

Αναλυτική διερεύνηση του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων σε υποστρώματα ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με σύνθετα υλικά

Γεώργιος Α. Παπαχατζάκης

BSc, MEng Civil Engineer, gpapacha@civil.duth.gr

Δήμητρα Β. Αχιλλοπούλου

Dr, MSc. Civil Engineer, dimiachi@civil.duth.gr

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης

Professor, Dr, Civil Engineer, karabin@civil.duth.gr

Διαφορετικές μέθοδοι έχουν δημιουργηθεί με αντικείμενο τις αντισεισμικές ενισχύσεις ή επισκευές ανεπαρκώς ωπλισμένων στοιχείων σκυροδέματος. Η χρήση μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) ως τρόπος αύξησης της φέρουσας ικανότητας ή της πλαστιμότητας του υφιστάμενου στοιχείου είναι μια από αυτές.

Ανεξάρτητα του είδους του ΙΟΠ που χρησιμοποιείται, κυρίαρχο ρόλο παίζει η διεπιφάνεια μεταξύ του ωπλισμένου σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού. Μέσω της διεπιφάνειας μεταφέρονται οι δυνάμεις από το υφιστάμενο στοιχείο και ενεργοποιείται το ΙΟΠ ώστε να βελτιωθεί η τελική συμπεριφορά του σύνθετου πλέον στοιχείου. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζεται πρόωρη αστοχία της διεπιφάνειας πριν η ενίσχυση φτάσει στο επιθυμητό σημείο επιτελεστικότητας. Έτσι, είτε α) λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το σκυρόδεμα είτε β) λόγω αστοχίας του υποστρώματος του σκυροδέματος στην διεπαφή, χάνεται η μονολιθικότητα της κατασκευής και επέρχεται πρόωρη αστοχία.

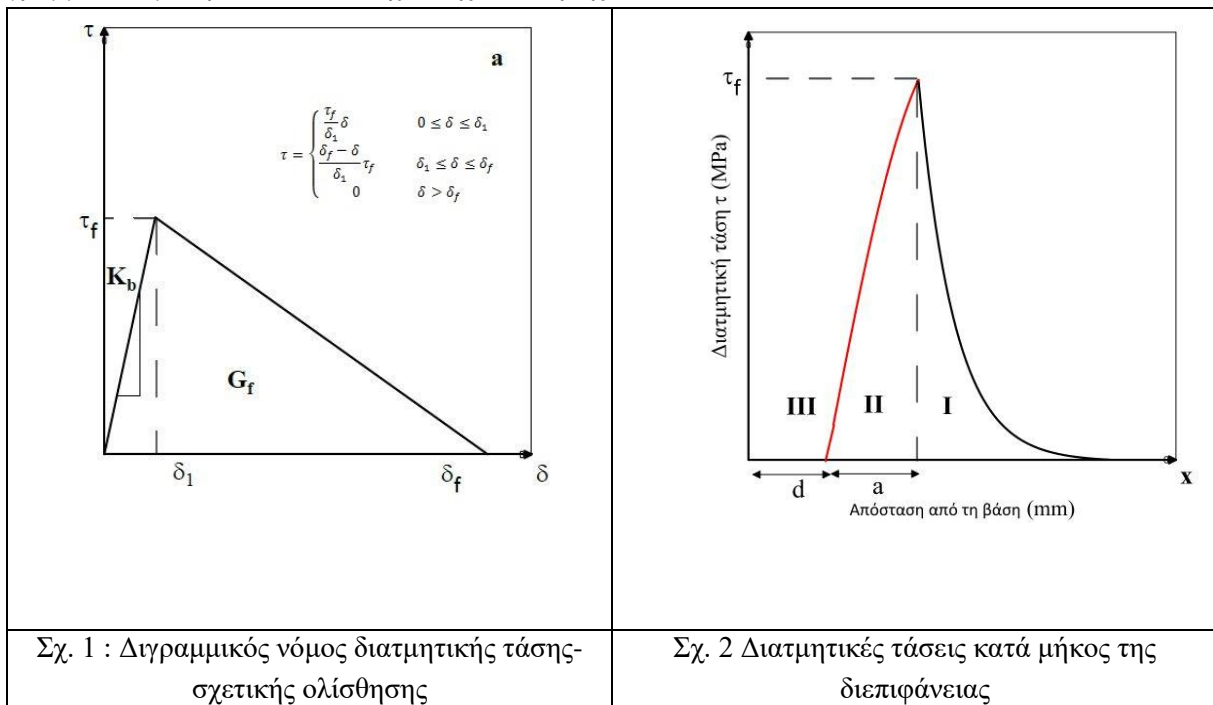
Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, υπάχρχει περιορισμένη γνώση σχετικά με τις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μεταξύ του ινοπλισμένου πολυμερούς και του σκυροδέματος και κυρίως ο τρόπος αστοχίας του ενισχυμένου δομικού στοιχείου σε συγκεκριμένη καταπόνηση. Αναλυτικές σχέσεις έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή του παραπάνω προβλήματος και επικεντρώνονται κυρίως σε δοκούς ενισχυμένες με ελάσματα FRP (Smith and Teng 2001, Wang 2006, 2007, 2008).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και αναλυτική διερεύνηση του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων στη διεπιφάνεια υποστρωμάτων ενισχυμένα με μανδύες ΙΟΠ που καταπονούνται υπό κάμψη και θλίψη. Εξαιτίας των καμπτικών ρωγμών που δημιουργούνται στην βάση των υποστρωμάτων, δημιουργείται σχετική ολίσθηση της διεπιφάνειας μεταξύ σκυροδέματος και ΙΟΠ στο σημείο εκείνο, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης.

Για την κατανόηση αυτού του φαινομένου, αναπτύχθηκαν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό των εσωτερικών τάσεων (διατμητικών και ορθών) καθ' ύψος της διεπαφής του υποστρώματος για συγκεκριμένο επίπεδο φορτίου (μέγιστο φορτίο αποκόλλησης). Τόσο τα υποστρώματα όσο και τα ινοπλισμένα πολυμερή προσομοιώνονται ως γραμμικά ελαστικά στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με μια στρώση συνδετικού υλικού. Για να απλοποιηθεί η ανάλυση θεωρείται μόνο μια καμπτική ρωγμή η οποία εμφανίζεται στη βάση του υποστρώματος. Η καμπτική ρωγμή προκαλεί τοπική ευκαμνία στην βάση και συμβατικά μπορεί να προσομοιωθεί ως ένα στροφική ελατήριο.

Μια σειρά πειραμάτων (Bizindavyi and Neale 1999, Chajes *et al.* 1996) έχουν δείξει ότι η κατανομή των διατμητικών τάσεων στην διεπαφή (συμπεριφορά θραύσης τύπου II), το αποτελεσματικό μήκος

αγκύρωσης και η έναρξη της διάδοσης της καμπτικής ρωγμής στη βάση του ενισχυμένου υποστρώματος μπορεί να περιγραφεί με καλή προσέγγιση, με διγραμμικό νομό που αποτελείται από τρία τμήματα (Σχ.1): (1) ελαστικό στάδιο (στάδιο I, Σχ.2) όταν $\tau \leq \tau_f$ ή $\delta \leq \delta_1$ (η τάση αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση), (2) στάδιο απομείωσης (στάδιο II, Σχ.2) όταν $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$ (η τάση μειώνεται γραμμικά με την ολίσθηση), (3) στάδιο αποκόλλησης (στάδιο III, Σχ.2) όταν $\delta \geq \delta_f$ (η διατμητική τάση είναι μηδενική ενώ το ΙΟΠ έχει αποκολληθεί από το σκυρόδεμα στο σημείο εκείνο) όπου δ είναι η σχετική οριζόντια μετακίνηση μεταξύ της ακραίας εφελκόμενης ίνας του υποστρώματος και του άνω τμήματος του ΙΟΠ. Η ανάπτυξη ορθών τάσεων προσομοιώνεται με γραμμικό νόμο ορθών τάσεων-σχετικής ολίσθησης δ_n .

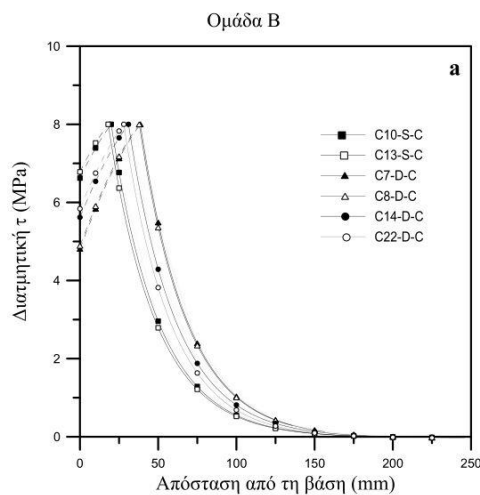


Θα πρέπει να σημειωθεί εξ αρχής ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επίδραση της αστοχίας τύπου I (λόγω εφελκυστικών τάσεων) και της αστοχίας τύπου II (λόγω διατμητικών τάσεων). Ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων κατά μήκος της διεπιφάνειας χάνεται εάν οι ορθές τάσεις γίνουν ίσες με την εφελκυστική τάση f_t του σκυροδέματος ή η οριζόντια σχετική μετακίνηση των δυο επιφανειών γίνει ίση με δ_f . Έτσι πρακτικά δεν μεταβιβάζονται δυνάμεις εάν κατά την αστοχία τύπου II η ενέργεια θραύσης γίνει ίση με G_f^i ή εάν οι ορθές τάσεις γίνουν ίσες με f_t .

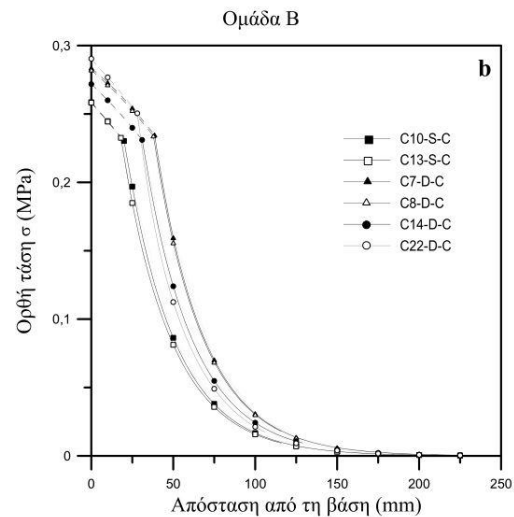
Για την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων καταρτίστηκε βάση δεδομένων από 15 δοκίμια, της διεθνούς βιβλιογραφίας, ορθογωνικής διατομής και κλίμακας 1:1 υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και σταθερό αξονικό φορτίο, ενισχυμένα με μανδύες ΙΟΠ από άνθρακα ή γυαλί, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και τελικό πάχος εφαρμογής (Realfonzo and Napolì 2009) τα οποία είχαν ως αστοχία τη θραύση των ΙΟΠ. Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα δοκίμια έγινε αναλυτικός υπολογισμός των διατμητικών και ορθών τάσεων της διεπιφάνειας και των ανηγμένων παραμορφώσεων των ΙΟΠ κατά μήκος των υποστρωμάτων για την μέγιστη φόρτιση που δέχθηκε το εκάστοτε δοκίμιο, όπως και της απαιτούμενης μέγιστης φόρτισης του για την αστοχία της διεπιφάνειας.

Ενδεικτικά παρατίθενται διαγράμματα για την δεύτερη ομάδα (7 δοκίμια) που αποτελείται από υποστρώματα διατομής 300x300mm ενισχυμένα με ανθρακούφασμα (CFRP) ίδιων ιδιοτήτων και ίδιου πάχους τελικής επίστρωσης, τα οποία είχαν διαφορετικές θλιπτικές αντοχές σκυροδέματος (10-

27.3 MPa). Επίσης, υπάρχει διαφοροποίηση του επιβαλλόμενου κατακόρυφου ανηγμένου θλιπτικού φορτίου ($\nu=0.12, 0.14$ έως $\nu=0.4$).



Σχ. 4 Διατμητικές τάσεις Ομάδας Β



Σχ. 5 Ορθές τάσεις Ομάδας Β

Από τα εξαγόμενα διαγράμματα προσδιορίζεται το ενεργό μήκος στο οποίο μεταφέρονται οι δυνάμεις από το υποστύλωμα στους μανδύες ΙΟΠ μέσω της διεπιφάνειάς τους. (Σχ. 4, 5). Συμπεραίνεται ότι το ενεργό αυτό μήκος δεν ξεπερνά το 30-60% του συνολικού μήκους της εφαρμογής της ενίσχυσης στη βάση των δοκιμών. Το ποσοστό εξαρτάται ανάλογα με τη φορτιστική κατάσταση, το πάχος ή και το είδος της ενίσχυσης. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις ενίσχυσης με μεταλλικά γωνιακά στοιχεία, μετατοπίζεται το ενεργό μήκος μεταφοράς δυνάμεων, αποτρέποντας την αποκόλληση των ΙΟΠ. Κατά συνέπεια, το σημείο στο οποίο μπορεί να εμφανιστεί συγκέντρωση τάσεων εν τέλει εμφανίζεται πάνω από τα γωνιακά. Τέλος σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν ενίσχυση με μεταλλικά στοιχεία, τα αποτελέσματα του εξαγόμενου αλγορίθμου είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- Bizindavyi, B. and Neale, K. (1999), "Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 3, No. 4, pp. 153-160.
- Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka, T.F. and Thomson, T.A. (1996), "Bond and force transfer of composites materials plates bonded to concrete", *Structural Journal*, Vol. 93, No. 2, pp. 209-217.
- Realfonzo, R. and Napoli, A. (2009), "Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 1164-1176.
- Smith, J. and Teng, J. (2001), "Interfacial stresses in plated beams", *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 7, pp. 857-871.
- Wang, J. (2006), "Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 21, pp. 6630-6648.
- Wang, J. (2007), "Cohesive zone model of FRP-concrete interface debonding under mixed-mode loading", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, No. 20, pp. 6551-6568.
- Wang, J. and Zhang, C. (2008), "Nonlinear fracture mechanics of flexural-shear crack induced debonding of FRP strengthened concrete beams", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, No. 10, pp. 2916-2936.