθμισης να αυξηθεί η πλαστιμότητα τους, να αποτραπεί πιθανός τοπικός λυγισμός των οπλισμών και να βελτιώσει τη συνάφεια σε κρίσιμες περιοχές ενώσεων των οπλισμών με μάλτιση. Επίσης, αποτρέπει την ολίσθηση και την κάμψη της επιμήκους ενίσχυσης. Σε προβλήματα σεισμού, οι υπάρχουσες τεχνικές αναβάθμισης (είτε ενίσχυσης είτε μετασκευής) βασίζονται συνήθως στην αύξηση της πίεσης της περίσφιγξης, είτε της ενδεχόμενης περιοχής πλαστικής άρθρωσης, είτε ολόκληρου του μέλους. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση της αντοχής δεν είναι τόσο σημαντική, όσο η αύξηση της πλαστιμότητας.

Η περίσφιγξη επιτυγχάνεται με τον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος μέσω του μανδύα σύνθετων υλικών. Η αποτελεσματικότητα ενός μανδύα σύνθετων υλικών στον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος, εξαρτάται από το συνολικό πάχος του μανδύα, από την εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου και από τη γεωμετρία της εγκιβωτισμένης διατομής.

4.2 Περισφιγμένο σκυρόδεμα με εξωτερική ενίσχυση FRP κάτω από αξονικό φορτίο

Τα σύνθετα υλικά (FRP), σε αντίθεση με το χάλυβα, έχουν μία ελαστική συμπεριφορά μέχρι την τελική αστοχία και για το λόγο αυτό επιδεικνύουν μία (παθητική) περισφικτική δράση στο σκυρόδεμα κάτω από αξονικό φορτίο με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με το χάλυβα. Στο Σχήμα 1 (σελίδα 10-3) είναι φανερό ότι για μία ορισμένη τιμή της τάσης, ο χάλυβας διαρρέει και από το σημείο αυτό και έπειτα επιδεικνύει μία σταθερή περισφικτική τάση, ενώ το FRP παρουσιάζει μία συνεχώς αυξανόμενη περισφικτική δράση.

Η πίεση της περίσφιγξης εξαρτάται από την πλευρική διαστολή του σκυροδέματος, το οποίο με την σειρά του επηρεάζεται από την πίεση περίσφιγξης. Για το λόγο αυτό, τα

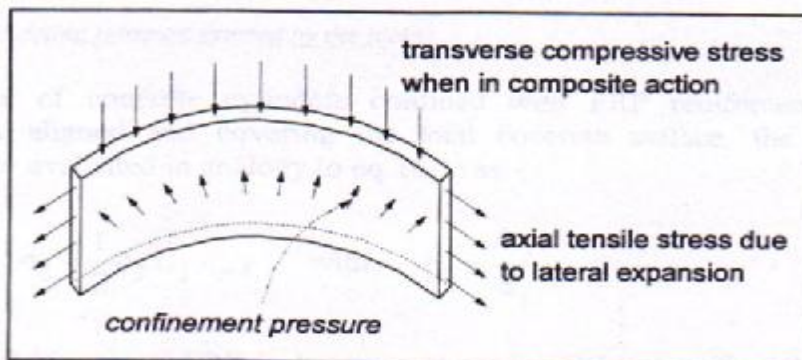


μοντέλα περίσφιξης με FRP, θα πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψη την αλληλεπίδραση μεταξύ του σκυροδέματος και του μέσου περίσφιξης.

4.3 Μέγιστη δραστική περιφερειακή παραμόρφωση

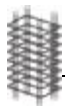
Η μέγιστη αντοχή για το περισφιγμένο σκυρόδεμα σχετίζεται άμεσα με την παραμόρφωση αστοχίας της ενισχυτικής επένδυσης FRP στο περισφιγμένο στοιχείο. Πειραματικές αποδείξεις δείχνουν ότι αυτή η περιφερειακή παραμόρφωση κατά την αστοχία συνήθως συμβαίνει σε παραμορφώσεις μικρότερες από την μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{fu} , η οποία υπολογίζεται εργασιμηριακά σε μία επίπεδη επιφάνεια FRP. Η μείωση αυτή οφείλεται σε ποικίλους λόγους :

- Στην τριαξονική κατάσταση της τάσης στην ενισχυτική επένδυση. Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 2, όπου εισάγεται η ιδέα της σύνθετης δράσης, η οποία δηλώνει την ικανότητα του μανδύα από FRP, να παρέχει εγκάρσια περίσφιξη και ταυτόχρονα, ικανότητα αντοχής σε φορτίο κατά τον επιμήκη άξονα. Η μείωση της εφελκυστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από την κατανομή των ινών και των χαρακτηριστικών συνδέσεων συνάφειας, τα οποία με την σειρά τους εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων (όπως είναι η ακαμψία του σύνθετου υλικού και οι συνθήκες προετοιμασίας της επιφάνειας). Στην περίπτωση όπου δεν συμβαίνει σύνθετη δράση, η επένδυση υπόκειται σε εγκάρσιες παραμορφώσεις και για το λόγο αυτό αστοχεί λόγω εφελκυσμού, εξαιτίας είτε της θραύσης των ινών είτε του διαχωρισμού σε στρώματα μεταξύ των συνδέσεων, με παραμόρφωση ελαφρά μικρότερη από την ϵ_{fu} . Στην περίπτωση της σύνθετης δράσης, η επένδυση υπόκειται ταυτόχρονα σε εγκάρσιες και επιμήκειες παραμορφώσεις. Η απόλυτη παραμόρφωση και τάση τότε ελαττώνονται, με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη ανάπτυξη κάμψης και διαχωρισμού της σε στρώματα. Και για το λόγο αυτό, αστοχία του στοιχείου συμβαίνει ακόμα και σε μικρότερες παραμορφώσεις από ότι στην περίπτωση της μη σύνθετης δράσης.



Σχήμα 2. Τριαξονική κατάσταση τάσης σε μανδύα FRP

- Στην ποιότητα της εκτέλεσης. Αναφέρεται, στην περίπτωση όπου οι ίνες είναι τοποθετημένες με μη αποτελεσματικό τρόπο εξαιτίας των κενών ή της ακατάλληλης προετοιμασίας της επιφάνειας. Τότε ένα μέρος από την περιφερειακή παραμόρφωση χρησιμοποιείται για να τεντώσει τις ίνες. Επίσης, οι ίνες μπορούν να καταστραφούν από άκρα που δεν έχουν στρογγυλευτεί σωστά ή από τοπικές προεξοχές.



- Στο καμπύλο σχήμα της ενισχυτικής επένδυσης, ειδικότερα σε γωνίες με χαμηλές ακτίνες
- Σε επιδράσεις μεγέθους όταν εφαρμόζονται πολλαπλά στρώματα.

Πιο κάτω, η μέγιστη δραστική περιφερειακή παραμόρφωση, που ευθύνεται για όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, θα σημειώνεται ως, ϵ_{ju} (j_jacket). Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλες τιμές της ϵ_{ju} , οι οποίες θα δικαιολογούνται με πειραματική έρευνα, λόγω της μη ύπαρξης συγκεκριμένης πληροφόρησης για το παραπάνω θέμα.

4.4 Πλευρική πίεση περίσφιξης

Για μη αξονική φόρτιση κυλινδρικού στοιχείου, που βρίσκεται περισφιγμένο είτε με κλειστούς συνδετήρες, είτε με σπειροειδή επένδυση, η μέγιστη πίεση περίσφιξης, f_l , υπολογίζεται σαν συνάρτηση του εγκάρσιου ογκομετρικού ποσοστού συνδετήρων ρ_{st} , και της τάσης διαρροής, f_y :

$$f_l = \frac{1}{2} K_e \rho_{st} f_y, \quad \text{όπου} \quad \rho_{st} = \frac{4 \cdot A_{st}}{s \cdot d_s} \quad \text{Εξ. (4-1)}$$

όπου K_e ο συντελεστής επίδρασης, όπου s η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων και d_s η διάμετρος των συνδετήρων.

Για την περίπτωση κυλινδρικών δοκιμών από σκυρόδεμα, περισφιγμένων με μανδύα FRP, με ίνες τοποθετημένες περιφερειακά, που καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια του σκυροδέματος, η πίεση περίσφιξης σ_l , μπορεί να αξιολογηθεί σε αναλογία με την εξίσωση (4-1) όπως:

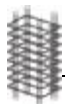
$$\sigma_l = \frac{1}{2} \rho_j \sigma_j = \frac{1}{2} \rho_j E_j \epsilon_j, \quad \text{όπου} \quad \rho_j = \frac{4t_j}{d_j} \quad \text{Εξ. (4-2α)}$$

όπου ρ_j = το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού FRP, σ_j = η τάση στην επένδυση FRP, E_j = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σύνθεσης της επένδυσης, ϵ_j = η περιφερειακή παραμόρφωση σε ένα μανδύα FRP (θεωρούμενο ως ίσο με την πλευρική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα), t_j = το πάχος της επένδυσης FRP και d_j = η διάμετρος της επένδυσης FRP. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι $k_e=1$ αφού ο κύλινδρος είναι ολοκληρωτικά περιβλημένος. Η πίεση περίσφιξης που εξασκείται από τον μανδύα σύνθετων υλικών υπολογίζεται βάση της τάσης $s_j = E_j \epsilon_j \leq f_j = E_j \epsilon_{ju}$, ενώ η μέγιστη πίεση περίσφιξης f_l δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \epsilon_{ju}, \quad \text{Εξ. (4-2β)}$$

4.5 Μοντέλο τάσης-παραμόρφωσης περισφιγμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά

Υπάρχουν αρκετές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν τις σχέσεις τάσης- παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα κάτω πολλαξονικές συνθήκες φόρτισης (Chen et al 1981, CEB 1983, Mander et al, 1988, CEB-FIP 1991). Το πρότυπο του Mander, που βασίζεται σε εκείνο του Popovics (1973), στο οποίο η μέγιστη τάση υπολογίζεται βάση της τάσης λόγω περίσφιξης, έχει αποδειχθεί ως η πιο αποτελεσματική όταν εξετάζεται η μονοαξονική περίπτωση. Πρόσφατα οι μελετητές έχουν κάνει προσπάθειες να επεκτείνουν το μοντέλο αυτό για να προβλέψουν την συμπεριφορά του σκυροδέματος λαμβάνοντας υπ' όψη την περίσφιξη που εφαρμόζεται από τα σύνθετα υλικά. Ένα σημαντικό εμπόδιο στο πρότυπο Popovics- Mander,



είναι ότι βασίζεται σε μία σταθερή τιμή της πίεσης περίσφιγξης κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στην πραγματικότητα, η παθητική περίσφιγξη με FRP, αυξάνει καθώς το σκυρόδεμα επεκτείνεται πλευρικά, και η τιμή της εξαρτάται από το νόμο τάσης – παραμόρφωσης της τεχνικής περίσφιγξης, που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση περίσφιγξης με συνδετήρες από χάλυβα, η υπόθεση σταθερής πίεσης περίσφιγξης είναι ρεαλιστική όταν ο χάλυβας διαρρέυσει. Και για το λόγο αυτό το μοντέλο του Mander αντιπροσωπεύει σωστά την συμπεριφορά του σκυροδέματος περισφιγμένου με χάλυβα (εκτός από την αρχική φάση όταν ο χάλυβας συμπεριφέρεται ακόμα ελαστικά). Αντίθετα, το FRP είναι ελαστικό μέχρι την αστοχία του, και κατόπιν η πίεση που προέρχεται από το εσωτερικό συνεχώς αυξάνει, και έτσι η υπόθεση αυτή δεν είναι κατάλληλη.

4.6 Σύγκριση συμπεριφοράς περισφιγμένου σκυροδέματος με FRP και χάλυβα

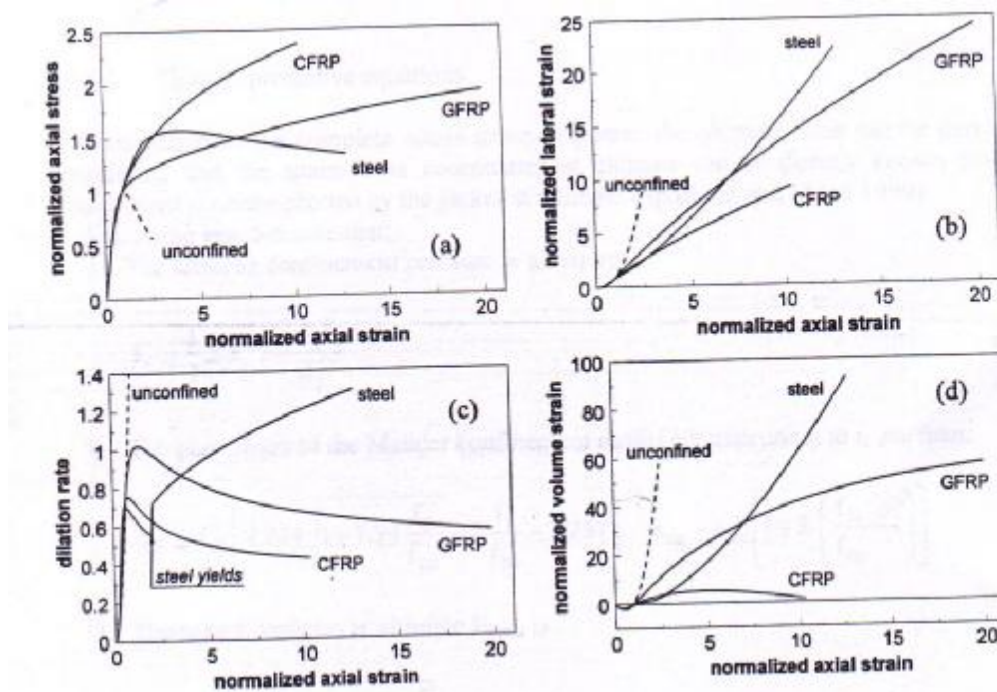
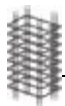
Την συμπεριφορά ενός σκυροδέματος με μανδύα FRP, μπορούμε να τη δούμε στο Σχήμα 3, σε σύγκριση με ένα σκυρόδεμα περισφιγμένο με χάλυβα.

Στο Σχήμα 3a, η αξονική τάση έναντι της αξονικής παραμόρφωσης δείχνει : χάλυβας και CFRP ξεκινούν σχεδόν από το ίδιο σημείο, όμως μετά την διαρροή του χάλυβα στο 2.5 της κανονικοποιημένης αξονικής παραμόρφωσης, κατευθύνεται προς μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης. Το GFRP ξεκινά από το ίδιο σημείο μέχρι που φτάνει την αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος, και μετά το σημείο αυτό, το GFRP διαγράφει μία χαμηλότερη κλίση από το CFRP, οδηγώντας σε υψηλότερες αξονικές παραμορφώσεις.

Στο Σχήμα 3b, παρουσιάζεται η πλευρική παραμόρφωση έναντι της αξονικής παραμόρφωσης. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η κλίση των καμπυλών εξαρτάται από τον τύπο του μέσου περίσφιγξης. Το GFRP ξεκινά από μία υψηλότερη κλίση (που σημαίνει ότι το σκυρόδεμα έχει υψηλότερη αρχική πλευρική διαστολή), η οποία όμως παραμένει σταθερή μέχρι την αστοχία του μανδύα. Το CFRP μειώνει την αρχική πλευρική παραμόρφωση, αλλά η αποτελεσματικότητά του όμως έχει μικρή διάρκεια εξ' αιτίας της μικρής εφελκυστικής παραμόρφωσής θραύσης του.

Στο Σχήμα 3c, η ταχύτητα διαστολής εκφράζεται σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση. Η ταχύτητα διαστολής $m = \Delta \epsilon_l / \Delta \epsilon_c$ ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας αύξησης της πλευρικής παραμόρφωσης $\Delta \epsilon_l$ προς την αντίστοιχη αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης $\Delta \epsilon_c$. Έχει αποδειχθεί ότι όταν ο χάλυβας διαρρέει συμβαίνει μία ασυνέχεια, εξ' αιτίας της απότομης μεταβολής του συντελεστή. Μετά από αυτό η ταχύτητα διαστολής αυξάνει αόριστα. Από την άλλη μεριά, για τα δύο FRP, η ταχύτητα διαστολής ελαττώνεται σταθερά προς μία ασυμπτωτική τιμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θέση του σημείου, από το οποίο ξεκινά η δράση της περίσφιγξης να γίνεται αποτελεσματική (κάτι που συμβαίνει, όταν οι καμπύλες αποχωρίζονται από το μη περισφιγμένο) εξαρτάται από την ακαμψία του μέσου περίσφιγξης. Όπως φαίνεται το GFRP –περισφιγμένο σκυρόδεμα αποχωρίζεται αργότερα από τις άλλες δύο. Αυτό είναι το σημείο όπου μία μεγάλη πλευρική πίεση αναπτύσσεται έτσι που να εμποδίζει την πλευρική διαστολή του σκυροδέματος με τη δημιουργία παραμορφώσεων.

Στο Σχήμα 3d, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε την τιμή της παραμόρφωσης έναντι της αξονικής παραμόρφωσης. Στην καμπύλη από μανδύα CFRP, η ογκομετρική παραμόρφωση αρχικά μειώνεται, όπως αναμενόταν, μέχρι που επιστρέφει στο μηδέν. Στη συνέχεια, αυξάνεται και πέρα από ένα επίπεδο αξονικής παραμόρφωσης, η συνεχώς αυξανόμενη πίεση περίσφιγξης μειώνει την ογκομετρική επέκταση και αντιστρέφει την κατεύθυνσή της.



Σχήμα 3. Σύγκριση συμπεριφοράς σκυροδέματος περισιγμένο με χάλυβα (steel), FRP με ίνες άνθρακα (CFRP), FRP με ίνες γυαλιού (GFRP).
a) Αξονική τάση με αξονική παραμόρφωση
b) Πλευρική παραμόρφωση με αξονική παραμόρφωση
c) Ταχύτητα διαστολής με αξονική παραμόρφωση
d) Όγκος παραμόρφωσης με αξονική παραμόρφωση

4.7 Εξισώσεις πρόβλεψης χαρακτηριστικών του FRP-περισφιγμένου σκυροδέματος

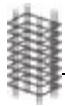
Η αστοχία περισιγμένου σκυροδέματος με μανδύα από FRP, αναγνωρίζεται όταν ισχύει η συνθήκη $\epsilon_l = \epsilon_{ju}$, που σημαίνει ότι η πλευρική παραμόρφωση του σκυροδέματος φτάνει τη μέγιστη επιτρεπτή παραμόρφωση του υλικού FRP και ο μανδύας καταρρέει. Οι συντεταγμένες τάσης – παραμόρφωσης στο στάδιο της αστοχίας, μπορούν να βρεθούν απευθείας από την πίεση της περίσιγξης που εξασκείται από το μανδύα στο μέγιστο σημείο παραμόρφωσης (Spoelstra – Monti 1999).

Στη συνέχεια, δίνονται εξισώσεις που προβλέπουν τα χαρακτηριστικά του περισιγμένου με σύνθετα υλικά σκυροδέματος.

1. Η μέγιστη πίεση περίσιγξης δίνεται από τον τύπο:

$$f_i = \frac{1}{2} \rho_j \quad f_j = \frac{2 \cdot t_j \cdot f_j}{d_j} \quad \text{Εξ. (4-9)}$$

2. Η αντοχή του περισιγμένου σκυροδέματος και η αντίστοιχη παραμόρφωση στο σημείο αυτό είναι :



$$f_{cc} = f_{co} \left(2,254 \sqrt{1 + 7,94 \cdot \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1,254 \right), \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad \text{Εξ. (4-10)}$$

όπου: f_{co} η αντοχή του μη περισφιγμένου σκυροδέματος και ε_{co} η αντίστοιχη παραμόρφωση .

3. Ο συντελεστής τέμνουσας στο σημείο μέγιστης παραμόρφωσης $E_{sec,u}$ είναι:

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2 \cdot b \cdot e_{ju}} = \frac{E_c}{1 + 2 \cdot b \cdot f_j / E_j} \quad \text{Εξ. (4-11)}$$

όπου: $\beta = \frac{5700}{\sqrt{|f_{co}|}} - 500$ και E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

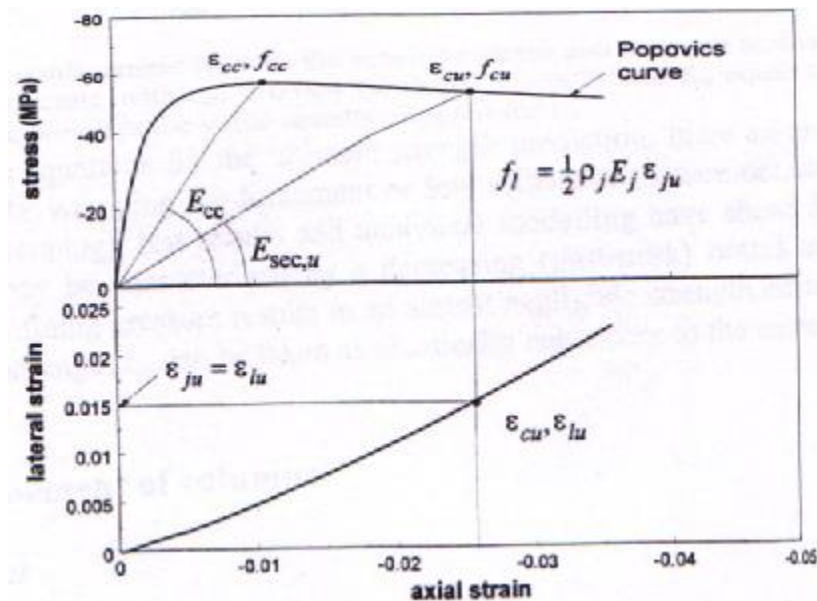
4. Το σημείο τομής της ευθείας γραμμής με την κλίση $E_{sec,u}$, με την καμπύλη, σχήμα 4, δίνει την παραμόρφωση που ψάχνουμε και την τάση για την μέγιστη αυτή τιμή.

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} \left[\frac{E_{cc} \cdot (E_c - E_{sec,u})}{E_{sec,u} \cdot (E_c - E_{cc})} \right]^{1 - E_{cc}/E_c}, \quad f_{cu} = E_{sec,u} \varepsilon_{cu} \quad \text{Εξ. (4-12)}$$

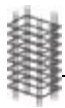
όπου $E_{cc} = f_{cc} / \varepsilon_{cc}$

5. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4-11) στην εξίσωση (4-12) το παραπάνω παίρνει την μορφή :

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} \left(\frac{2 \cdot b \cdot e_{ju} \cdot E_{cc}}{E_c - E_{cc}} \right)^{1 - E_{cc}/E_c}, \quad f_{cu} = \frac{E_c \cdot e_{cu}}{1 + 2 \cdot b \cdot e_{ju}} \quad \text{Εξ. (4-13)}$$



Σχήμα 4. Υπολογισμός για την μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση – τάση



$$f_i = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} \quad \text{Εξ. (5-3)}$$

όπου με ε_{ju} συμβολίζεται η μέγιστη περιφερειακή παραμόρφωση κατά την αστοχία της FRP επένδυσης.

5.2 Επίδραση μερικής επένδυσης

Στην περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι μερικώς περισφιγμένο, η αποτελεσματικότητα της περισφιγξης δεν είναι τόσο μεγάλη, καθώς υπάρχουν τόσο ενισχυμένη όσο και μη ενισχυμένη ζώνη, (Σχήμα 6). Σ' αυτήν την περίπτωση η πίεση περισφιγξης υπολογίζεται από την εξίσωση (5-1) εισάγοντας ένα συντελεστή αποδοτικότητας της περισφιγξης, ($K_e \leq 1$), στον τύπο για την ακαμψία της FRP-ένισχυσης:

$$K_{conf} = \frac{1}{2} K_e \rho_j E_j \quad \text{Εξ. (5-4)}$$

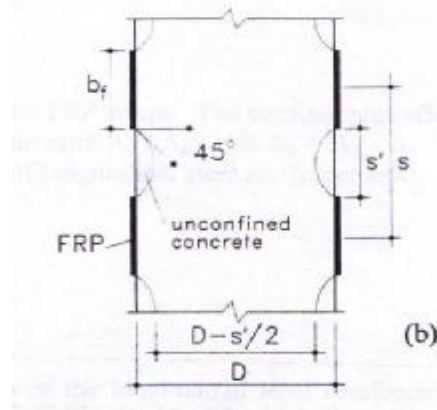
Ο συντελεστής αποδοτικότητας χρησιμοποιείται γιατί θεωρείται ότι η περισφιγξη δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική σε όλη τη διατομή, μεταξύ των περισφιγμένων ζωνών. Η μη ενισχυμένη περιοχή περιγράφεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, από μία παραβολή με αρχική κλίση 45° . Επομένως, μεταξύ δύο διαδοχικών ζωνών ενίσχυσης, η περιοχή επίδρασης της περισφιγξης δίνεται από τον τύπο:

$$A_c = \frac{P}{4} \left(D - \frac{s'}{2} \right)^2 \quad \text{Εξ. (5-5)}$$

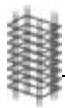
όπου $s' = s - b_f$ είναι το καθαρό άνοιγμα μεταξύ των διαδοχικών ζωνών ενίσχυσης. Στη συνέχεια, ο υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης K_e , που βρίσκεται αφού υπολογιστεί πρώτα το κλάσμα A_e/A_c , όπου $A_c = A_g - A_s$.

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D} \right)^2}{1 - r_{sg}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot D} \right)^2 \quad \text{Εξ. (5-5)}$$

όπου: $r_{sg} = A_s/A_g$, είναι ο λόγος ενίσχυσης, ο λόγος δηλαδή του εμβαδού οπλισμού χάλυβα (συνδετήρες) προς το εμβαδό της διατομής.



Σχήμα 6. Επίδραση μερικής ενίσχυσης με FRP



5.3 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών

Όταν οι ίνες εφαρμόζονται με ελικοειδή διάταξη, η περίσφιγξη του υποστυλώματος είναι λιγότερο αποτελεσματική στην παρεμπόδιση διόγκωσης του σκυροδέματος. Όμοια, με την προηγούμενη παράγραφο, εισάγεται ένας μειωτικός συντελεστής. Υποθέτοντας ομοιόμορφη εφελκυστική δύναμη N_f στο FRP, η πίεση περίσφιγξης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{l,h} = \frac{N_f}{b_f \cdot R} \quad \text{Εξ. (5-6)}$$

όπου R η καμπυλότητα της ελικοειδούς ενίσχυσης

$$R \approx \frac{k^2 + r^2}{r} \quad \text{Εξ. (5-7)}$$

με $k = p/2\pi$, p είναι το βήμα της έλικας και r η ακτίνα της.

Με ένα παρόμοιο τρόπο, εξάγεται ότι η πίεση περίσφιγξης που εξασκείται από μία κυκλική FRP ενίσχυση είναι:

$$\sigma_{l,c} = \frac{N_f}{b_f \cdot r} \quad \text{Εξ. (5-8)}$$

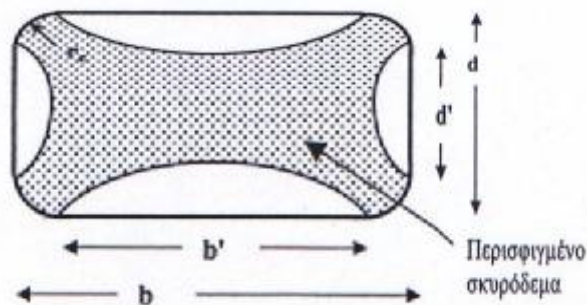
Βάσει των εξισώσεων (5-6)-(5-8), ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης k_e , μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$K_e = \frac{S_{l,h}}{S_{l,c}} = \left[1 + \left(\frac{p}{p \cdot D} \right)^2 \right]^{-1} \quad \text{Εξ. (5-9)}$$

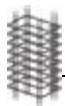
5.4 Επίδραση του σχήματος του υποστυλώματος

Η μορφή του σχήματος του υποστυλώματος έχει άμεση επίδραση στην αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση ορθογωνικών υποστυλωμάτων, στα οποία η εφαρμογή της τεχνικής ενίσχυσης είναι λιγότερο αποδοτική απ' ό,τι στα κυκλικά. Στα ορθογωνικά υποστυλώματα απαιτείται πριν την ενίσχυση κατάλληλη εξομάλυνση των γωνιών, έτσι ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα.

Για τετραγωνικά ή ορθογωνικά υποστυλώματα, λοιπόν, ενισχυμένα με FRP (Σχήμα 7), με στρογγυλεμένες γωνίες ακτίνας r_c , θεωρούμε πάλι ότι ισχύει η υπόθεση της παραβολικής δράσης πλήρους περίσφιγξης στην διατομή του υποστυλώματος. Αντίθετα, με μία κυκλική διατομή, η οποία είναι ολοκληρωτικά περισφιγμένη, στην περίπτωση ορθογωνικής διατομής, ένα τμήμα της παραμένει μη περισφιγμένο.



Σχήμα 7. Αποτελεσματικά περισφιγμένους πυρήνας για μη κυκλικές διατομές



Παίρνοντας το σύνολο των διάφορων παραβολών, η συνολική περιοχή του μη περισφιγμένου σκυροδέματος δίνεται από το τύπο :

$$A_u = \sum_{i=1}^4 \frac{(w_i')^2}{6} = \frac{b'^2 + d'^2}{3} \quad \text{Εξ. (5-9)}$$

όπου w_i' είναι η καθαρή απόσταση μεταξύ των στρογγυλεμένων γωνιών και $b' = b - 2 r_c$. Λαμβάνοντας υπ' όψη την το κλάσμα $(A_c - A_u)/A_c$, ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περισφιγξης k_e , δίνεται από το τύπο :

$$K_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 \cdot A_g \cdot (1 - r_{sg})} \quad \text{Εξ. (5-10)}$$

Όμοια με την εξίσωση (5-1) για κυκλική διατομή, οι πιέσεις περισφιγξης που προκαλούνται από την επένδυση FRP σε μία τετραγωνική ή ορθογωνική διατομή δίνονται από τις σχέσεις :

$$\sigma_{ix} = K_{confx} \varepsilon_{ju} \quad \text{όπου : } K_{confx} = \rho_{jx} K_e E_j$$

$$\sigma_{iy} = K_{confy} \varepsilon_{ju} \quad \text{όπου : } K_{confy} = \rho_{jy} K_e E_j \quad \text{Εξ. (5-11)}$$

όπου τα κλάσματα r_{jx} και r_{jy} , αποτελούν το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού της εγκάρσιας περισφιγτικής ενίσχυσης στην κατεύθυνση x και y , και δίνονται από:

$$\rho_{jx} = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_j}{s \cdot d} \quad \text{και : } \rho_{jy} = \frac{2 \cdot b_f \cdot t_j}{s \cdot b} \quad \text{Εξ. (5-12)}$$

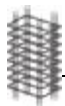
Τα παραπάνω εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η διατομή δεν είναι δυνατόν να γίνει κυκλική. Στην περίπτωση των ορθογωνικών υποστυλωμάτων, που οι γωνίες τους έχουν διαδοχικά στρογγυλοποιηθεί, ο μανδύας έχει μία μεταβαλλόμενη ακτίνα καμπυλότητας σε διαφορετικές κατευθύνσεις φόρτισης. Έτσι, λοιπόν, αν πάρουμε τις μέσες ακτίνες των κύριων καμπύλων, είναι δυνατόν να εξαχθεί μία ισοδύναμη διάμετρος κυκλικού υποστυλώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η δραστηκή πλευρική πίεση περισφιγξης $S_{l,eff}$ που εξασκείται από το μέσο περισφιγξης, εξισώνεται με την πίεση περισφιγξης S_l , και με τον ίδιο τρόπο, η μέγιστη πίεση περισφιγξης $f_{l,eff}$, εξισώνεται με την f_l .

6. ΚΑΝΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Κάποιοι σημαντικοί κανόνες για την εφαρμογή και αποτελεσματικότητα της περισφιγξης με σύνθετα υλικά αναφέρονται παρακάτω.

α) Απαιτείται επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας που πρόκειται να γίνει επικόλληση των σύνθετων υλικών, όπως αφαίρεση των χαλαρών τμημάτων και πλήρωση των ρωγμών. Για τα εύκαμπτα υφάσματα θα πρέπει η εφαρμογή των υλικών να πραγματοποιείται, έτσι ώστε, οι ίνες να είναι απόλυτα ευθύγραμμες.

β) Για την ανάληψη των πρόσθετων εντατικών μεγεθών, τα σύνθετα υλικά δρουν μόνο ως εφελκόμενος οπλισμός, παραλαμβάνοντας δυνάμεις μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών.



γ) Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων του σύνθετου υλικού μετά από κάποιο όριο δεν συνεπάγεται βελτίωση της ενίσχυσης. Έχει βρεθεί ότι ο μέγιστος αριθμός στρώσεων FRP, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα στοιχείο πρέπει να είναι μικρότερος από 20 ή αλλιώς όπως προτείνεται από τον προμηθευτή των υλικών.

δ) Χρήσιμη, επίσης, θεωρείται η δημιουργία ασυνεχειών κατά την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών, για λόγους εξάτμισης.

ε) Στα εύκαμπτα υφάσματα, οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνονται βάσει της ονομαστικής διατομής των υφασμάτων και όχι του “τελειωμένου” σύνθετου υλικού, λόγω της σχετικής αβεβαιότητας ως προς το βαθμό εμποτισμού της ρητίνης, η οποία εφαρμόζεται επί τόπου.

στ) Επισημαίνεται ότι για υποστυλώματα με ορθογωνικές διατομές, στα οποία ο λόγος των οριζοντίων διαστάσεων είναι μεγαλύτερος από 1.5, η δράση του εγκιβωτισμού είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

7. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη σημερινή εποχή, ο μηχανικός έχει στη διάθεσή του μία ενδιαφέρουσα τεχνική ενίσχυσης που χαρακτηρίζεται από ευκολία εφαρμογής και αποτελεσματικότητα, αρκεί η εφαρμογή της να γίνεται άρτια από την πλευρά της “μηχανικής” και επιμελημένα από την πλευρά του εργατικού προσωπικού.

Ένα βασικό ερώτημα που τίθεται συνήθως είναι η επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση, τύπου ινών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η παράμετρος που καθορίζει το σχεδιασμό μιας επέμβασης είναι η δυστένεια του υλικού, δηλαδή το γινόμενο $E_f t_f$. Έτσι ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού των ινών αποτελεί το κόστος για δεδομένη δυστένεια. Άλλες παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν υπ’ όψιν είναι το κόστος των εργατικών, το οποίο αυξάνει με τον αριθμό των στρώσεων, η αποδοτικότητα των πολλαπλών στρώσεων, η οποία δεν είναι ανάλογη από τον αριθμό των στρώσεων και η ανθεκτικότητα της ενίσχυσης σε διάρκεια.

Είναι γεγονός ότι σήμερα τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και σε περισσότερες εφαρμογές λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων και της ευκολίας εφαρμογής τους. Όμως, δεν θεωρούμε πως θα αντικαταστήσουν ολοκληρωτικά τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές ενίσχυσης, αλλά θα συνυπάρχουν μ’ αυτές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Τριανταφύλλου Θ.Χ. ,(2001)
“ Προηγμένες Τεχνολογίες Υλικών και Κατασκευών ”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- fib ,(2001)
“ Externally Bonded FRP Reinforcement for Reinforced Concrete Structures ”, technical report, bulletin 14.
- Τριανταφύλλου Θ.Χ ,(2000)
“ Ενισχύσεις Κατασκευών Με Σύνθετα Υλικά ” ,Πρακτικά Ημερίδας ΤΕΕ 18 Μαΐου 2000.