Ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των ινών στην εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος

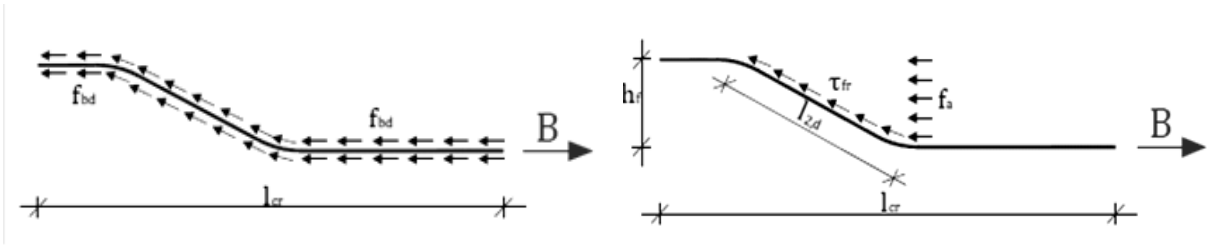
Μαρία Παπαδάτου
Πολιτικός Μηχανικός MSc,papadatoumarita@gmail.com
Ευστράτιος Μπαδογιάννης
Επ. Καθηγ., ΣΠΜ ΕΜΠ, badstrat@central.ntua.gr
Εμμανουήλ Βουγιούκας
Λέκτορας, ΣΠΜ ΕΜΠ, manolis@central.ntua.gr

Εκτενής περίληψη

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες διαφόρων ειδών και υλικών αποτελεί μια από τις νέες τεχνολογίες στην παραγωγή σκυροδέματος και γνωρίζει τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλη ανάπτυξη. Η λειτουργία των ινών και η αποτελεσματικότητα τους στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως το υλικό τους, το σχήμα τους, το ογκομετρικό ποσοστό τους.Οι ίνες επιδρούν θετικά στην εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η συμβολή τους στην εφελκυστική αντοχή διακρίνεταισε δύο τμήματα: το 1° αφορά την αντοχή στην οποία παρουσιάζεται η πρώτη ρωγμή, η οποία δεν διαφέρει σημαντικά από την αντοχή σε εφελκυσμό του άοπλου σκυροδέματος, και το 2°αφορά την μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπου εμφανίζεται, ανάλογα με το ποσοστό και το είδος των ινών, παραμένουσα εφελκυστική αντοχή και περαιτέρω αύξηση των ανηγμένων παραμορφώσεων, συγκριτικά με το άοπλο σκυρόδεμα που αστοχεί ακαριαία. Η παρούσα έρευνα αφορά την διερεύνηση της εφελκυστικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες πριν την εμφάνιση των πρώτης ρωγμής, αλλά και του ποσοστού διατήρησής της ως συνάρτηση του εύρους της ρωγμής. Οι πληροφορίες που υπάρχουν για τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τη λειτουργία του ινοπλισμένου σκυροδέματος εν γένει, είναι αποτελέσματα κυρίως πειραματικής έρευνας, ενώ έχουν αναπτυχθεί και θεωρητικάμοντέλα, τα οποία όμως εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους, εξαιτίας της ακανόνιστης συμπεριφοράς του υλικού.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και η ποσοτικοποίηση της ως άνω συνεισφοράςτων ινών στην εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Αρχικά, προσδιορίζεται το ποσοστό και ο αριθμός των ινών που διαπερνούν τυχαία επιφάνεια σκυροδέματος, ανά διαφορετική γωνία κλίσης ως προς αυτή. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η δύναμη αντίστασης στην εξόλκευση (B) που αναπτύσσουν οι ίνες με γαντζωτά άκρα, λαμβάνοντας υπόψιν την ταυτόχρονη συμβολή των τάσεων συνάφειας (f_{bd})σε όλο το εμπηγμένο μήκος της ίνας, των τάσεων άντυγας (f_a) από το σκυρόδεμα στο διαγώνιο τμήμα της ίνας, και της τριβής(τ_{fr}) που αναπτύσσεται εκεί (Σχήμα 1). Η δύναμη B υπολογίζεται για χαρακτηριστικά σημεία τομής του ευθύγραμμου τμήματος της ίνας από την επιφάνεια της ρωγμής, ενώ η περίπτωση που η ίνα τέμνεται σε κάποιο σημείο του αγκίστρου της θεωρείται ότι έχει αμελητέα συνεισφορά στην αντίσταση εξόλκευσης. Έπειτα, εξετάζεται η επιρροή της γωνίας κλίσης των ινών, αναπτύσσοντας τρεις διαφορετικές θεωρήσεις παραμόρφωσης της ίνας με το άνοιγμα της ρωγμής.

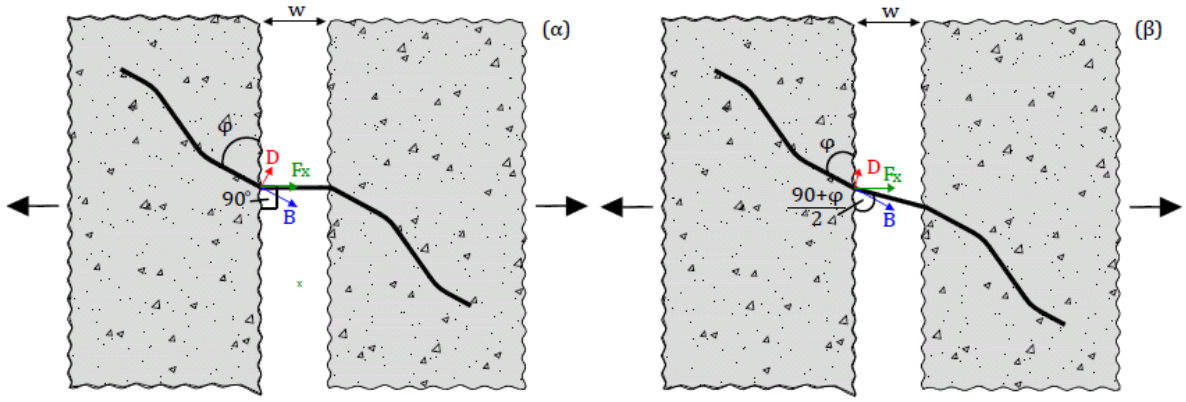
1η Θεώρηση: οι ίνες διατηρούν αμετάβλητη τη γωνία κλίσης τους σε όλο το μήκος τους κατά το άνοιγμα της ρωγμής.
Οι ίνες καταπονούνται μόνο αξονικά. Υπολογίζεται το άνοιγμα ρωγμής στο οποίο ξεκινά η εξόλκευση των ινών, αναλόγως της γωνίας κλίσης και του εμπηγμένου μήκους της ίνας ανά παρειά της ρωγμής. Για κάθε στάδιο της διαδικασίας εξολκεύσεως των ινών υπολογίζεται η εναπομένουσα δύναμη αντίστασης στην εξόλκευση.
2η Θεώρηση: οι ίνες παρουσιάζουν τοπική κάμψη στο σημείο επαφής με τη ρωγμή και διασχίζουν κάθετα το κενό μεταξύ των τοιχωμάτων της.



Σχ. 1. Αντίσταση της ίνας σε εξόλκευση.
(α) Δυνάμεις συνάφειας f_{bd}

Σχ. 1.Αντίσταση της ίνας σε εξόλκευση.
(β) Δυνάμεις σύνθλιψης άντυγας f_a και τριβής τ_{fr}

Οι ίνες κάμπτονται τοπικά με αποτέλεσμα να δέχονται κάθετη δύναμη (D) από το γειτονικό σκυρόδεμα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της γωνίας κλίσης των ινών (θεωρώντας γωνία κλίσης 90° όταν οι ίνες είναι κάθετες στη ρωγμή, σχήμα 2α). Η κάθετη δύναμη απομειώνει την αξονική φέρουσα ικανότητα των ινών. Αυτή η απομείωση λαμβάνεται υπόψιν χρησιμοποιώντας το κριτήριο αλληλόδρασης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (κεφ. 6.1.2.2., σχέση 6.10), κατά αντιστοιχία των ράβδων οπλισμού που δέχονται κάθετη δύναμη και αναγκάζονται να δρουν σαν βλήτρα : $(B/B_u)^{3/2} + (D/D_u)^{3/2} =1$. Μόλις ο συνδυασμός αξονικής και εγκάρσιας δύναμης φτάσουν στο κριτήριο την τιμή 1 η ίνα διαρρέει και δεν παραλαμβάνει επιπλέον φορτίο μέχρι να εξολκευθεί. Υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση το άνοιγμα ρωγμής στο οποίο ξεκινά η εξόλκευση των ινών, αναλόγως της γωνίας κλίσης και του εμπηγμένου μήκους της ίνας, και η σταδιακή απομείωση της δύναμης αντίστασης στην εξόλκευση.
3η Θεώρηση: οι ίνες παρουσιάζουν τοπική κάμψη στο σημείο επαφής με τη ρωγμή σχηματίζοντας ενδιάμεση γωνία κλίσης (90°+φ)/2 με τα τοιχώματα στο κενό της ρωγμής.
Καθώς η ίνα αντιστέκεται στο άνοιγμα της ρωγμής, παρατηρείται σε κάποιες περιπτώσεις τοπική σύνθλιψη του σκυροδέματος, στο σημείο που η ίνα κάμπτεται και αλλάζει κλίση. Έτσι, είναι πιθανό, λόγω αυτής της υποχώρησης του σκυροδέματος, η ίνα να μη διαπερνάκάθετα το κενό της ρωγμής,αλλά να διατηρεί μια ενδιάμεση γωνία, η οποία προσεγγιστικά λαμβάνεται ίση με τη διχοτόμο (90°+φ)/2 (όπου φ: η αρχική γωνία κλίσης της ίνας, σχήμα 2β). Η ενδιάμεση γωνία έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη κάθετη δύναμη στις ίνες και άρα μεγαλύτερο περιθώριο για αξονική καταπόνηση μέχρι να ισχύσει το κριτήριο αλληλόδρασης. Υπολογίζεται, σε κάθε περίπτωση, το άνοιγμα ρωγμής στο οποίο ξεκινά η εξόλκευση των ινών, αναλόγως της γωνίας κλίσης και του εμπηγμένου μήκους της ίνας, και η σταδιακή απομείωση της δύναμης αντίστασης στην εξόλκευση.



Σχήμα 2 : Παραμόρφωση της ίνας με τη θεώρηση γωνίας κλίσης 90° (α) και ενδιάμεσης γωνία κλίσης (90°+φ)/2 (β) και οι αντίστοιχες δυνάμεις: αντίστασης στην εξόλκευση B, κάθετη δύναμη D και δύναμη αντίστασης F_x.

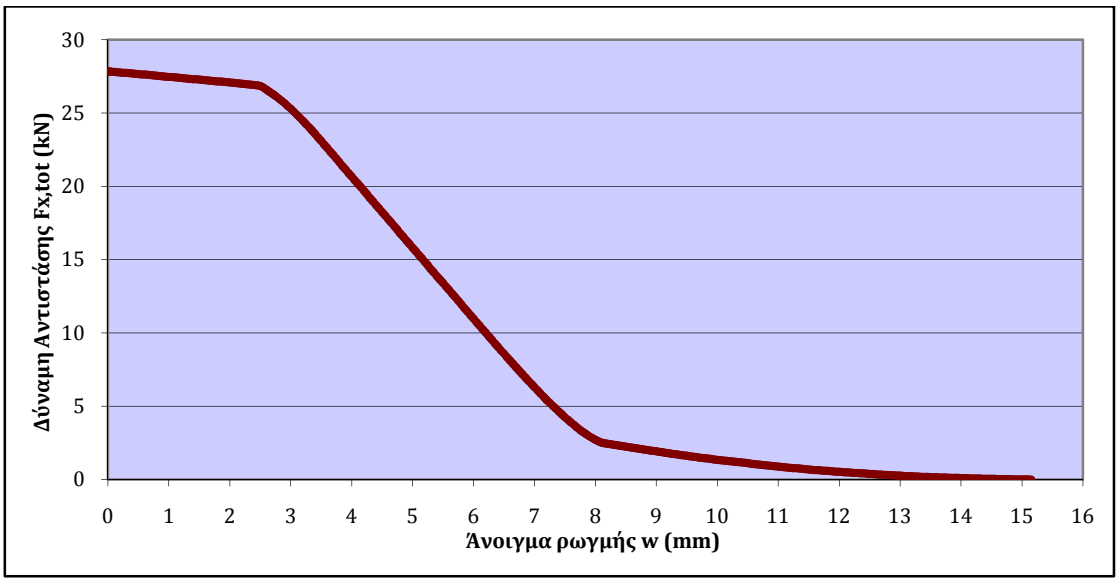
Στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψιν η τριβή που αναπτύσσεται στο σημείο καμπής των ινών από την δράση της κάθετης δύναμης για τις θεωρήσεις 2 κ' 3. Η τριβή προσφέρει επιπλέον αντίσταση στην εξόλκευση των ινών και δρα κατά τον άξονά τους, επομένως λαμβάνεται υπόψιν σαν πρόσθετη αξονική δύναμη στο κριτήριο αλληλόδρασης. Τέλος, θεωρείται η περίπτωση ινών χωρίς διατμητική δυσκαμψία. Υπολογίζεται η κάθετη δύναμη που αναπτύσσεται στο σημείο καμπής της ίνας για τον προσδιορισμό της δύναμης τριβής, χωρίς ωστόσο να λαμβάνεται υπόψιν το κριτήριο αλληλόδρασης.

Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, εκτός από τη δύναμη αντίστασης στην εξόλκευση των ινών B, υπολογίζεται η συνιστώσα της δύναμης που είναι κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής F_x (σχήμα 2) και είναι η αντίσταση των ινών στο άνοιγμα της ρωγμής, άρα και η συνεισφορά τους στην αντοχή του σκυροδέματος.

Για να ληφθεί επιπλέον υπόψιν η διαφορετική πιθανότητα εμφάνισης των γωνιών κλίσης των ινών, γίνεται η θεώρηση ότι όλες οι ίνες που βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένες εντός του σκυροδέματος μεταφέρονται ιδεατάεντός μιας σφαίρας. Η σφαίρα αυτή έχει διάμετρο ίση με το ευθύγραμμο μήκος της ίνας και όλες οι ίνες διέρχονται από το κέντρο της με τη γωνία κλίσης τους. Για κάθε διάστημα γωνιών, υπολογίζεται το αντίστοιχο εμβαδόν της επιφάνειας της σφαίρας και η πιθανότητα εμφάνισης κάθε γωνίας ισούται με το λόγο του εμβαδού προς το συνολικό εμβαδόν της σφαίρας. Έτσι, προκύπτει ότι οι περισσότερες, αριθμητικά, ίνες έχουν γωνία κλίσης στο διάστημα 30°-60°.

Στη συνέχεια, ακολουθεί αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου σε χαλύβδινες ίνες με πραγματικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, πιο συντηρητική είναι η 2^{η}θεώρηση για ίνες με διατμητική δυσκαμψία, ενώ μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης δίνει η 3^{η}θεώρηση για την περίπτωση ινών χωρίς διατμητική δυσκαμψία. Επιπλέον, η μη ισοπίθανη θεώρηση των γωνιών κλίσης δίνει μικρότερη δύναμη αντίστασης, με τη μέγιστη να μεταφέρεται από ίνες με γωνία κλίσης 45°. Η συνολική εφελκυστική τάση που προκύπτει από τη δύναμη αντίστασης για κάθε περίπτωση είναι αρκετά μικρή, της τάξεως του 0,30-0,40MPa, που επιβεβαιώνει τη μέχρι τώρα γνωστή πολύ μικρή αύξηση της τιμής της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος με την προσθήκη των ινών. Ωστόσο, μεγάλο ποσοστό της αντοχής που προσδίδουν οι ίνες διατηρείται και

μετά τη διάνοιξη των εφελκυστικών ρωγμών. Από το σχήμα 3 προκύπτει ότι η αντοχή αυτή είναι πρακτικά αμετάβλητη για άνοιγμα ρωγμής και μεγαλύτερο των 3mm,ενώ διατηρεί πάνω από το 60% της μέγιστης τιμής της για άνοιγμα ρωγμής 4-5mm, γεγονός που αποδεικνύει τον ρόλο των ινών στον περιορισμό της ανεξέλεγκτης ρηγμάτωσης.



Σχ.3: Μείωση της συνολικής δύναμης αντίστασης $F_{x,tot}$σε σχέση με το άνοιγμα της ρωγμής w, με τη θεώρηση γωνίας (90°+φ)/2

Βιβλιογραφία

BenturA., MindessS., DiamondS., 1985. Pulloutprocessinsteelfiberreinforcedcement, *InternationalJournal of Cement Composites*, 8, pp. 29-37.

Eurocode 2 : Design of Concrete Structures EN 1992-1-1, Brussels, EN

Parviz Soroushian, Cha–Don Lee, 1990. Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, V. 87, No. 5

Remigijus Šalna, Gediminas Marčiukaitis, 2010. Influence of Fiber Shape on the Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Modern Building Materials, Structures and Techniques, The 10th International Conference*, Vilnius, Lithuania

Seong-Cheol Lee, Jae-Yeol Cho, Frank J.Vecchio, 2011. Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Development, *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 5

www.supercivilcd.com/FRICTION.htm

Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000

Πληροφοριακό Δελτίο Προϊόντος Χαλύβδινων Ινών της Εταιρείας ΕΡΛΙΚΟΝ του Ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ, *www.inomix.gr*

Ρουσάκης Γ., 2010. Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.