

**Επεμβάσεις σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος με
προεντεταμένα ανθρακοελάσματα σε εγκοπές.**
Intervention to concrete members by means of post-tensioned
Near Surface Mounted CFRP lamellas

Ronald Mihala¹, Παναγιώτης ΣΠΥΡΙΔΗΣ², Konrad Bergmeister³

Λέξεις κλειδιά: Επεμβάσεις, Ίνες Άνθρακα, Προένταση, NSM CFRP.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Το παρόν άρθρο πραγματεύεται τη μέθοδο ενίσχυσης δομικών στοιχείων σκυροδέματος με χρήση προϊόντων από ίνες άνθρακα, κατά την οποία ελάσματα από ανθρακονήματα τοποθετούνται σε εγκοπές κάθετες στην επιφάνεια του στοιχείου. Αυτή η πρωτοποριακή τεχνική παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι αυτής κατά την οποία τα ελάσματα επικολλώνται απλώς στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης δείχνουν ότι η συνοχή μεταξύ σκυροδέματος και ένθετου ελάσματος είναι κατά πολύ βελτιωμένη σε σχέση με τα επικολλητά ελάσματα, με αποτέλεσμα την πολύ αποδοτικότερη εκμετάλλευση της εφελκυστικής αντοχής των ελασμάτων. Πέραν τούτου, η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί και σε πολύ καλύτερη προστασία των ελασμάτων από μηχανικές φθορές και θερμικά φαινόμενα. Βάσει των πειραματικών δεδομένων, αναπτύχθηκε μια μέθοδος που καθιστά δυνατή και την προένταση των ένθετων ελασμάτων, με συνέπεια την ακόμη καλύτερη εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

ABSTRACT: In this work the method of strengthening of concrete members by means of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) is treated, whereas the CFRP-lamellae are glued externally into slots. This innovative technology exhibits some advantages compared to superficially glued lamellae. The results of the experimental studies show that the bond of slotted CFRP-lamellae is significantly higher than the bond of superficially glued lamellae and thereby the tensile strength can be utilized more efficiently. Additionally, slotted lamellae are protected better against mechanical and thermal actions. On the basis of experiments a method is presented, which enables the application of prestressed slotted CFRP-lamellae and hence an improved utilization of the mechanical properties of the lamellae.

¹ Επιστ. Συνεργάτης, Υπεύθυνος Εργαστηρίου, email: ronald.mihala@boku.ac.at

² Επιστ. Συνεργάτης, email: spyridis.panagiotis@boku.ac.at

³ Καθηγητής, email: konrad.bergmeister@boku.ac.at

BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna
Department of Civil Engineering and Natural Hazards
Institute of Structural Engineering

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση συνθέτων υλικών έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα συμφέρουσα στη δομική πρακτική και ιδιαίτερα στις επεμβάσεις σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε ελάσματα από ίνες άνθρακα και συγκεκριμένα σε μία πρόσφατα ανεπτυγμένη τεχνική, την ένθεση ελασμάτων σε ρηχές εγκοπές κάθετες στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου (Near-Surface Mounted – NSM). Αν και η διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη, η τεχνική αυτή φαίνεται να αποκτά το ενδιαφέρον των κατασκευαστών λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει έναντι της πιο συνηθισμένης επιφανειακής επικόλλησης ελασμάτων και υφασμάτων από ίνες άνθρακα στις εφελκόμενες ζώνες των δομικών στοιχείων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται η σύνθεση και οι ιδιότητες των στοιχείων από ανθρακονήματα, τα χαρακτηριστικά της μεθόδου εφαρμογής σε εγκοπές καθώς και ένα καινοτόμο σύστημα αγκύρωσης και προέντασης των ελασμάτων που αναπτύχθηκε στο Institute of Structural Engineering της Βιέννης. Στόχο της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρει η χρήση στοιχείων από ίνες άνθρακα στην επισκευή και την αναβάθμιση κατασκευών σκυροδέματος.

ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΑΚΟΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

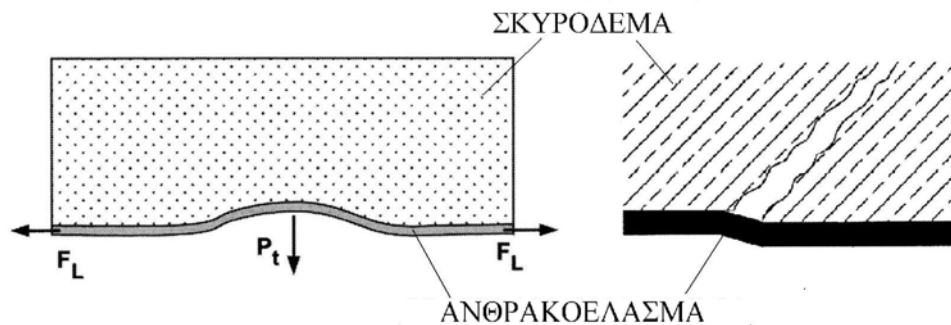
Ως ανθρακοέλασμα θεωρείται γενικά ο οπλισμός από σύνθετο υλικό με παράλληλες ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση, του οποίου η διατομή είναι συνήθως 1 έως 3 mm σε πάχος και 50 έως 300 mm σε πλάτος, ενώ διατίθεται σε πολύ μεγάλο μήκος (έως και 500 m). Η βασική ιδέα των σύνθετων υλικών, όπως το υλικό των ανθρακοελασμάτων, έγκειται στη μόρφωση στοιχείων από ίνες κάποιου οργανικού υλικού (υαλονήματα, ανθρακονήματα, ίνες αραμιδίου - κέβλαρ) με χρήση ενός συνδετικού πολυμερούς υλικού (ρητίνη). Στην περίπτωση των ελασμάτων που αναφέρονται στη συνέχεια, οι ίνες άνθρακα έχουν διατομή της τάξεως των 10 μm, περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 80-95% και αποτελούν περίπου το 70% κατ' όγκο του τελικού προϊόντος δομικού στοιχείου.

Οι μηχανικές ιδιότητες των ελασμάτων στην επιμήκη διεύθυνση μπορούν να προσδιοριστούν κυρίως βάσει του είδους των ινών και την περιεκτικότητα κατ' όγκο. Στη διεύθυνση των ινών παρουσιάζουν πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή (έως και 3000 N/mm²) και μέτρο ελαστικότητας (έως 3.000.000 N/mm²), ενώ το βάρος τους είναι πολύ μικρό σε σχέση με άλλα δομικά υλικά με αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες (πολύ μεγάλη ειδική αντοχή και ειδικό μέτρο ελαστικότητας). Επιπλέον, έχουν εξαιρετική ανθεκτικότητα σε μηχανική κόπωση. Η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση παίρνει τιμές μεταξύ 1.5 και 2%. Θεωρώντας επί μέρους συντελεστή ασφαλείας $\gamma = 2.0$ η τιμή σχεδιασμού για την ανηγμένη παραμόρφωση παίρνει τιμές αντίστοιχα από 0,6 έως 0,8%. Οι ιδιότητες αυτές των ανθρακοελασμάτων επιτρέπουν, πέραν της απλής τοποθέτησης τους ως επιπλέον

οπλισμό στα στοιχεία σκυροδέματος, τη χρήση τους ως τένοντες για εφαρμογές προέντασης. Τέλος, λόγω της δομής τους μπορούν να τυλιχθούν σε κυλίνδρους (π.χ. με συνολικό μήκος ελάσματος 250 m και βάρος 25 kg) με συνέπεια να απλοποιείται κατά πολύ η αποθήκευση, η μεταφορά, και η τοποθέτησή τους. Ως μειονέκτημα των ελασμάτων από ίνες άνθρακα πρέπει να αναφερθεί η ψαθυρότητά τους. Επίσης, η αντοχή τους στην εγκάρσια διεύθυνση και κατ' επέκταση η διατμητική αντοχή εξαρτάται κυρίως από το συνδετικό υλικό και είναι γενικά πολύ περιορισμένη.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

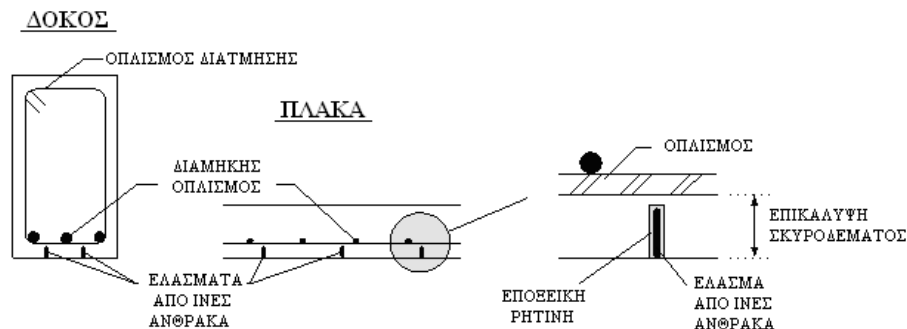
Με σκοπό τη συγκριτική παρουσίαση, κρίνεται απαραίτητη η σύντομη αναφορά στην επικρατέστερη μέθοδο για την ενίσχυση των εφελκυσμένων ζωνών. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την εξωτερική επικόλληση των ελασμάτων στην εφελκυσμένη ίνα. Με την ανάπτυξη της μεθόδου αυτής ενισχύεται κατά πολύ η συμπεριφορά του καμπτόμενου φορέα σε όρους αντοχής αλλά και παραμόρφωσης. Ωστόσο, βασικό αντικείμενο προβληματισμού σχετικά με αυτή την εφαρμογή αποτελεί η ψαθυρότητα του συστήματος καθώς και τα ελαττώματα κόλλησης με τη χρήση ρητινών. Οι ψαθυρού τύπου αστοχίες που παρατηρούνται συχνά σε τέτοιες εφαρμογές είναι η αποκόλληση των ελασμάτων με αστοχία της ρητίνης ή των διεπιφανειών σκυροδέματος – ρητίνης – ελάσματος, καθώς και η απόσχιση φλοιού του σκυροδέματος στην περιοχή που γίνεται η ενίσχυση. Συνήθης λόγος αποκόλλησης του ελάσματος είναι η απώλεια της σύνδεσης λόγω ανωμαλιών ή και ρηγμάτων στην εξωτερική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Ως εκ τούτου δημιουργείται συχνά η ανάγκη επιπλέον στερέωσης του ελάσματος με μεταλλικά αγκύρια, εγκάρσιες λωρίδες ανθρακοελασμάτων ή άλλες ειδικές διατάξεις.



Σχήμα 1. Σημειακή αποκόλληση εξωτερικά επικολλημένου ανθρακοελάσματος. (α) λόγω ανωμαλιών της εξωτερικής επιφάνειας, (F_L : Εφελκυστική συνιστώσα ελάσματος, P_t : Δύναμη αποκόλλησης) και (β) λόγω ρηγμάτωσης

ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΓΚΟΠΕΣ

Η τεχνική της ένθεσης των ελασμάτων σε εγκοπές άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη της δεκαετίας του 90. Για την υλοποίηση της μεθόδου, χαράσσονται ευθείες επιμήκεις εγκοπές κάθετα στην εφελκόμενη επιφάνεια του στοιχείου σκυροδέματος με βάθος μικρότερο από την επικάλυψη του χάλυβα οπλισμού. Εκεί στερεώνονται τα ελάσματα με χρήση εποξεικής ρητίνης ύστερα από προσεκτικό καθαρισμό των εγκοπών για την απομάκρυνση των λεπτόκοκκων θραυσμάτων από τη χάραξη. Συνήθως οι εγκοπές έχουν πλάτος 1 - 2 mm και βάθος 15 - 30 mm, ανάλογα με τις διαστάσεις του ελασματος και την επικάλυψη του σκυροδέματος. Καθώς η επικάλυψη του σκυροδέματος έχει συχνά μικρή και μη σταθερή τιμή κατά μήκος του οπλισμού, είναι απαραίτητο να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις και να ταυτοποιηθεί το ακριβές βάθος επικάλυψης ώστε να αποκλειστεί η φθορά του οπλισμού κατά τη χάραξη των εγκοπών. Αυτή η διαδικασία πρέπει να συμπεριληφθεί ήδη στην αρχική φάση σχεδιασμού - επιλογής λύσης. Η ευθυγραμμία της χάραξης εξασφαλίζεται με κατάλληλα μέσα. Η επέμβαση μέσω ένθεσης ανθρακοελασμάτων σε εγκοπές παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Επέμβαση σε καμπτόμενα στοιχεία σκυροδέματος με ένθεση ανθρακοελασμάτων σε εγκοπές

Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου ένθεσης των ελασμάτων σε εγκοπές έναντι της εξωτερικής επικόλλησης, όπως προκύπτουν από βιβλιογραφική έρευνα (Bergmeister (2003), Bergmeister (2009), Blaschko (2001), De Lorenzis & Teng (2007), El Hacha & Rizkalla (2004), GangaRao, Taly & Vijay (2007) και όπου γίνεται ειδική αναφορά):

- Υψηλότερες αντοχές κόλλησης άρα αυξημένη εκμετάλλευση του ελασματος, συνεπώς μεγαλύτερη αντοχή του ενισχυόμενου στοιχείου ή μείωση απαιτούμενης διατομής ελασματος.
- Πολύ αυξημένη πλαστιμότητα.

- Μικρότερη εξάρτηση της συμπεριφοράς του συστήματος από την αντοχή του σκυροδέματος.
- Απολύτως ευθύγραμμη θέση του ελάσματος, άρα καλύτερη εκμετάλλευση της αντοχής του.
- Ενδεχομένως χαμηλότερο κόστος της χάραξης των εγκοπών από την κατεργασία/προετοιμασία της επιφάνειας στην περίπτωση της εξωτερικής επικόλλησης.
- Καλύτερη προστασία από μηχανικές φθορές, ατμοσφαιρικές και θερμικές επιδράσεις).
- Πολύ βελτιωμένη συμπεριφορά σε κυκλική φόρτιση (Bournas & Triantafyllou 2009).

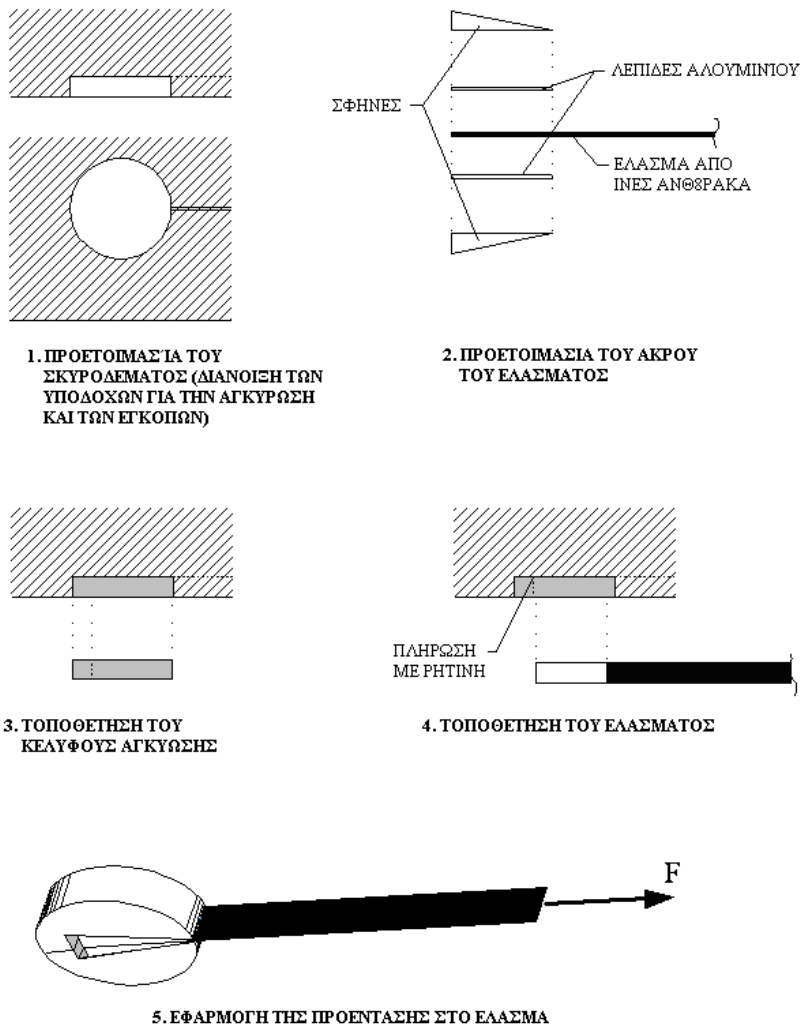
ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΓΚΟΠΕΣ

Σύστημα προέντασης

Γενικά στην προένταση των στοιχείων από ίνες άνθρακα η διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί είναι η προένταση του ελάσματος και ακολούθως η σύνδεσή του με το σκυρόδεμα. Μπορεί να γίνει ένας βασικός διαχωρισμός ανάμεσα σε συστήματα προσωρινής και μόνιμης αγκύρωσης. Οι προσωρινές αγκυρώσεις χρησιμοποιούνται για τη στερέωση των ελασμάτων καθ' όλη τη διάρκεια της σκλήρυνσης της κόλλας σύνδεσης με το σκυρόδεμα. Οι μόνιμες αγκυρώσεις εξασφαλίζουν τη μηχανική μεταφορά του φορτίου προέντασης σημειακά στο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σύστημα αγκύρωσης “CARBON ANCHOR” (Σχήμα 3) που αναπτύχθηκε στο Institute of Structural Engineering της Βιέννης (Stumpf et al (2005), Mihala et. al (2008)) και λειτουργεί ταυτόχρονα ως προσωρινή στερέωση κατά την ένθεση του ελάσματος και σκλήρυνση της κόλλας αλλά και ως μόνιμη αγκύρωση κατά τη λειτουργία του προεντεταμένου φορέα.



Σχήμα 3. Το σύστημα αγκύρωσης ανθρακοελασμάτων “CARBON ANCHOR”



Σχήμα 4. Διαδικασία συναρμολόγησης και τοποθέτησης της αγκύρωσης “CARBON ANCHOR”

Αρχικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 πρέπει να αφαιρεθεί τοπικά το σκυρόδεμα σε βάθος όσο το βάθος των εγκοπών για να δημιουργηθεί η υποδοχή των αγκυρώσεων και του συστήματος προέντασης. Το σώμα της αγκύρωσης αποτελείται από δυο δίδυμα μεταλλικά στοιχεία που σχηματίζουν ένα δισκοειδές κέλυφος με σφηνοειδές διάκενο. Τα δύο αντίστοιχα σφηνοειδή πρίσματα που εφαρμόζονται σε αυτό το διάκενο συνδέονται με το άκρο του ελάσματος μέσω

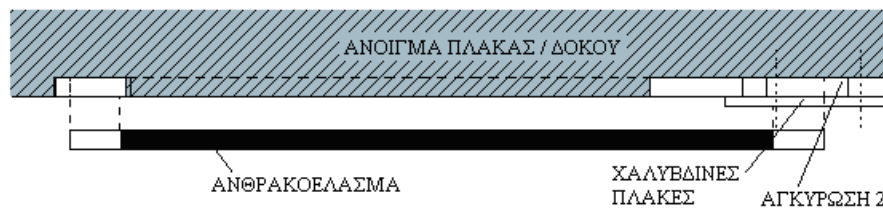
ένθετων λεπίδων αλουμινίου πάχους 1,5 mm. Αυτές οι λεπίδες αλουμινίου είναι κολλημένες εκατέρωθεν του ανθρακοελάσματος με ρητίνη. Κατά την τάνυση του ελάσματος, οι μεταλλικές σφήνες προκαλούν πλάγιες δυνάμεις που μεταφέρονται στο σκυρόδεμα ως δυνάμεις διόγκωσης του κελύφους με αποτέλεσμα τη μηχανική αγκύρωση του συστήματος. Η κόλληση του ελάσματος με τις λεπίδες αλουμινίου είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι στην αρχή της φόρτισης οι πλάγιες δυνάμεις δεν είναι αρκετές για να συγκρατήσουν το έλασμα στην αγκύρωση. Τα υλικά της αγκύρωσης είναι χάλυβας κλάσης Fe 510.

Στην πλευρά που γίνεται η τάνυση το σύστημα αγκύρωσης παραμένει, ωστόσο προβλέπεται η κατάλληλη διάταξη εφαρμογής της προέντασης που περιλαμβάνει μια αντλία υψηλής πίεσης και έναν οδηγό για τη διάταξη συγκράτησης και έλξης του ανθρακοελάσματος. Ο οδηγός αποτελείται από δύο χαλύβδινες πλάκες συνδεδεμένες στο σκυρόδεμα μέσω αγκυριών, ανάμεσα στις οποίες σύρεται με τη λειτουργία της αντλίας η διάταξη συγκράτησης του ελάσματος. Κατά την απομά-

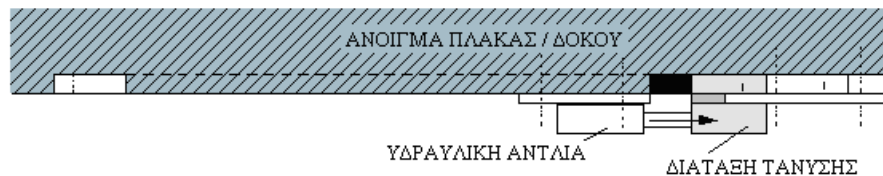
1. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΥΠΟΔΟΧΩΝ, ΧΑΡΑΞΗ ΕΓΚΟΠΗΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ



2. ΣΤΕΡΕΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΛΑΚΩΝ, ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

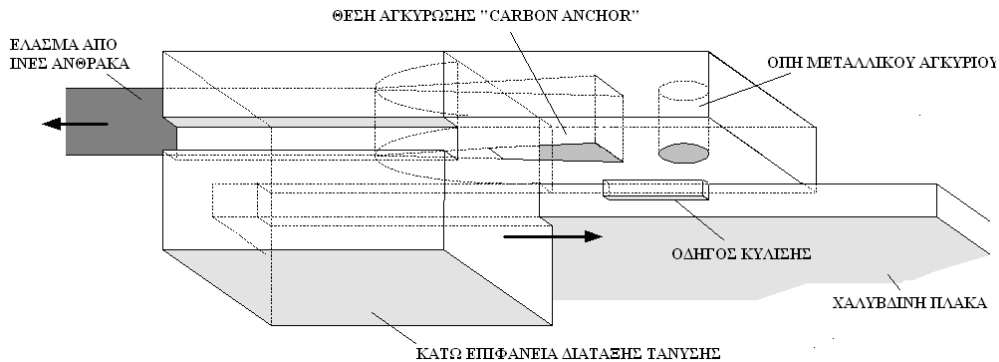


3. ΣΤΕΡΕΩΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ, ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΑΝΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ



Σχήμα 5. Προτεινόμενη διαδικασία προέντασης ανθρακοελασμάτων σε εγκοπών (Λεπτομέρεια της διατάξεως τάνυσης στο Σχήμα 6)

κρυνση της αντλίας προέντασης, η διάταξη συγκράτησης στερεώνεται στο σκυρόδεμα με μεταλλικό αγκύριο. Όταν το έλασμα τανυστεί και στερεωθεί αφού σκληρυνθεί η κόλλα δύο συστατικών, το επιπλέον αγκύριο στερέωσης και οι πλάκες – οδηγοί μπορούν να απομακρυνθούν και να χρησιμοποιηθούν σε επόμενη θέση προέντασης. Η προσθήκη της ρητίνης μέσα στην εγκοπή εξασφαλίζει την ομαλή διανομή της δύναμης προέντασης σε όλο το μήκος και τη σύμμεκτη καμπτική λειτουργία. Τα βασικά βήματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Σκαρίφημα της διάταξης τάνυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Λεπτομέρεια προτεινόμενης διάταξης τάνυσης ανθρακοελάσματος

Πειραματική διερεύνηση

Τα πειράματα εφελκυσμού αγκυρωμένων ελασμάτων έγιναν σε σκυρόδεμα κλάσης C20/25 και C50/60 σε δοκίμια διαστάσεων 2500 x 2500 x 150 mm. Αρχικά διανοίχτηκε οπή διαμέτρου ίσης με αυτήν του αγκυρίου “CARBON ANCHOR” (100 mm) με δρόπανο διάτρησης (καροτιέρα) και στη συνέχεια με σκαρπέλο σε βάθος περίπου 22 mm. Στη συνέχεια χαράχτηκε εγκοπή με αδαμάντινο τροχό πάχους 3 mm στο ίδιο βάθος. Η στερέωση του κελύφους του αγκυρίου στη οπή, όπως και όλες οι απαιτούμενες κολλήσεις, πραγματοποιήθηκε με εποξεική ρητίνη δύο συστατικών. Το ελεύθερο άκρο του ελάσματος, αφού επικολλήθηκαν λεπίδες αλουμινίου, συσφίχτηκε μεταξύ δύο χαλύβδινων πλακών με τραχείες επιφάνειες οι οποίες στη συνέχεια συνδέθηκαν με προεντεταμένους κοχλίες, ώστε να προσαρμοσθούν στον κύλινδρο εφελκυσμού (αριστερά στο Σχήμα 7). Οι υπόλοιπη προετοιμασία των πειραμάτων έγινε σύμφωνα με την περιγραφή της μεθόδου στην προηγούμενη παράγραφο και στο Σχήμα 4. Η γενική διάταξη των πειραμάτων φαίνεται στο Σχήμα 7, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες και η διατομή των ανθρακοελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 7. Απεικόνιση της γενικής διάταξης των πειραμάτων

Πίνακας 1. Μηχ. ιδιότητες και διαστάσεις ανθρακοελάσματος.

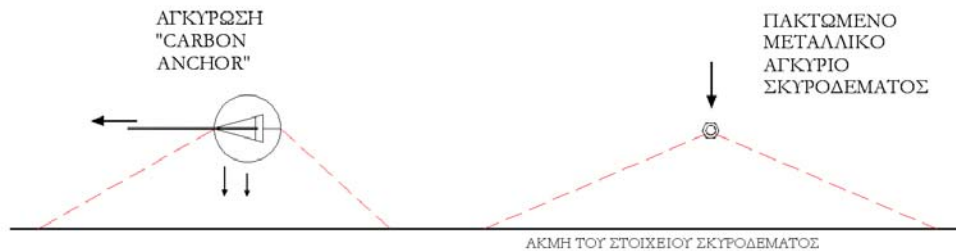
Μέτρο ελαστικότητας	164000 MPa
Εφελκυστική Αντοχή	2800-3000 MPa
Μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση	1,4 %
Πλάτος ελάσματος	1,4 mm
Πάχος ελάσματος	20 mm

Αποτελέσματα πειραμάτων

Για να διαπιστωθεί η δυνατότητα της χρήσης της αγκύρωσης “CARBON ANCHOR”, πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά πειράματα σε σκυρόδεμα μέσης και υψηλής αντοχής, ενώ επίσης εξετάστηκε η επιρροή της απόστασης από το άκρο του στοιχείου σκυροδέματος στην αντοχή της αγκύρωσης. Στα πειράματα που έγιναν μακριά από το άκρο για τους δύο τύπους σκυροδέματος η μορφή αστοχίας ήταν εφελκυστική θραύση του ελάσματος. Όσον αφορά τα πειράματα με επιρροή του άκρου, για απόσταση έως 200 mm, παρουσιάστηκε αστοχία της ακμής του στοιχείου σκυροδέματος (Σχήμα 8). Η γεωμετρία του πρίσματος αποκόλλησης είναι παρόμοια με εκείνη της εγκάρσιας φόρτισης αγκυρίων κοντά στο άκρο. (Σχήμα 9). Καθώς το φορτίο αυξάνεται, εμφανίζονται ρηγματώσεις που ξεκινούν από το κέλυφος της αγκύρωσης και κατευθύνονται προς το ελεύθερο άκρο, σχηματίζοντας γωνία περίπου 30° με την ακμή του δομικού στοιχείου. Η αστοχία επέρχεται με υπέρβαση της αντοχής του σκυροδέματος σε συνδυασμό εφελκυσμού και διάτμησης, όπως περιγράφεται λεπτομερώς από τους Eligehausen, Malleé & Silva (2006). Για αποστάσεις από το άκρο της τάξης των 250 mm παρουσιάζεται μια μεταβατική περιοχή στην αστοχία, με ανάπτυξη τριχοειδούς ρηγμάτωσης στο σκυρόδεμα υπό γωνία περίπου 30° . Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, το άκρο του στοιχείου σκυροδέματος μπορεί να αντέξει τις συνθήκες φόρτισης και η τελική αστοχία χαρακτηρίζεται από τη ρήξη του ανθρακοελάσματος. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων.



Σχήμα 8. Περιπτώσεις αστοχίας σκυροδέματος με επιρροή του ορίου



Σχήμα 9. Σκαρίφημα της ρηγμάτωσης για (αρ.) την αγκύρωση “CARBON ANCHOR” και (δεξ.) αγκύριο σκυροδέματος υπό εγκάρσιο φορτίο.

Διαδικασία υπολογισμού

Η εγκάρσια δύναμη από τη έκταση του κελύφους υπολογίζεται από την εξίσωση (1) (βλ. και σχήμα 10):

$$F_{EXP} = \frac{F_L}{2 \cdot \tan(\alpha + \delta)} \quad (1)$$

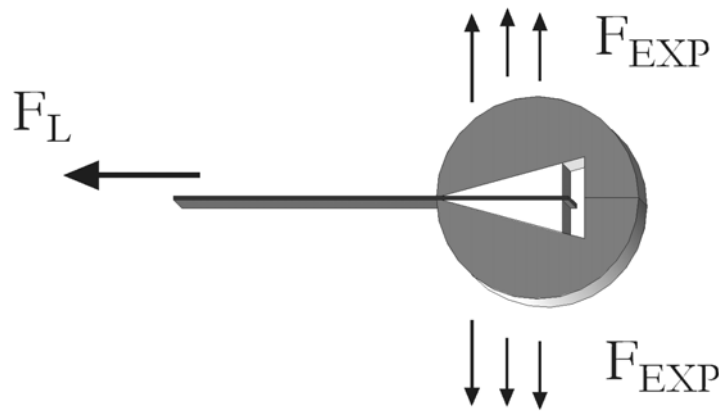
όπου: F_{EXP} : Πλάγια δύναμη έκτασης του κελύφους της αγκύρωσης [N]
 F_L : Αξονικό φορτίο του ελάσματος [N]
 α : γωνία μεταλλικής σφήνας, $\alpha = 8^\circ$
 δ : γωνία τριβής, $\delta = \arctan(\mu)$
 μ : συντελεστής τριβής χάλυβας – χάλυβας, $\mu = 0.1$

Το φορτίο αστοχίας τύπου απόσχισης πλευρικού κώνου μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 3, η οποία βασίζεται στην αναλυτική εξίσωση 2 που χρησιμοποιείται στη διαστασιολόγηση αγκυρίων στο σκυρόδεμα (CCD Method, Eligehausen, Malleé & Silva (2006)). Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται και από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τον υπολογισμό μεταλλικών αγκυρίων σκυροδέματος (EOTA 1997):

$$\text{μετ. αγκύριο: } R_{c,m} = 0.9 \cdot \left(\frac{l_f}{d_{nom}} \right)^{0.2} \cdot \sqrt{d_{nom}} \cdot \sqrt{f_{c,cube}} \cdot c^{1.5} \quad (2)$$

$$\text{"Carbon Anchor": } R_{c,m} = 16,3 \cdot \sqrt{f_{c,cube}} \cdot c^{1.3} \quad (3)$$

όπου: $R_{c,m}$: Μέσο φορτίο αστοχίας σκυροδέματος [N]
 d_{nom} : Διάμετρος αγκυρίου
 l_f : Βάθος αγκύρωσης
 c : Απόσταση από το άκρο
 $f_{c,cube}$: Μέση θλιπτική αντοχή κυβικού δοκιμίου 200 mm [N/mm²]



Σχήμα 10. Ανάλυση δυνάμεων στην αγκύρωση

Με εξίσωση των δύο παραπάνω σχέσεων ($R_{c,m} = F_{EXP}$) προκύπτει η υπολογιστική αντοχή της αγκύρωσης "CARBON ANCHOR" με επιρροή του άκρου:

$$F_{Lu,calc} = 8,0 \cdot \sqrt{f_{c,cube}} \cdot c^{1.3} \quad (4)$$

Όπως προκύπτει και από τον πίνακα 2, η προτεινόμενη εξίσωση μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την αστοχία σκυροδέματος για την αγκύρωση, αλλά προπαντός με ασφάλεια: Όλες οι τιμές της υπολογιστικής αντοχής $F_{Lu,calc}$ είναι κατά 15% περίπου χαμηλότερες από την αντοχή που μετρήθηκε πειραματικά. Στην τελευταία σειρά του πίνακα, η τιμή $F_{Lu,calc}$ προκύπτει από την τιμή της αστοχίας του ελάσματος (αντοχή x διατομή).

Πίνακας 2. Αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης

Απόσταση από το άκρο [mm]	Κλάση Σκυροδέματος	F_u [kN]	$F_{u,m}$ [kN]	Τύπος Αστοχίας	$F_{Lu,calc}$ [kN]
100	C20/25	18,40	18,40	Σκυρόδεμα	15.92
150	C20/25	31,90	31,60	Σκυρόδεμα	26.98
150	C20/25	31,30		Σκυρόδεμα	
200	C20/25	47,50	45,80	Σκυρόδεμα	39.21
200	C20/25	44,20		Σκυρόδεμα	
250	C20/25	60,40	60,10	Έλασμα	52.41
250	C20/25	59,90		Έλασμα	
Χωρίς επιρροή	C20/25	66,90	71,90	Έλασμα	78,40
Χωρίς επιρροή	C50/60	76,90		Έλασμα	

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Πέραν των οικείων πλεονεκτημάτων της προέντασης φορέων από σκυρόδεμα, όπως είναι η αύξηση της διαθέσιμης αντοχής και ο περιορισμός των παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα καθώς αποτελεί μια βελτιωμένη εφαρμογή της προέντασης εξωτερικά επικολλώμενων ελασμάτων από ίνες άνθρακα, αλλά και μια υβριδική μορφή μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής προέντασης. Τα βασικότερα πρόσθετα πλεονεκτήματα συνοψίζονται παρακάτω :

- Πολύ ασφαλής σύνδεση του ανθρακοελάσματος με το σκυρόδεμα
- Αυξημένη πλαστιμότητα – ελαχιστοποίηση πιθανότητας ψαθυρής αστοχίας
- Προστασία των τενόντων από εξωτερικές επιδράσεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση πυρκαγιάς το βασικό πρόβλημα είναι η αστοχία της κόλλησης στο σκυρόδεμα και απαιτείται πρόσθετη ειδική μόνωση (Foster & Bisby 2005). Ωστόσο η μηχανική αγκύρωση μπορεί να διατηρήσει το φέρον σύστημα σε λειτουργία σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες
- Καμία αλλοίωση των διαστάσεων και της εξωτερικής μορφής του στοιχείου σκυροδέματος λόγω των τενόντων

ΣΥΓΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στο παρόν άρθρο γίνεται μία σύντομη επισκόπηση των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων από ίνες άνθρακα και επισημαίνονται προβληματισμοί για τη μέχρι τώρα χρήση τους στις επεμβάσεις σε καμπτόμενα στοιχεία σκυροδέματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία καινοτόμος μέθοδος επισκευής και αναβάθμισης με τη χρήση ελασμάτων άνθρακα σε εγκοπές κάθετα στη εφελκυσόμενη επιφάνεια του στοιχείου σκυροδέματος. Η προέκταση των ελασμάτων με τη χρήση ειδικών συστημάτων μηχανικής αγκύρωσης αναδεικνύεται ως μια μέθοδος με πολλά πλεονεκτήματα έναντι διαφόρων άλλων μεθόδων επέμβασης με ανθρακονήματα καθώς και εξωτερικής προέκτασης υφιστάμενων κατασκευών. Σημειώνεται, ότι το προτεινόμενο σύστημα τάνυσης του ελάσματος βρίσκεται ακόμη σε φάση σχεδιασμού και δεν έχει εφαρμοσθεί ολοκληρωμένα στην πράξη. Ωστόσο, κατάλληλα πειράματα ελέγχου των αγκυρώσεων δείχνουν ότι αυτή η τεχνική έχει ελεγχόμενη συμπεριφορά, ενώ έχει αναπτυχτεί και μια ενδεικνυόμενη μέθοδος διαστασιολόγησης της ζώνης αγκύρωσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Bergmeister K., “Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau” (Ανθρακονήματα στη δομική τεχνική), Ernst & Sohn, Berlin (2003)

Bergmeister K., “Επισκευές υφιστάμενων κατασκευών – Ενίσχυση με Ανθρακονήματα” (Ανθρακονήματα στην τεχνική των κατασκευών), in “Beton Kalender 2009”, ed. Bergmeister, K., Fingerloos, F. & Wörner, J.D., Ernst & Sohn, Berlin (2009) 185 – 230

Blaschko M., (2001): “Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitz eingeklebten CFK Lamellen“ (Σχετικά με τη δομική συμπεριφορά δομικών στοιχείων με ελάσματα από ίνες άνθρακα κολλημένα σε εγκοπές) Διδακτορική διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. K. Zilch), TU Munich

Bournas, D.A., Triantafyllou, T.C., “Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Columns with Near-Surface-Mounted FRP or Stainless Steel”, ACI Structural Journal, Vol. 106, No 4 (July-August 2009) 495-505

De Lorenzis L. & Teng J.G., “Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures”, Composites Part B: Engineering, Vol.38, Issue 2 (March 2007) 119-143

El-Hacha, R. & Rizkalla S.H., “Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures”, ACI Structural Journal, Vol. 101, No 5 (September – October 2004) 717 – 726

Eligehausen, R., Malleé, R., Silva, J., “Anchorage in Concrete Construction”, Ernst & Sohn, Berlin (2006)

European Organization for Technical Approvals – EOTA. “ETAG 001: Metal Anchors for Use in Concrete” (1997), www.eota.be

Foster, S.K. & Bisby, L.A., “High Temperature Residual Properties of Externally-Bonded FRP Systems” in: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures (Kansas City USA, November 6-9, American Concrete Institute, Kansas City (2005)

GangaRao, H.V.S., Taly N., Vijay, P. V., “Reinforced Concrete Design with FRP Composites”, CRC Press, Boca Raton (2007)

Mihala, R., Unterweger A., Spyridis P., Rieder A. & Bergmeister K., “Strengthening of concrete members by means of carbon fiber reinforced polymers (CFRP)”, in: 4th CCC Scientific Symposium “Concrete Engineering in Urban Development” (Opatija, October 2-3, 2008), J. Radic, J. Bleiziffer, Opatija 2008

Stumpf, R. “Experimentelle Untersuchungen von eingeschlitzten CFK-Lamellen in Beton” (Πειραματική διερεύνηση ελάσματος από ίνες άνθρακα σε εγκοπές) Διπλωματική εργασία (υπό την επίβλεψη των K. Bergmeister και A. Rieder), Institute of Structural Engineering, BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna (2005)