

Η Χρήση των Συνθέτων Υλικών στο Σχεδιασμό και την Ενίσχυση Στοιχείων Ο.Σ.

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΚΑΡΑΜΠΙΝΗΣ
Καθηγητής Π.Σ./Δ.Π.Θ.

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Π.Σ./Δ.Π.Θ.

Περίληψη

Η εξέλιξη στην τεχνολογία των συνθετικών ινοπλισμένων υλικών έχει δώσει ποικιλία προϊόντων που μπορούν να συνδυασθούν με τα συμβατικά δομικά υλικά στην κατασκευή και ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται το θέμα του σχεδιασμού στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό από σύνθετα υλικά μέσα στο πλαίσιο του γενικώς αποδεκτού ικανοτικού σχεδιασμού, όπου η διαφοροποίηση του σχεδιασμού προκύπτει από τη μεγάλη αντοχή και την ψαθυρότητα του συνθετικού υλικού στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Διερευνάται η περίπτωση της ορθής έντασης στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Ιεραρχούνται οι μορφές αστοχίας, προσδιορίζεται εκ νέου η έννοια της «ισόρροπης αστοχίας» και εντοπίζονται εναλλακτικοί μηχανισμοί ανελαστικής παραμόρφωσης στο συνθετικό οπλισμένο στοιχείο από σκυρόδεμα. Εξετάζονται οι περιπτώσεις ενσωματωμένου συνθετικού οπλισμού (νέες κατασκευές) αλλά και η ενίσχυση υπαρχόντων συμβατικά οπλισμένων στοιχείων με επικάλυψη από εξωτερικές συνθετικές ταινίες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα υλικά, που χρησιμοποιούνται σήμερα ως οπλισμός σε δομικά έργα, έχουν δοκιμασθεί για δεκαετίες στην αεροναυπηγική, όπου συχνά θεωρούνται υλικά επιλογής, αφού χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή και πολύ μικρό ειδικό βάρος σε σχέση με τα μέταλλα. Διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (της τάξεως 500 – 2000 MPa), ικανοποιητική δυσκαμψία, δεν προσβάλλονται από τους συνήθεις παράγοντες διάβρωσης του χάλυβα, είναι μαγνητικώς αδρανή και διατίθενται σε ποικίλα σχήματα και είδη διατομών, τα οποία μπορούν να καλύψουν μεγάλο φάσμα πρακτικών εφαρμογών. Η μεγάλη καθυστέρηση και η διστακτικότητα, με την οποία γίνονται αποδεκτά στα έργα πολιτικού μηχανικού, οφείλονται στο μέχρι πρότινος μεγάλο κόστος τους αλλά και στην έλλειψη ενός κατάλληλου πλαισίου κανονισμών για σχεδιασμό με τα υπόψη υλικά. Σήμερα το κόστος των υλικών

αυτών μειώνεται σημαντικά, καθώς διευρύνεται το πεδίο εφαρμογών τους, ενώ παράλληλα σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες έχει ήδη δημοσιευθεί ο πρώτος κύκλος διατάξεων σχεδιασμού δομικών έργων από σκυρόδεμα με συνθετικό οπλισμό, με πρωτοπόρες την Ιαπωνία (όπου η ανάπτυξη, η παραγωγή και η χρήση των συνθετικών δομικών υλικών βρίσκονται σε έξαρση), την Αμερική και τον Καναδά (όπου συντελείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα στο αντικείμενο αυτό με επιλεγμένες πιλοτικές εφαρμογές).

Ένα επιπλέον κίνητρο για την αντικατάσταση (πλήρως ή μερικώς) του μεταλλικού με οπλισμό από σύνθετα υλικά είναι η σωρεία των προβλημάτων που εμφανίζουν τα δομικά έργα υποδομής στις ανεπτυγμένες χώρες (γέφυρες, κτίρια στάθμευσης οχημάτων, εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων κ.ά.) από τη διάβρωση του σιδηρού οπλισμού. Το ετήσιο κόστος επισκευής και συντήρησης των έργων αυτών έχει λάβει τέτοιες απαγορευτικές διαστάσεις, ώστε το κριτήριο της ανθεκτικότητας, αντί αυτού της αντοχής, να προσδιορίζει σε πολλές περιπτώσεις τις ανάγκες του σχεδιασμού.

Ο οπλισμός από σύνθετα υλικά είναι γνωστός ως FRP (Fiber Reinforced Plastic), γιατί κατασκευάζεται από ίνες εμποτισμένες από ειδικές εποξειδικές ρητίνες (οι ρητίνες αναφέρονται και ως μήτρα - matrix). Το υλικό των ινών είναι είτε γραφίτης (carbon) είτε αραμίδιο (aramid) είτε βασάλτης (basalt) είτε αντιαλκαλικό γυαλί (AR-glass), κατά κανόνα ισχυρότερο από αυτό του χάλυβα. Οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος, όμως, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από αυτές της ρητίνης. Οι ρητίνες, που χρησιμοποιούνται, είναι εποξειδικές (epoxy), πολυεστερικές (polyester), βινυλεστερικές (vinyl-ester) και πολυεθυλενικές (polyethylene). Πρόκειται δηλαδή για υλικά που αποτελούνται από δύο φάσεις, όπου οι ίνες (1η φάση) παρέχουν την αντοχή και η μήτρα (2η φάση) παρέχει τη συνεκτικότητα στο συνθετικό προϊόν. Οι ίνες γυα-

λιού και αραμιδίου παρουσιάζουν μικρότερο κόστους σε σχέση με το γραφίτη, αλλά έχουν και χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Για την κατασκευή ράβδων οπλισμού τα υλικά αυτά συνδυάζονται με κατάλληλες μητρικές ρητίνες (vinylester thermosetting) με ανθεκτικότητα έναντι διαβρωτικών χημικών παραγόντων και έναντι κρούσης. Η μεθοδολογία παραγωγής του τελικού προϊόντος ποικίλλει ανάλογα με τις πρώτες ύλες, τις επιθυμητές ιδιότητες και τη μορφή του τελικού προϊόντος. Χαρακτηριστικές τιμές για τις ιδιότητες των ινών δίνονται στον πίνακα 1.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

$A_{s1}, A_{s2}, A_F =$	εμβαδόν εφελκόμενου, θλιβόμενου και οπλισμού από σύνθετο υλικό αντίστοιχα,
$b, b_F =$	πλάτος διατομής στοιχείου και σύνθετου υλικού,
$D =$	διάμετρος κυκλικού δομικού στοιχείου,
$d =$	στατικό ύψος διατομής (απόσταση μεταξύ εφελκόμενου οπλισμού και ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος),
$d_1, d_2 =$	πάχος επικάλυψης εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα (μέχρι το κέντρο βάρους των ράβδων οπλισμού),
$\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2} =$	ανηγμένες παραμορφώσεις εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα,
$\varepsilon_{cu} =$	οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος,
$E, E_F =$	μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος και υλικού σύνθετου οπλισμού,
$F_c =$	δύναμη στη θλιβόμενη ζώνη της διατομής,
$F_{s2} =$	δύναμη στο θλιβόμενο οπλισμό,
$F_{s1} =$	δύναμη στον εφελκόμενο οπλισμό,
$F_F =$	εφελκυστική δύναμη του FRP,
$f_F^{eff}, \varepsilon_F^{eff} =$	μέγιστη τάση και αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση του οπλισμού από σύνθετο υλικό στην οριακή κατάσταση αστοχίας του δομικού στοιχείου,
$G =$	μέτρο διατμήσεως,
$h =$	συνολικό ύψος διατομής,
$\mu, \nu =$	αδιάστατα (ανηγμένα) μεγέθη αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής,
$\xi_{lim} =$	ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης στην ισορροπία κατάσταση,
$\tau_{adh}^u, \tau_{cov}^u =$	διατμητική αντοχή του συνδετικού υλικού (κόλλας) και του υποστρώματος (σκυρόδεμα επικάλυψης),
$\tau_b =$	τάση συνάφειας μεταξύ εσωτερικού οπλισμού και σκυροδέματος,
$t_F =$	πάχος σύνθετου στοιχείου εξωτερικής ενίσχυσης,

$\varepsilon_{ct}^0 =$	αρχική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος στην ακραία εφελκόμενη ίνα,
$u_{INT} =$	περίμετρος διατομής ράβδου οπλισμού από σύνθετο υλικό,
$L_{anch} =$	ενεργό μήκος αγκύρωσης,
$M_d, M_{sd} =$	τιμές ροπής σχεδιασμού ως προς το κέντρο βάρους της διατομής και του εφελκόμενου οπλισμού αντίστοιχα.

3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Ο οπλισμός από σύνθετα υλικά διατίθεται με τη μορφή ράβδων, πλεγμάτων, ελασμάτων, ινοϋφασμάτων και τενόντων προεντάσεως. Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες αυτών των στοιχείων ποικίλλουν ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και συνήθως δίδονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Για παράδειγμα, οι συνήθεις ράβδοι οπλισμού από γραφίτη (carbon) έχουν χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή από 1300-2000 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 100 – 130 GPa και παραμόρφωση θραύσης 1.3%. Οι αντίστοιχες τιμές για ράβδους αραμιδίου (aramid) είναι 1300 MPa, 60 GPa και 2%, ενώ για ράβδους από ίνες αντιαλκαλικού γυαλιού (AR-glass) κυμαίνονται από 400-800 MPa, 30 – 40 GPa και 1.3%-2% αντίστοιχα [3], [5], [7], [10].

Η αντοχή και η δυσκαμψία των στοιχείων του οπλισμού αυτού εξαρτώνται από τον τύπο και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών (συνήθως της τάξεως του 60%), την κλίση των ινών ως προς τον κύριο εφελκυστικό άξονα, το σχήμα της διατομής του τελικού προϊόντος και τη μήτρα συνοχής. Η σχέση εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για τα περισσότερα σύνθετα προϊόντα είναι γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση (σχήμα 1). Για τις ράβδους σύνθετου οπλισμού τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος σε αξονική θλίψη είναι παρόμοια με αυτά σε εφελκυσμό, η αντοχή όμως είναι μικρότερη σε θλίψη. Παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε εγκάρσια πίεση (ορθογώνια προς την κατεύθυνση των ινών), της τάξεως του 30% της κύριας εφελκυστικής αντοχής. Για το λόγο αυτό οι διατάξεις του συμβατικού ικανοτικού σχεδιασμού, που βασίζονται στη δράση βλήτρου του οπλισμού, πρέπει να ληφθούν με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας, όταν ο κύριος οπλισμός του στοιχείου είναι μη μεταλλικός (για παράδειγμα η συμμετοχή του σκυροδέματος, V_c , στη διατμητική αντοχή V_{Rd3}). Ο συντελεστής θερμικής διαστολής ράβδων FRP κατά την εγκάρσια διεύθυνση καθορίζεται από αυτόν της συνεκτικής μήτρας που συχνά είναι 5-8 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του σκυροδέματος, ενώ κατά τη διεύθυνση των ινών (ράβδων) εξαρτάται από τον τύπο των ινών. Άρα η αλληλεπίδραση των υλικών σε συνθήκες θερμοκρασιακών μεταβο-

λών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, ενώ στην περίπτωση του συμβατικού οπλισμού αυτή η εντατική κατάσταση γενικά αγνοείται (αφού ο χάλυβας και το σκυρόδεμα είναι θερμοκρασιακά συμβατά).

Τα ελάσματα, οι ταινίες και τα ινοϋφάσματα είναι διδιάστατα προϊόντα (έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις άλλες τους διαστάσεις) και η κύρια μηχανική λειτουργία τους είναι σε επίπεδη ένταση. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα εύχρηστα, επειδή είναι εύκαμπτα και έχουν ελάχιστο βάρος, ενώ συνδυάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και δυσκαμψία στο επίπεδό τους και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται κυρίως για εξωτερική ενίσχυση δομικών στοιχείων (μανδύες). Αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως ExFRPs (Externally-bonded Fibre Reinforced Plastics), γιατί επικολλούνται εξωτερικά στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται είτε ως πρόσθετος εφελκυστικός ή και διατμητικός οπλισμός (δοκοί και τοιχοποιία), είτε ως οπλισμός περισφιγξης σε στοιχεία με σημαντικές θλιπτικές τάσεις (μανδύες αντί σπειροειδών συνδετήρων).

Συνήθως τα υλικά αυτά είναι ορθοτροπικά (ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους), με μία κύρια και μία δευτερεύουσα κατεύθυνση αντοχής και δυσκαμψίας. Για παράδειγμα, είναι συνήθης η χρήση διαφορετικού τύπου ινών στην κύρια από τη δευτερεύουσα κατεύθυνση δράσης του συνθετικού στοιχείου (π.χ. το E-glass TYFO-Fibrewrap σύστημα έχει αντιαλκαλικές ίνες γυαλιού στην κύρια κατεύθυνση και ίνες αραμιδίου στην ορθογώνια κατεύθυνση [1]). Οι μηχανικές ιδιότητες του μανδύα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διατμητική αντοχή του υποστρώματος, καθώς και την ελαστικότητα και αντοχή της κόλλας που τον συγκρατεί στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Έτσι οι προδιαγραφές, που συνήθως συνοδεύουν τα υλικά από τον κατασκευαστή, μπορεί να αφορούν είτε τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού ως απομονωμένη μονάδα είτε αυτές του συστήματος “σύνθετο υλικό – κόλλα”. Στη συνέχεια, αναφέρονται ενδεικτικά οι μηχανικές ιδιότητες ορισμένων από τα ινοϋφάσματα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε δημοσιευμένες πιλοτικές εφαρμογές [1], [4], [5], [8], [9], [13]. Για παράδειγμα, οι ταινίες γυαλιού (E-glass) και γραφίτη έχουν χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή (με 5% πιθανότητα υποσκελισμού) 1500 MPa και 2400-3500 MPa αντίστοιχα, μέτρο ελαστικότητας 69 GPa και 150-370 GPa, παραμόρφωση θραύσης 2.1% και 1.5%-0.8%, και πάχος σκληρυμένης στρώσης περίπου 1mm. Οι αντίστοιχες ιδιότητες της κόλλας είναι 20-50 MPa, 2.5-12 GPa και 2.5%. Για το σύστημα TYFO fibrewrap και για κύριες ίνες τύπου E-glass η εφελκυστική αντοχή είναι 550 MPa, το μέτρο ελαστικότητας 27 GPa, η παραμόρφωση θραύσης 2% και το πάχος της σκληρυμένης στρώσης περίπου 1.3 mm, ενώ για κύριες ίνες από γραφίτη η εφελκυστική αντοχή είναι 1000 MPa, το μέτρο ελαστικότητας 68 GPa, η

παραμόρφωση θραύσης 1.2% και το πάχος της σκληρυμένης στρώσης 1mm. Οι αντίστοιχοι συντελεστές θερμικής διαστολής είναι $7.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ για ίνες από γυαλί και $0.43 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ για αντίστοιχες από γραφίτη.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ FRP'S ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Από την ποικιλία των προϊόντων FRP το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής έχουν οι εύκαμπτες ταινίες και τα σύνθετα υφάσματα, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για επισκευή και βελτίωση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα και πεσσών άοπλης τοιχοποιίας. Ο οπλισμός τοποθετείται έτσι, ώστε η κύρια αντοχή του να αναπτύσσεται στην κατεύθυνση της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης. Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή είναι η ενίσχυση μέσω περισφιγξης (μανδύας) υποστυλωμάτων γεφυρών, τα οποία είτε έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό είτε έχει διαγνωσθεί ανεπάρκεια πλαστικότητας (σχήμα 2). Σύνθετοι μανδύες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και για την ενίσχυση στοιχείων που έχουν υποστεί διάβρωση οπλισμού. Σημειώνεται εδώ ότι η μέγιστη εγκάρσια πίεση περισφιγξέως, σ_{lat} που επιβάλλει ο μανδύας σε αυτή την περίπτωση, είναι (σχήμα 2):

$$\sigma_{\text{lat}} = 2 \times F_F^u \times n/D \quad (4.1)$$

όπου:

F_F^u = η αντοχή μιας στρώσης του σύνθετου προϊόντος στην κύρια κατεύθυνση σε μονάδες δύναμης ανά μονάδα πλάτους της στρώσης,

n = ο αριθμός των στρώσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί, και D = η διάμετρος του αρχικού στοιχείου.

Η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου πυρήνα υπερβαίνει την αρχική, απερίσφιγκτη τιμή κατά $\lambda \times (\sigma_{\text{lat}})^m$ (όπου $\lambda = 2.5-3.0$ και $m \approx 0.7$) με αντίστοιχη αύξηση της ικανότητας για παραμόρφωση. Με δεδομένη την ευκολία τοποθέτησης, χωρίς καμία παρέμβαση στην εξωτερική γεωμετρία του στοιχείου (η μεταβολή των διαστάσεων είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών), είναι επόμενο ότι οι σύνθετοι μανδύες αποτελούν πολύ αποτελεσματικότερη λύση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς μανδύες για τα υποστυλώματα. Για την ενίσχυση του διαμήκους οπλισμού υποστυλωμάτων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν επίσης διαμήκειες ταινίες FRP εσωτερικά των μανδύων. Άλλες γνωστές εφαρμογές ενίσχυσης είναι οι εξής (σχήμα 3): (α) χρήση ταινιών ExFRP στην εφελκυστική ζώνη καμπτικών στοιχείων ως πρόσθετος εφελκυστικός οπλισμός, (β) χρήση ταινιών ExFRP καθ' ύψος του κορμού δοκών ως πρόσθετος διατμητικός οπλισμός και (γ) επικόλληση ταινιών στην επιφάνεια άοπλης τοιχοποιίας για ενίσχυση έναντι κάμψης και διάτμησης των πεσσών (π.χ. για επισκευή ή αντισεισμική αναβάθμιση). Η πρώτη χρησιμοποιείται

συχνά, είτε αν ο υπάρχων οπλισμός έχει απομειωθεί από διάβρωση, είτε γιατί απαιτείται αναβάθμιση της φέρουσας ικανότητας του στοιχείου. Στη δεύτερη και τρίτη περίπτωση, οι ταινίες λειτουργούν ως ελκυστήρες του ιδεατού δικτύωματος, με το οποίο παραλαμβάνεται η τέμνουσα από το στοιχείο (σε αναλογία με το δίκτυωμα Mörsch, σύμφωνα με το οποίο το σκυρόδεμα και η τοιχοποιία, που είναι ασθενή σε εφελκυσμό, λειτουργούν ως θλιπτήρες, οι δε διαμήκεις και εγκάρσιοι οπλισμοί ως ελκυστήρες). Απαραίτητη προϋπόθεση για την ενεργοποίηση του μηχανισμού ελκυστήρων του ιδεατού δικτύωματος αποτελεί η αγκύρωση των ταινιών στη θλιβόμενη ζώνη.

5. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ FRP-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στην περίπτωση των συνθέτων ράβδων οπλισμού (που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα ως υποκατάστατα του συμβατικού μεταλλικού οπλισμού) η συνεργασία των ράβδων με το περιβάλλον σκυρόδεμα εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας της ράβδου. Λόγω της χαμηλής διατμητικής αντοχής των FRP's, οι κατασκευαστές συνθέτων ράβδων έχουν υιοθετήσει διάφορες μεθόδους για την επίτευξη τραχύτητας ή και μηχανικής αγκύρωσης στο σκυρόδεμα με: (α) επίχριση της επιφάνειας της ράβδου με χονδρόκοκκη άμμο για αύξηση του συντελεστή τριβής, (β) δημιουργία νευρώσεων με ελικοειδή περιτύλιξη καλωδίων FRP κατά μήκος της ράβδου (οι νευρώσεις στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι είτε προεξοχές είτε εγκοπές), (γ) δημιουργία νευρώσεων με έκχυση ινοπλισμένης ρητίνης (οι νευρώσεις στην περίπτωση αυτή έχουν τη μορφή προεξοχών). Σημειώνεται εδώ ότι οι νευρώσεις τύπου (β) είναι βέλτιστες, όταν έχουν τη μορφή εγκοπών, γιατί μειώνουν το μέγεθος των τάσεων διαρρήξεως και δίνουν ευνοϊκή συμπεριφορά ως προς την ικανότητα παραμόρφωσης του οπλισμένου στοιχείου. Αντίθετα, όταν έχουν τη μορφή προεξοχών, η αστοχία συνήθως επικεντρώνεται στο FRP με τη μορφή διατμητικής αποκόλλησης της ελικοειδούς καλωδιακής νευρώσης [12].

Η σχέση μεταξύ τάσεως συνάφειας (τ_b) και σχετικής ολίσθησης (s) καθορίζεται σύμφωνα με την εκάστοτε περίπτωση του χρησιμοποιούμενου FRP. Γενικώς αυξάνεται η αντοχή και μειώνεται η πλαστιμότητα από την περίπτωση (α) προς την (γ), αλλά τα γενικά χαρακτηριστικά του διαγράμματος τ_b - s είναι παρόμοια με αυτά του συμβατικού οπλισμού (δηλαδή ανιών κλάδος με φθίνουσα κλίση) μέχρι τη μέγιστη αντοχή συνάφειας, ακολουθούμενος από οριζόντιο κλάδο που αντιστοιχεί σε αυξανόμενη ολίσθηση υπό σταθερή αντίσταση $\tau_{b,max}$, και τέλος, φθίνων κλάδος με προϊούσα ολίσθηση [12] (σχήμα 4).

Για την περίπτωση ελασμάτων και ταινιών από σύνθετα υλικά, η βασική παράμετρος, που προσδιορίζει την ποιότητα

της συνεργασίας με το σκυρόδεμα, είναι το συνδετικό υλικό (κόλλα) και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και του FRP. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς, ενσωματωμένους οπλισμούς, τα εξωτερικά ελάσματα και οι ταινίες παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες ως προς τις μορφές αστοχίας της διεπιφάνειας. Κατ' αρχάς η αποκόλλησή τους συνήθως ξεκινά από τα άκρα (σημεία απότμησης), όταν αυτά ευρίσκονται στο εσωτερικό του ανοίγματος λόγω συγκέντρωσης διατμητικών και ορθών τάσεων [2], [9], [13]. Σημειώνεται ότι το FRP λειτουργεί ως ελκυστήρας σε όλο το μήκος του και για το λόγο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη πρόβλεψη στα σημεία αγκύρωσης. Η εξασφάλιση του ελάσματος / ταινίας έναντι αποκόλλησης στα άκρα γίνεται με την επιβολή εγκάρσιας πίεσης (μέσω ενσωματωμένων διατμητικών συνδέσμων ή με χρήση εξωτερικών συνδέσμων σχήματος U, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε μεταλλικοί είτε από FRP και, προκειμένου να είναι αποτελεσματικοί, πρέπει να επεκτείνονται μέχρι τη θλιβόμενη ζώνη του στοιχείου, όπου και αγκυρώνονται). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται εκατέρωθεν καμπτικών ρωγμών που έχει όμως συνέπειες σχετικά περιορισμένης εμβέλειας (εκτός αν πρόκειται για την περίπτωση ανοίγματος καμπτοδιατμητικών ρωγμών σε προηγμένο στάδιο παραμορφώσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφική αποκόλληση του FRP).

Η εξασφάλιση της αγκύρωσης του ExFRP έτσι, ώστε αυτό να μπορεί να αναπτύξει ένα σημαντικό μέρος της εφελκυστικής του αντοχής, είναι κρίσιμη για την επιτυχία της ενίσχυσης. Επειδή πλέον η αγκύρωση είναι μεταξύ ταινίας και υποστρώματος (σκυροδέματος ή τοιχοποιίας), ο κύριος μηχανισμός αστοχίας σχετίζεται με τη διατμητική αντοχή της επικάλυψης του υποστρώματος (αστοχία από διαγώνιο εφελκυσμό στη στρώση σκυροδέματος μεταξύ υπάρχοντος οπλισμού και προστιθέμενου εξωτερικού FRP) και δευτερευόντως με αποκόλληση του ExFRP (σχήμα 5). Οι μηχανισμοί αυτοί αποτελούν την αχίλλειο πτέρνα του όλου συστήματος και είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί σε εφαρμογές ενίσχυσης του τύπου αυτού θραύση του FRP από υπέρβαση της κύριας εφελκυστικής του αντοχής. Μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί ότι το FRP αναμένεται να αναπτύξει ως μέγιστη τάση και μέγιστη παραμόρφωση αντίστοιχα $f_F^{eff} = \alpha f_F^u$ και $\epsilon_F^{eff} = \alpha \epsilon_F^u$ όπου ο συντελεστής $\alpha < 1$ είναι συνάρτηση της αντοχής της αγκύρωσης [13]. Η μέγιστη τάση του σύνθετου υλικού στη φάση της αστοχίας f_F^{eff} μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ελάχιστης τιμής των:

$$f_F^{eff} = \min \{ f_F^u, \frac{1}{\gamma} (\tau_{cov}^u, L_{anch}), \frac{1}{\gamma} (\tau_{adh}^u, L_{anch}) \} \quad (5.1)$$

όπου:

f_F^u = τάση αστοχίας του FRP,

$\tau_{adh}^u L_{anch}, \tau_{cov}^u L_{anch}$ = μέγιστη διατμητική δύναμη (μέση τάση $\times$ ενεργό μήκος αγκυρώσεως) του συνδετικού υλικού

(κόλλας) και του σκυροδέματος του υποστρώματος (επικάλυψη).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως η αστοχία του υποστρώματος αλλά και του συνδετικού υλικού παρουσιάζεται ψαθυρή, οπότε ισχύουν:

$$\gamma_{cov}^u \approx \gamma_{cov}^y, \gamma_{adh}^u \approx \gamma_{adh}^y \text{ και } \tau_{cov}^u \approx \tau_{cov}^y, \tau_{adh}^u \approx \tau_{adh}^y \quad (5.2)$$

Συνήθως η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή του υποστρώματος, οπότε η αστοχία συνήθως αφορά το υπόστρωμα και σπάνια το συνδετικό υλικό. Όμως, η εκδοχή της αστοχίας του συνδετικού υλικού συμπεριλαμβάνεται σε αυτή την εργασία για λόγους πληρότητας.

Ειδικά για συνθετικούς μανδύες από ινοϋφάσματα η αγκύρωση επιτυγχάνεται με υπερκάλυψη (εδώ το υπόστρωμα είναι επίσης FRP και συνεπώς η αστοχία αναμένεται στο στρώμα της κόλλας – σχήμα 3). Σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνουν οι κατασκευαστές, αυτή κυμαίνεται από 150 έως 300 mm (το μέγεθος αυξάνει σε συνάρτηση με την αξονική εφελκυστική αντοχή αυτών των υλικών, εφόσον το μήκος της υπερκάλυψης πρέπει να αναπτύξει την αντοχή του μανδύα μέσω των διατμητικών τάσεων στο στρώμα της κόλλας).

6. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ - Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Πρωταρχικό στόχο στο πλαίσιο του ικανοτικού σχεδιασμού (capacity design approach) αποτελεί η ιεράρχηση των οριακών καταστάσεων αστοχίας έτσι, ώστε να εξασφαλίζεται πλάστιμη συμπεριφορά του στοιχείου ή του συνόλου της κατασκευής. Μέχρι σήμερα, ο δομικός χάλυβας (οπλισμός στοιχείων από σκυρόδεμα) θεωρείτο κομβικό σημείο για την υλοποίηση του ικανοτικού σχεδιασμού, επειδή διαθέτει το χαρακτηριστικό της σαφούς διαρροής. Με τη διαρροή ο χάλυβας αρχίζει να αναπτύσσει ανελαστικές παραμορφώσεις χωρίς περαιτέρω αύξηση της αναλαμβανόμενης δύναμης, πράγμα το οποίο, σε περιπτώσεις όπως η κάμψη, εξασφαλίζει στο σκυρόδεμα ένα άνω όριο για την απαίτηση σε αντοχή της θλιβόμενης ζώνης.

Σε στοιχεία όπου έχει αντικατασταθεί ο μεταλλικός οπλισμός με αντίστοιχο σύνθετο ελαστικό οπλισμό, δεν είναι δυνατή η παραπάνω υλοποίηση του ικανοτικού σχεδιασμού, λόγω της βασικής διαφοράς της μηχανικής συμπεριφοράς των δύο αυτών υλικών. Στον σύνθετο οπλισμό η δύναμη αυξάνεται γραμμικά για όλο το διάστημα των παραμορφώσεων (σχήμα 1) και άρα δεν είναι δυνατή η εκ των προτέρων οριοθέτηση της απαίτησης για αντοχή στην αντίστοιχη θλιβόμενη ζώνη (σχήμα 6). Η ίδια δυσκολία υπάρχει και σε

στοιχεία σκυροδέματος με συμβατικό μεταλλικό οπλισμό, τα οποία ενισχύονται εξωτερικά με προσθήκη συνθέτων ταινιών. Στην πράξη και εφόσον δεν έχει προηγηθεί αστοχία του μηχανισμού συνεργασίας FRP σκυροδέματος, η συμπεριφορά στην οριακή κατάσταση αστοχίας αντιστοιχεί σε αυτή μιας συμβατικά οπλισμένης διατομής πάνω από το σημείο της ισόρροπης κατάστασης (σχήμα 7), ασχέτως του εμβαδού του συνθετικού οπλισμού που τελικά τοποθετείται. Είναι απαραίτητη λοιπόν η πρόβλεψη / δημιουργία μιας άλλης τεχνητής “δικλείδας ασφαλείας – fuse”, η οποία θα περιορίσει την απαίτηση για περαιτέρω αύξηση των δυνάμεων/ παραμορφώσεων στη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί:

- (1) Με τον κατάλληλο σχεδιασμό μηχανισμού πλάστιμης ανελαστικής δραστηριότητας (controlled bond) στη διεπιφάνεια του σύνθετου οπλισμού έτσι, ώστε να δημιουργούνται πρακτικά συνθήκες συμπεριφοράς παρόμοιες με αυτές της διαρροής του συμβατικού οπλισμού.
- (2) Με την πρόβλεψη μεγίστων επιτρεπομένων τάσεων ή παραμορφώσεων, οι οποίες θα αναφέρονται στην οριακή κατάσταση αστοχίας του σκυροδέματος, μέθοδος που στην ουσία θα αποτελούσε υβριδικό συνδυασμό της πρότερης και της ισχύουσας φιλοσοφίας του σχεδιασμού (μέθοδοι επιτρεπομένων τάσεων και ικανοτικού σχεδιασμού).

Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται την πρώτη επιλογή που θεωρείται περισσότερο συμβατή με το ισχύον φιλοσοφικό πλαίσιο σχεδιασμού. Για να περιορισθεί το μέγεθος της δύναμης που εισάγεται στον οπλισμό από σύνθετο υλικό ή την αντίστοιχη ταινία ενίσχυσης, χρησιμοποιείται ως ασφαλιστική δικλείδα ο μηχανισμός συνεργασίας σκυροδέματος – σύνθετου οπλισμού. Ανάλογα με την περίπτωση η συνεργασία των δύο υλικών εξασφαλίζεται είτε από τις δυνάμεις συνάφειας (αν πρόκειται για σύνθετες ράβδους οπλισμού, σχήμα 8) είτε από τη διατμητική αντοχή του υποστρώματος (επικάλυψη), αν πρόκειται για σύνθετες ταινίες ενίσχυσης (σχήμα 9).

7. ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Οι πιθανές καταστάσεις αστοχίας σε ένα στοιχείο οπλισμένο με FRP είναι οι παρακάτω:

- 1) Θραύση στη θλιβόμενη ζώνη.
- 2) Αστοχία της διεπιφάνειας.
- 3) Τοπική αστοχία του κορμού σε διαγώνιο εφελκυσμό.
- 4) Αποκόλληση στο άκρο της αγκύρωσης του FRP.
- 5) Αστοχία του σύνθετου υλικού.
- 6) Αστοχία από υπερβολικό βέλος κάμψης.

Οι δύο πρώτες οριακές καταστάσεις εξασφαλίζονται, εφόσον βέβαια διατίθεται ένα ικανό (μη μηδενικό) διάστημα

πλαστικής συμπεριφοράς στο χαρακτηριστικό διάγραμμα διατμητικών τάσεων παραμορφώσεων του υλικού της διεπιφάνειας (τμήμα ΒΓ στο σχήμα 10). Ανεπιθύμητες μορφές αστοχίας είναι οι (3), (4), και (5) λόγω του ψαθυρού τους χαρακτήρα. Κυρίαρχη μορφή αστοχίας από υπερβολικό βέλος κάμψης (περίπτωση 6) είναι αποδεκτή και ιδιαίτερα επιθυμητή, εφόσον όμως έχουν εξασφαλισθεί οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας. Όμως, η πραγματοποίησή της είναι δυνατή, μόνον αν το σύστημα της διεπιφάνειας επιτρέπει μεγάλες ολισθήσεις χωρίς σημαντική απώλεια αντοχής, το οποίο είναι σχετικά σπάνια περίπτωση, αφού η ολίσθηση κατ' ανάγκη προέρχεται από τοπική αστοχία είτε του σκυροδέματος (επικάλυψη) είτε της εποξειδικής κόλλας που παρεμβάλλεται ($\gamma_{eff}^u \approx \gamma_{eff}^v$). Σημειώνεται εδώ ότι, εφόσον ο σύνθετος οπλισμός δεν διαρρέει, είναι σημαντικό στο σχεδιασμό εξωτερικών ενισχύσεων να εξετασθεί η πιθανή τροποποίηση της ιεράρχησης των μορφών αστοχίας που είχε αρχικά υιοθετηθεί. Οι ανεπιθύμητοι μηχανισμοί, που ενδέχεται να προκύψουν, συμπεριλαμβάνουν: (α) θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη (γιατί πλέον το στοιχείο συμπεριφέρεται ως υπεροπλισμένο, ιδιαίτερα για επαρκώς αγκυρωμένο FRP), (β) διατμητική αστοχία του κορμού του στοιχείου και (γ) θραύση του FRP από λειτουργία βλήτρου (αν κατά την ενίσχυση αναβαθμισθεί μόνον η καμπτική αντοχή χωρίς παράλληλη αναβάθμιση της διατμητικής).

8. ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΚΑΜΨΗ

8.1. Δομικό στοιχείο με εσωτερικό οπλισμό από FRP

Για τις περιπτώσεις δομικών στοιχείων με εσωτερικό οπλισμό από FRP, τα οποία υπόκεινται σε κάμψη, οι βασικές παραδοχές είναι οι ίδιες με αυτές για συμβατικά οπλισμένα στοιχεία (επιπεδότητα διατομών, αγνόηση της εφελκυστικής δύναμης του σκυροδέματος). Επιπλέον, και σε αναλογία με το συμβατικό οπλισμό, θεωρούμε ως διαρροή του εφελκυσμένου συστήματος την αξονική παραμόρφωση του FRP, ϵ_F^{eff} , η οποία αντιστοιχεί στη διατμητική “διαρροή” της διεπιφάνειας:

$$\epsilon_F^{eff} = \frac{f_F^{eff}}{E_F} = \frac{\tau_b \cdot L_{anch} \cdot u_{INT}}{E_F \cdot A_F} \quad (8.1)$$

Για απλότητα, θεωρούμε ότι το χαρακτηριστικό διάγραμμα διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων είναι πλήρως ελαστοπλαστικό. Πριν τη “διαρροή”, οι ορθές παραμορφώσεις σκυροδέματος, ϵ_{cl} , και σύνθετου οπλισμού, ϵ_F , θεωρούνται συμβατές. Μετά τη “διαρροή”, η εξίσωση του συμβιβαστού συμπεριλαμβάνει και την ανηγμένη ολίσθηση της διεπιφάνειας (ανά μονάδα μήκους):

$$s = \epsilon_c - \epsilon_F^{eff} \quad (8.2)$$

Ο υπόλοιπος σχεδιασμός σε κάμψη ακολουθεί την ίδια διαδικασία με αυτή των στοιχείων με συμβατικό οπλισμό, με τη διαφορά ότι αντί για την τάση σχεδιασμού του χάλυβα f_{yd} χρησιμοποιούμε το όριο $f_{F,d}^{eff} = f_F^{eff} / \gamma_F$ σύμφωνα με την εξίσωση 5.1 και θεωρώντας $\gamma_F = \gamma_c$, επειδή η αστοχία της διεπιφάνειας ή του υποστρώματος (σκυροδέμα) ελέγχει τη δύναμη σχεδιασμού του FRP.

Για την ισόρροπη κατάσταση (αστοχία σκυροδέματος και “διαρροή” εφελκυσμένου FRP) ισχύουν:

- Ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης ξ_{lim}

$$\xi_{lim} = \frac{0,0035}{0,0035 + \epsilon_F^{eff}} \quad (8.3)$$

- Εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων

$$0,8 \times 0,85 f_{cd} \times \xi_{lim} b d = \epsilon_F^{eff} \cdot E_F \cdot A_F = f_{F,d}^{eff} \cdot A_F \quad (8.4)$$

- Ισοδύναμο ανηγμένο εμβადόν του σύνθετου οπλισμού ρ_{bal}

$$\rho_{F,bal} = \frac{A_F}{b d} = 0,682 \xi_{lim} \frac{f_{cd}}{f_F^{eff}} = \quad (8.5)$$

$$= 0,682 \xi_{lim} \frac{f_{cd} A_F}{\tau_b \cdot L_{anch} \cdot u_{INT}}$$

Οπότε η αντιστοιχούσα στην ισόρροπη κατάσταση ανηγμένη τιμή ροπής για μονό οπλισμό προκύπτει από τη σχέση:

$$M_d = \frac{M_d}{b d^2 f_{cd}} = \rho_F \frac{f_{F,d}^{eff}}{f_{cd}} \left[1 - 0,58 \rho_F \frac{f_{F,d}^{eff}}{f_{cd}} \right] \leq \mu_{bal} \quad (8.6)$$

όπου το μ_{bal} είναι συνάρτηση της αντοχής όχι μόνο του FRP αλλά και της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας (σχήμα 2).

8.2. Ενίσχυση με επικόλληση FRP εξωτερικά του στοιχείου

Σε στοιχεία με συμβατικό (εσωτερικό) οπλισμό και ενίσχυση με επικόλληση ExFRP, εκτός από τις προηγούμενες παραδοχές, γίνονται επιπλέον και οι εξής:

- Η ταινία έχει εξασφαλισθεί στα άκρα έναντι αποκόλλησης, ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη αγκύρωση που θα επιτρέπει στο σύστημα δοκός – FRP να λειτουργήσει σε κάμψη στην οριακή κατάσταση αστοχίας.
- Το πάχος του στοιχείου ενίσχυσης είναι σημαντικά μικρότερο του ύψους της διατομής του στοιχείου από σκυροδέμα ($t_F \ll h$).

Η διαφορά μεταξύ ανηγμένης παραμόρφωσης ακραίας εφελκυστικής ίνας σκυροδέματος και FRP (ϵ_{cl}^0) οφείλε-

ται σε αρχική παραμόρφωση του σκυροδέματος πριν την επικόλληση του FRP.

- Το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης ξ πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στα όρια:

$$\xi_{FRP,bal} < \xi < \frac{0.0035}{0.0035 + 0.002} = 0.64$$

Το κάτω όριο της ανισότητας εξασφαλίζει έναντι της πρώιμης αστοχίας του συστήματος FRP – κόλλας – επικάλυψης (βλέπε εξίσωση 5.1). Το αντίστοιχο άνω όριο εξασφαλίζει τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα. (Θεωρείται ως προϋπόθεση για την ενίσχυση ότι έχει εξαντληθεί η φέρουσα ικανότητα του εφελκόμενου συμβατικού οπλισμού).

Από την εξίσωση της ισορροπίας δυνάμεων στη διατομή (σχήμα 11) ισχύει:

$$\Sigma F = F_c + F_{s2} - F_{s1} - F_F = 0 \quad (8.7)$$

όπου:

F_c = δύναμη στη θλιβόμενη ζώνη της διατομής,

F_{s2} = δύναμη στο θλιβόμενο οπλισμό,

F_{s1} = η δύναμη του εφελκόμενου οπλισμού,

F_F = εφελκυστική δύναμη FRP.

Για την ισόρροπη κατάσταση οι όροι της εξίσωσης 10 διαμορφώνονται ως εξής:

$$\bullet F_c = \alpha \cdot \beta \cdot f_{cd} \cdot \xi_{lim} \cdot b \cdot d = 0.80 \times 0.85 f_{cd} \cdot \xi_{lim} \cdot b \cdot d \quad (8.8)$$

$$\bullet F_{s2} = A_{s2} \cdot f_{yd} \quad (8.9\alpha) \text{ (για διαρροή του θλιβόμενου οπλισμού) είτε}$$

$$\bullet F_{s2} = A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} \quad (8.9\beta) \text{ (πριν τη διαρροή του θλιβόμενου οπλισμού)}$$

$$\bullet F_{s1} = A_{s1} \cdot f_y \quad (8.10)$$

$$\bullet F_F = f_{F,d}^{eff} \cdot A_F, \text{ όπου } f_{F,d}^{eff} = f_F^{eff} / \gamma_F \quad (8.11)$$

$$\varepsilon_F^{eff} = \frac{f_F^{eff}}{E_F} = \min \left\{ \frac{f_F^u}{E_F}, \frac{\tau_{adh}^y \cdot L_{anch}}{E_F \cdot t_F}, \frac{\tau_{cov}^y \cdot L_{anch} \cdot b_F}{E_F \cdot t_F \cdot b} \right\} \quad (8.12)$$

$$\xi_{lim} = \frac{x}{h + \frac{t_F}{2}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_F^{eff} + \varepsilon_{ct}^0} \quad (8.13)$$

όπου $\varepsilon_{cu} = 0.0035$

Η εξίσωση της ισορροπίας των ροπών λαμβάνεται ως προς το κέντρο βάρους του εφελκόμενου οπλισμού. Οπότε από τη μεταφορά των δυνάμεων του FRP στη θέση του συμβατικού οπλισμού προκύπτει ότι η ροπή σχεδιασμού M_{sd} ισούται με:

$$M_{sd} = M_d + F_F \cdot \left(d_1 + \frac{t_F}{2} \right) \quad (8.14)$$

όπου M_d η ροπή σχεδιασμού ως προς το κέντρο βάρους της διατομής. Η ροπή σχεδιασμού της διατομής μετά την ενίσχυση M_{sd} ικανοποιεί την ανίσωση:

$$M_{sd} \leq M_{Rd}^0 + \Delta M_{Rd}^F \quad \eta$$

$$\mu_{sd} \leq \mu_{Rd}^0 + \Delta \mu_{Rd}^F \quad (8.15)$$

Στην εξίσωση (8.15) οι όροι M_{Rd}^0 , ΔM_{Rd}^F εκφράζουν τη ροπή αντοχής της αρχικής διατομής και την αύξησή της λόγω της προσθήκης του FRP αντίστοιχα. Με αντικατάσταση των σχετικών όρων στην εξίσωση (8.7) και αναγωγή ως προς $b \cdot d \cdot f_{cd}$ προκύπτει:

$$0,85 \times 0,80 \xi_{lim} + \frac{1}{f_{cd}} (\rho_2 \sigma_{s2} - \rho_1 \sigma_{s1} - \rho_F f_F^{eff}) = 0 \quad (8.16)$$

οπότε στην ισόρροπη κατάσταση, η εξίσωση της ανηγμένης ροπής ως προς τον εφελκόμενο χάλυβα έχει τη μορφή:

$$\mu_{s,bal} = \left(\frac{(\rho_1 - \rho_2) f_{yd}}{f_{cd}} - \frac{\rho_F f_F^{eff}}{f_{cd}} \right) (1 - 0.40 \xi_{lim}) - \frac{\rho_2 f_{yd}}{f_{cd}} (1 - \frac{d_2}{d}) \quad (8.17)$$

9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η αμφιέριστη δοκός με τη διατομή του σχήματος 11 και άνοιγμα 7.0m έχει αντοχή σχεδιασμού 370 kNm (C25/30, S400). Λόγω αναβάθμισης των φορτίων σχεδιασμού η ροπή σχεδιασμού για το εν λόγω στοιχείο έχει αυξηθεί σε 540 kNm. Η αύξηση της αντοχής πραγματοποιείται με επικόλληση ταινίας ενίσχυσης στη εφελκόμενη ζώνη, η οποία εκτείνεται μέχρι τις παρειές των στηρίξεων. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου εμβαδού ταινίας ακολουθείται η εξής επαναληπτική διαδικασία, μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση:

(1) Προσεγγιστική εκτίμηση του μεγέθους της απαιτούμενης δύναμης της ενισχυτικής ταινίας: $F_F = (540 - 370) \times 10^3 / 0.9h = 270 \text{ kN}$.

(2) Η ενίσχυση είναι δυνατή, εφόσον $\xi < 0.64$, το οποίο είναι ισοδύναμο με τον έλεγχο: $F_F + F_{s1} < F_c + F_{s2}$ (όπου οι όροι F_{s1} , F_c , και F_{s2} υπολογίζονται για $\xi = 0.64$), συνεπώς $270 \text{ kN} < (0.8 \times 0.85 \times 0.64 \times 650 \times 25 \times 300 / 1.5 + 2 \times 314 \times 400 / 1.15 - 6 \times 314 \times 400 / 1.15) N = 1000 \text{ kN}$ (ισχύει).

(3) Έστω $b_F = b = 300 \text{ mm}$. Θέτοντας $\tau_{cov}^y = 1.8 \text{ MPa}$, $E_F = 70 \text{ GPa}$, προκύπτει ότι $\varepsilon_F^{eff} = 0.026 \times 10^{-3} \times L_{anch} / t_F$. Για $t_F = 1.5 \text{ mm}$, και ενεργό μήκος αγκυρώσεως $L_{anch} = 350 \text{ mm}$, η δύναμη, που μπορεί να αναπτυχθεί μέσω διατμητικής δράσης της επικάλυψης, είναι $F_F = (0.026 \times 10^{-3} \times 350 /$

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή συνθετικών υλικών με εφαρμογή σε δομικά έργα.
Table 1: Representative properties of fibers used in manufacturing of structural FRPs.

Τύπος ίνας/ υλικό	d_f μm	f_{tu} (MPa)	E (GPa)	ϵ_{tu} %	Ειδικό βάρος kg/m^3
Άνθρακας (PAN- HT)	5 – 8	3500	200 – 240	1.3 – 1.8	1700-1800
Άνθρακας (Pitch κοινές)	9 – 18	780 – 1000	38-40	2.1 – 2.5	1600 – 1700
Άνθρακας (Pitch – HM)	9 - 18	3000-3500	400- 800	0.4 – 1.5	1900-2100
Kevlar 49 & Twaron	12	2800	130	2.3	1450
Technora (Aramid)	12	3500	74	4.6	1390
Russian Aramid (SVM)	15	2500-3800	130	3.5	1430
E-glass	8-12	3500-3600	75	4.8	2600
Alkali Resistant Glass	8-12	1800-3500	70-76	2-3	2270
Polyvinyl Alcohol	14	2300	60	5	1300

$1.5) \times [70 \times 10^3 \times 1.5 \times 300] = 189 \text{ kN} < 270 \text{ kN}$ με ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση 0.006. Για να αυξηθεί το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να αναπτύξει η ενισχυτική ταινία, απαιτείται επιπλέον στρώση (πάλι πάχους 1.5 mm), η οποία όμως θα αγκυρωθεί πέραν του ενεργού μήκους αγκυρώσεως της πρώτης στρώσης (σχήμα 12). Για να αυξηθεί το μέγεθος της ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης της ενισχυτικής ταινίας (εξ. 8.12), απαιτείται μείωση του πάχους t_F . Τέλος, για ενίσχυση της αγκύρωσης απαιτείται μηχανισμός διατμητικής αντίστασης της επικάλυψης. Αυτό θα επιτευχθεί με την προσθήκη εξωτερικών διατμητικών συνδέσμων σχήματος U, οι οποίοι θα αγκυρωθούν στη θλιβόμενη ζώνη του στοιχείου (σχήμα 3β).

Υπολογισμός αντοχής ενισχυμένης διατομής:

Λύνουμε ως προς ξ (έστω ότι διαρρέει ο θλιβόμενος οπλισμός): Από ισορροπία δυνάμεων για $\epsilon_c = 0.0035$ προκύπτει ότι: $\xi = 0.38$, $\epsilon_F = 0.0064 > 0.006$, $\epsilon_{s2} = 0.0028$ (διαρροή θλιβόμενου οπλισμού), $\epsilon_{s1} = 0.0057$ (διαρροή εφελκυσμένου οπλισμού) και $M_{Rd} = 614 \text{ kN-m} > 540 \text{ kN-m}$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Isley F.: "TYFO S Epoxy And TYFO SEH-51 Composite", **Research and Development Lab Report**, HEXCEL FYFE Assoc., Dublin, CA, 1992.
2. Malek A.M., Saadatmenesh H.: "Design Equations and Guidelines for Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Plates", **Second International Conference on Composites in Infrastructure**, Tucson, Vol. I AZ, 1998, pp. 603+617.

3. McKenna J. K. and Erki M. A.: "Strengthening of R. C. Flexural Members using Externally Applied Steel Plates and Fibre Composite Sheets-a Survey", **Canadian Journal of Civil Engineering**, 21(1), 1994, pp. 16+24.

4. Meier, U. and Munger, F.: "Repair of Structures through External Bonding of Thin CFRP Sheets", **Proceedings, IABSE Symp. Extending the Lifespan of Structures**, San Francisco, U.S., 1995, pp. 1167+1172.

5. Meier U.: "Composites for Structural Repair and Retrofitting. **Proceedings, 1st International Conference on Composites in Infrastructure**", Tucson, Arizona, U.S., 1996, pp. 1202+1216.

6. Mufti A.A., Erki M. A. and Jaeger L. G.: "**Advanced Composite Materials with Application to Bridges**", Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada, 1991.

7. Nanni, A., et al.: "Tensile Properties of Braided FRP Rods for Concrete Reinforcement", **Cement and Concrete Composites**, 15: 1993 pp. 121+129.

8. Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R.: "Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams", **Concrete International, ACI**, 12(3), 1990, pp. 65+71.

9. Schwegler, G.: "Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones", **Proceedings, 10th European Conf. on Earthq. Engineering**, Vienna, Austria, 1994.

10. Uomoto, T., Hodhod, H.: "Evaluation of Tensile Strength of FRP Rods with Aligned Continuous Fibres", **Proceedings, 1st International Conference on Advance Comp. Materials in Bridges and Structures**, (Eds.) K.W. Neale and P. Labossiere, Sherbrooke, Canada, 1992, pp. 63+72.

11. VSL International: "Post-Tensioned Masonry Structures", **VSL Report Series**, Berne, Switzerland, 1990, No 2.

12. Tepfers R., Hedlund G., Rosinski B.: "Pull-out and Tensile Reinforcement Splice Tests with GFRP Bars", **Second International Conference on Composites in Infrastructure, Vol. II**, Tucson AZ, 1998, pp 37+51.

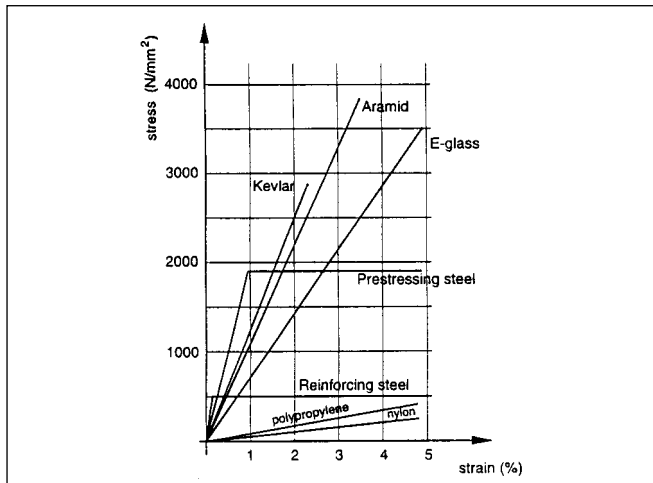
13. Triantafyllou T.: "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy – Bonded FRP Composites", **ACI Structural J.**, 95(2), March-April 1998, pp. 107+115.

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης,

Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Βασ. Σοφίας 1, Ξάνθη 671 00.

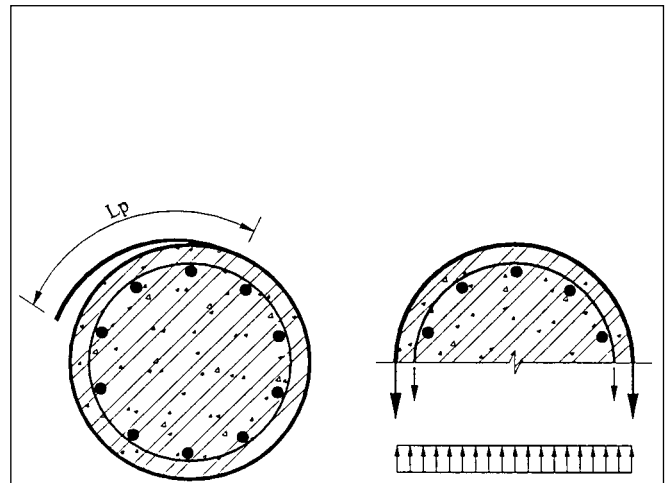
Σταυρούλα Πανταζοπούλου,

Αναπληρώτρια καθηγήτρια, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Βασ. Σοφίας 1, Ξάνθη 671 00.



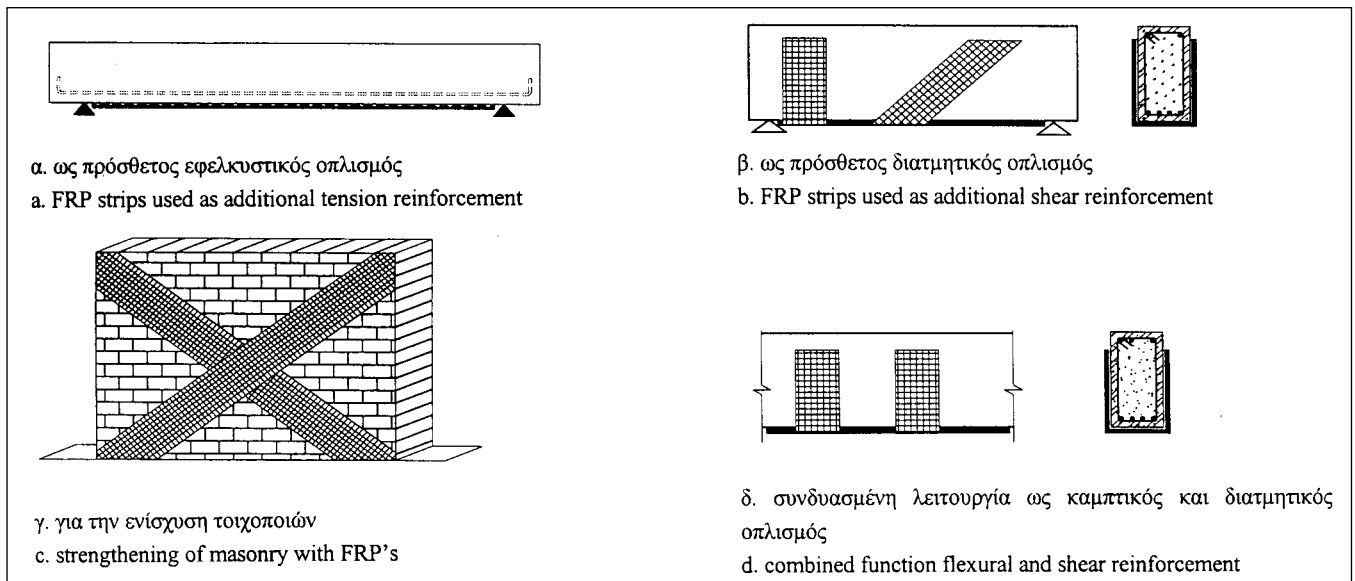
Σχήμα 1: Σχέση εφελκυστικής τάσης παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά.

Figure 1: Typical stress - strain law for composite material in tension.



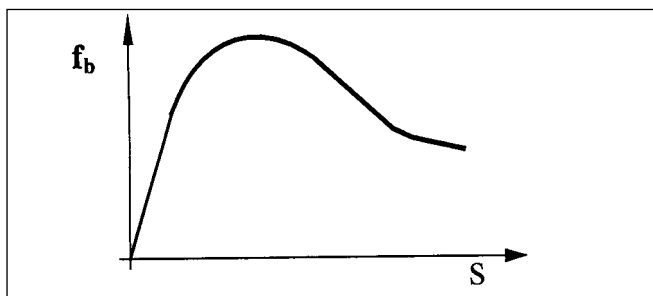
Σχήμα 2: Ενίσχυση υποστυλωμάτων κυκλικής διατομής μέσω περισφιγξης με FRP's.

Figure 2: Confinement of circular column cross - section by FRP jacket.



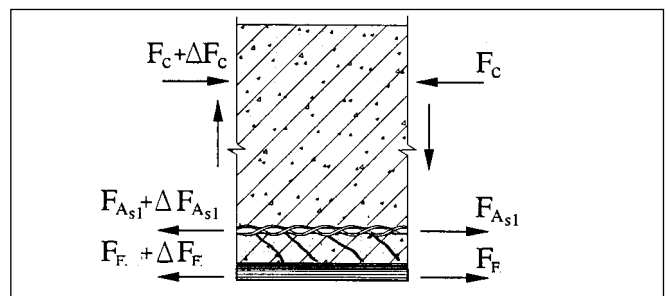
Σχήμα 3: Συνήθεις εφαρμογές των FRP's για ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος και τοιχοποιιών.

Figure 3: Possible uses of FRP strips for strengthening of reinforced concrete and masonry elements.



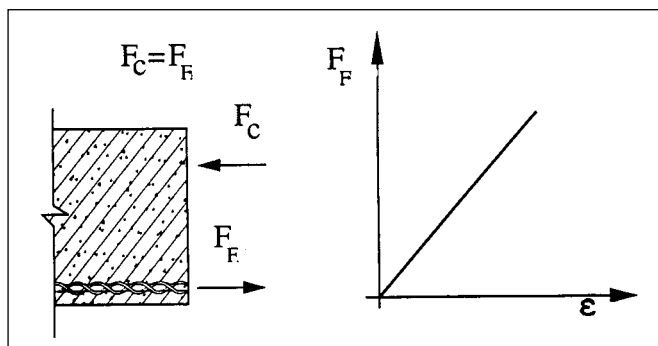
Σχήμα 4: Διάγραμμα τάσεων - συνάφειας (f_b) και σχετικής ολίσθησης (s).

Figure 4: Characteristics of bond stress (f_b) versus slip (s) relationship for FRP's.



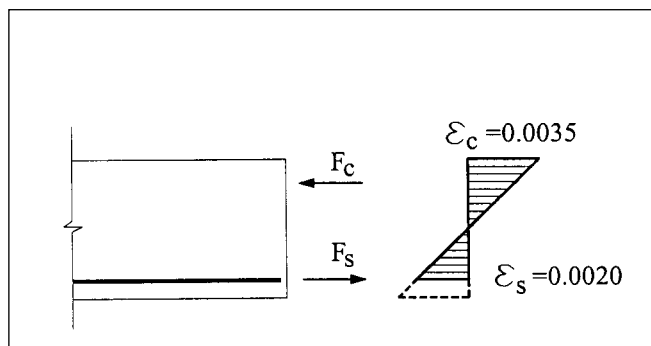
Σχήμα 5: Αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ συμβατικού οπλισμού και FRP.

Figure 5: Failure in the interface zone (cover) between conventional and FRP reinforcement.



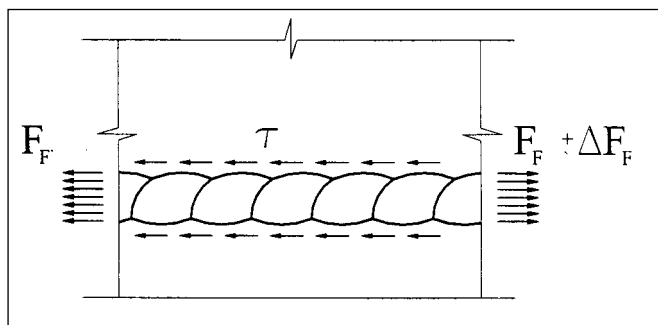
Σχήμα 6: Αδυναμία οριοθέτησης της αντοχής θλιβομένης ζώνης λόγω πλήρους γραμμικής συμπεριφοράς του FRP.

Figure 6: Lack of yield point in the stress - strain law of the FRP is incompatible with capacity design.



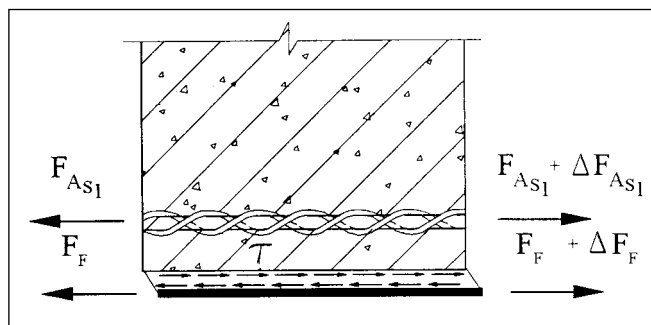
Σχήμα 7: Συμβατική ισορροπη κατάσταση.

Figure 7: Nominal balanced condition.



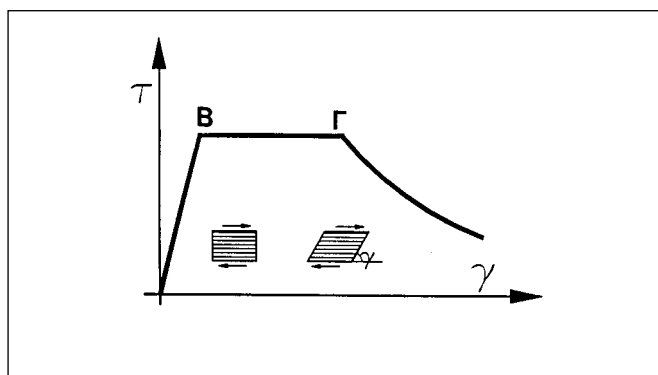
Σχήμα 8: Δυνάμεις συνάφειας σε συνθετικές ράβδους οπλισμού.

Figure 8: Mechanics of bond for composite reinforcing bars.



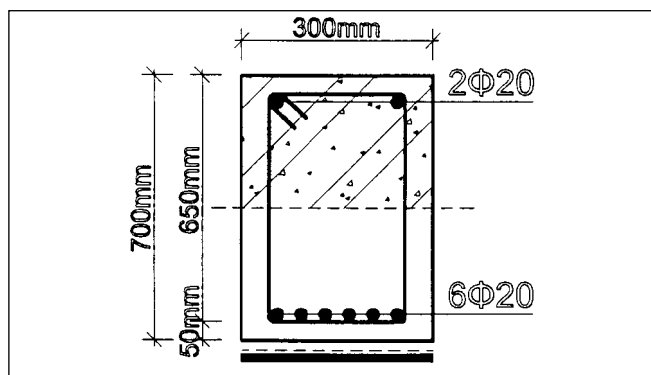
Σχήμα 9: Διατμητική δράση κόλλας επικάλυψης.

Figure 9: Shearing action in the interface (cover).



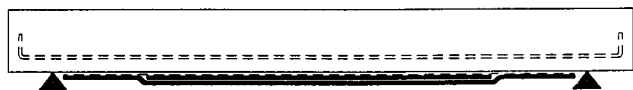
Σχήμα 10: Διάγραμμα διατμητικών τάσεων παραμορφώσεων υλικού διεπιφανείας.

Figure 10: Shear force - shear deformation relationship for the interface material.



Σχήμα 11: Διατομή δοκού.

Figure 11: Beam cross section.



Σχήμα 12: Διπλή εξωτερική ενισχυτική ταινία.

Figure 12: Double external FRP strips.

Extended summary

Design Considerations for Reinforcing / Strengthening of Concrete Members with FRPs

A. KARABINIS

Professor, Civil Engrg. D.U.TH.

S. J. PANTAZOPOULOU

Associate Professor, Civil Engrg. D.U.TH.

Abstract

Advances in the technology of fiber reinforced synthetic materials has led to the development of various new products which, when combined with conventional structural materials offer novel alternatives for both new construction and repair of existing structures. This paper explores the design issues for concrete members either reinforced or strengthening for flexure with FRPs within the current framework of capacity design. Deviation in design from conventional practice is dictated by the high strength lack of distinct yielding and brittle failure of FRPs. A desirable hierarchy of failure modes is established for flexural design, whereas the "balanced failure" condition is redefined. Alternative sources of inelastic activity are explored. Both new and existing construction is considered; in the former case, the FRPs are in the form of embedded reinforcing bars, whereas in the latter (case of external strengthening), the FRPs are in the form of sheets or tapes externally bonded on strategic areas of the structural member.

1. BACKGROUND

Composite Reinforcement products are available in a variety of shapes and forms, such as reinforcing bars, grids, plates/strips, wraps/fabrics, and prestressing tendons. Their mechanical properties vary depending on the manufacturing process used during production, but also on the properties of the fibers and resin matrix. (For example, usual values for the tensile strength, the modulus of elasticity and the deformation at rupture of CFRP Bars are of the order of 1300-2000 MPa, 100-130 GPa, and 1.3% respectively). FRP plates and wraps are orthotropic materials functioning primarily under plane stress. These are especially convenient as jacketing devices. They are referred to in the literature as ExFRPs (Externally Bonded Fiber Reinforced Polymers) because they are usually attached on the surface of existing members (through proper adhesives) as tension reinforcement. Known applications of ExFRPs are: (1) Use of strips as reinforcement on the tension face of beams or masonry piers. (2) Use of strips orthogonal to the flexural axis as web (shear) reinforcement for both R.C. beams and masonry piers, (3) confining jackets on R.C. columns requiring strengthening or repair due to prior damage.

Submitted: Aug. 3, 1999 Accepted: Feb. 21, 2000

forcement for both R.C. beams and masonry piers, (3) confining jackets on R.C. columns requiring strengthening or repair due to prior damage.

2. BOND AND ANCHORAGE OF FRPS

As in the case of conventionally reinforced concrete, the efficiency of the FRP reinforcement depends entirely on the adequacy of the stress-transfer mechanism (bond). In the case of externally bonded plates, the anchorage occurs along the interface between the bonded plate and the substrate (i.e. concrete or masonry); because the glue is several times stronger in tension than concrete, the primary mechanism of anchorage failure is through shear cracking in the substrate material (cover). Debonding usually begins at the ends of the plate (cut-off points) when these occur within the loaded span, because of stress concentrations at those points. Note that the bonded straps work as tension ties in the idealized truss model that we use to represent the workings of the strengthened member. At the end nodes of the truss, the force of the tie is transferred back into the beam web and must be anchored into the compression zone, thereby requiring particular attention in these regions through clamping of the plate ends.

The anchorage mechanisms of the FRP represent weak links in the strengthened / reinforced element, limiting the upper bound in force and deformation capacities that can be realized by the FRP to a fraction only of the actual material strengths ($f_{FRP}^{eff} = \alpha \cdot f_{FRP}^u$, $\epsilon_{FRP}^{eff} = \alpha \cdot \epsilon_{FRP}^u$, where $\alpha < 1$). (Eqn. 5.1 where f_{FRP}^u the rupture strength of the FRP, and $\tau_{cov}^u \cdot L_{anch}$, $\tau_{adh}^u \cdot L_{anch}$ = the maximum shear force that can be sustained in the interface region over the anchorage length, either in the layer of the substrate or within the adhesive less likely whichever is less).

Within the capacity design framework a primary objective is to prioritize the hierarchy of failure so as to ensure ductile response of the structural element. With conventional

reinforcement this objective is achieved through yielding in the tension zone under flexure. This secures a fuse of inelastic activity for the element but also limits the force that is carried by the compression zone of the member's cross section. By replacing the steel reinforcement with equivalent FRP reinforcement it is no longer possible to ensure inelasticity through action in the reinforcement itself (the commonly available FRP materials do not exhibit yielding, and fail in a rather brittle mode). Theoretically, FRP reinforced sections would behave as if over-reinforced, even for small amounts of longitudinal reinforcement. In reality, the only way to limit the force magnitude induced in the compression zone of the section (to be carried by concrete) is to ensure that the interface would serve as the fuse, provided it could be possible to arrange for a non-brittle failure in that region.

2. POSSIBLE MODES OF FAILURE FOR FRP-REINFORCED CONCRETE

The likely modes of failure to be considered in the design of FRP-reinforced concrete members are: (1) Compression crushing, (2) Interface failure, (3) Diagonal tension failure in the web, (4) Debonding at the cut-off points of the FRP strip, (5) Rupture of the FRP, and (6) Excessive deflections. Of these, particularly undesirable are modes (3), (4) and (5) because of their brittle nature. Mode (6) is only acceptable if adequate stiffness exists under serviceability conditions. Mode (2) could be considered as a reference condition if it could be secured that the interface may sustain its strength upon attainment, for a non-negligible deformation increment.

3. DESIGN EQUATIONS FOR R. C. MEMBERS IN PURE FLEXURE

3.1. Members reinforced with embedded FRPs

When designing prismatic R.C. members with embedded FRP bars for flexural behavior the main assumptions are the same as those used for conventionally reinforced members (plane sections, compatibility of strains between concrete and FRP bar, neglecting the tensile contribution of concrete). Here, the mechanism of pullout-sliding of the FRP is used in lieu of yielding in the conventional design. This point is identified as the condition at the interface when the anchorage is loaded past the pullout strength limit, and is quantified by the effective axial strain capacity of the FRP as prescribed by

Eqn. (8.1). (Note that it is necessary to provide confinement along the anchorage in this application to preclude cover-splitting from controlling the response). The FRP design strength is obtained from the effective value through a material strength factor, γ_{FRP} , equal to that of concrete, i.e. $\gamma_{FRP} = \gamma_c$. This is because failure of the interfacial concrete zone occurs by diagonal tension failure, thereby determining the effective strength of the FRP. Equation 8.3 gives the depth of compression zone normalized with respect to the static depth d for a section under pure flexure in at the "balanced" condition. (Note that "balanced" is now defined as the strain state in which the extreme compression fiber is at a strain of 0.0035, whereas the tension FRP reinforcement reaches ϵ_{FRP}^{eff}).

Through sectional equilibrium (Eqn. 7), the corresponding tension reinforcement ρ_{bal} is resolved (Eqn. 8.5). The flexural strength of singly-reinforced cross sections with $\rho < \rho_{bal}$ is given by Eqn. 8.6 normalized with respect the product bd^2f_{cd} .

(2) Strengthening with ExFRPs as tension reinforcement

For members reinforced with embedded conventional reinforcement and strengthened externally with ExFRP strips, additional assumptions are as follows:

(1) The strip is secured at the ends against debonding so that the FRP will be able to function as a tension tie at the ultimate limit state.

(2) The thickness of the FRP strip is negligible compared to the other cross-sectional dimensions.

(3) The normalized depth of the compression zone, ξ should exceed the $\xi_{FRP,bal}$ value but should be less than 0.64 (the upper bound ensures yielding of the embedded reinforcement, whereas the lower bound is intended to preclude premature failure of the ExFRP through shearing of the cover concrete).

The flexural resistance of the strengthened section is given in Equation 8.15 in terms of the flexural capacity of the unstrengthened section and the increase in resistance due to the addition of the FRP. Normalized design strength, expressed with respect to the center of the embedded tension reinforcement, is given by Eqn. 8.16 for the balance point (FRP reaching its effective strength, Eqn. 2).

Athanasios I. Karabinis,

Professor, Reinforced Concrete Laboratory, Dept. of Civil Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 1, Xanthi 671 00, Greece.

Stavroula Pantazopoulou,

Associate professor, Reinforced Concrete Laboratory, Dept. of Civil Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 1, Xanthi 671 00, Greece.