

Συσχέτιση των επιφανειακών ρωγμών διάβρωσης και της δύναμης συνάφειας (χάλυβα-σκυροδέματος)

Correlation of surface corrosion cracks and bond strength (steel bar and concrete)

Αλκιβιάδης ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ¹, Κωνσταντίνος ΚΟΥΛΟΥΡΗΣ²,
Ευάγγελος ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ³, Χάρης ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ⁴

Λέξεις κλειδιά: Διάβρωση Χάλυβα, Επιφανειακή Ρηγμάτωση Σκυροδέματος, Δύναμη Συνάφειας.

Keywords: Steel Corrosion, Concrete Surface Cracking, Bond Strength

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Ως γνωστό, τα προϊόντα διάβρωσης του σιδηροοπλισμού των δομικών στοιχείων των κατασκευών, είναι υπαίτια ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων στο περιβάλλον, προκαλώντας επιφανειακές ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα και υποβάθμιση των δυνάμεων δεσμού χάλυβα και σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής βλάβης διάβρωσης κατάλληλα ημικιβωτισμένων (στο σκυρόδεμα) δοκιμίων χάλυβα καθώς και η απομείωση της δύναμης συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος για διάφορα επίπεδα διάβρωσης. Εν προκειμένω, εξετάστηκαν δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικές χαρακτηριστικές παραμέτρους όπως η απόσταση μεταξύ συνδετήρων και το πάχος επικάλυψης. Πραγματοποιήθηκε επίσης, συσχετισμός μεταξύ του μέσου πλάτους της επιφανειακής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και της δύναμης συνάφειας. Από την μελέτη προέκυψε ότι τα καταγραφέντα εύρη επιφανειακής ρηγμάτωσης, σχετίζονται στενά τόσο με την ποσοστιαία απώλεια μάζας του εγκιβωτισμένου τμήματος του σιδηροοπλισμού όσο και με τη μεταξύ των συνδετήρων απόσταση. Το εύρος δε της επιφανειακής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος συνδέεται με εκθετική μείωση της δύναμης του δεσμού συνάφειας σιδηροοπλισμού - σκυροδέματος.

ABSTRACT : As is well known, the corrosion products of steel bars in structural elements of structures are responsible for the development of tensile stresses in surrounding concrete, causing surface cracks in structural members and deterioration of the bond between steel and concrete.

¹ Διδάκτορας Πολιτικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: prothesis.apostolopoulos@gmail.com

² Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός, υποψήφιος Διδάκτορας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, email: kkoulouris@upnet.gr

³ Διδάκτορας Χημικός Μηχανικός, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, email: vgrapadakis@upatras.gr

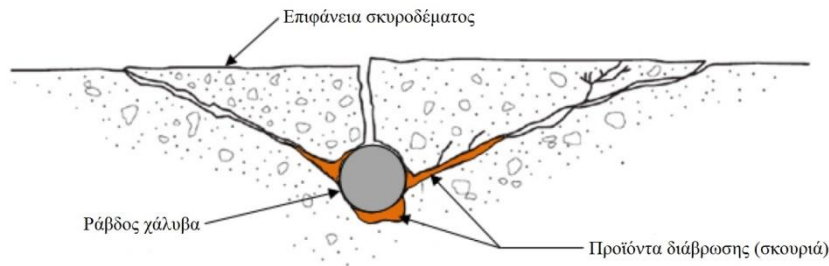
⁴ Διδάκτορας Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, email: charrisa@upatras.gr

This study shows results of experimental corrosion tests in samples of steel bars, appropriate semi-embedded (in concrete), and of bond strength reduction between steel and concrete for different corrosion levels. In that case, reinforced concrete samples with different characteristic parameters, such as the spacing between stirrups and the concrete cover thickness, were tested. A correlation was also made between the mean width of the crack on the concrete surface and bond strength. The study showed that the width of the measured surface crack is closely related to both the percentage mass loss of the embedded part of steel bar and the distance between stirrups. The range of surface cracking of the concrete is associated with an exponential reduction of the bond strength.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα υποβάθμισης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Στις χώρες της λεκάνης της Μεσογείου (Ελλάδα- Κύπρος- Ιταλία- Τουρκία), τα φαινόμενα της βλάβης διάβρωσης εντείνονται ακόμη περισσότερο εξαιτίας των υψηλών μέσων θερμοκρασιών περιβάλλοντος και της σχετικά υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων σε σχέση με χώρες της Β. Ευρώπης. Οι συνέπειες της βλάβης διάβρωσης έχουν αντίκτυπο τόσο στην ασφάλεια των κατασκευών όσο και στην απαιτούμενη δαπάνη οικονομικών πόρων. Η υποβάθμιση της ανθεκτικότητας και η διάβρωση του σιδηροοπλισμού είναι φαινόμενα αλληλένδετα, παράλληλα και χρονικά εξαρτημένα, εν τούτοις, δεν λαμβάνονται υπ' όψη στα κανονιστικά κείμενα για τον ανασχεδιασμό των κατασκευών καθώς δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί.

Σημαντικές και γνωστές είναι οι συνέπειες της βλάβης διάβρωσης στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σιδηροοπλισμού ιδιαίτερα όταν αυτή προέρχεται από τη δράση χλωριόντων (Liu, Y. 1998, Ch. Apostolopoulos 2007, Ch. Apostolopoulos 2013). Έρευνες έδειξαν ότι σημαντικό μέρος του ετήσιου προϋπολογισμού πολλών χωρών, δαπανάται στη συντήρηση, την επισκευή και αποκατάσταση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος λόγω βλάβης διάβρωσης (Transportation Research Board 1991, Wallbank E.J. 1989). Αποτέλεσμα της διαβρωτικής διεργασίας στον εγκιβωτισμένο χάλυβα είναι η παραγωγή οξειδίων που καταλαμβάνουν 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο όγκο του προσβαλλόμενου σιδηροοπλισμού, προκαλώντας εφελκυστικές τάσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Συνέπεια τούτων, είναι η ανάπτυξη μικρορωγμών στο σκυρόδεμα και εν συνεχεία η σταδιακή διάρρηξη του σκυροδέματος ακόμη και η αποκόλληση της επικάλυψης. (Σχήμα 1) (Apostolopoulos Ch. 2008).



Σχήμα 1. Η ανάπτυξη οξειδίων, συνοδεύεται με εφελκυστικές τάσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα και επιφανειακές ρηγματώσεις. (Elbusaefi, 2014).

Πέραν όμως των επιπτώσεων στη μηχανική απόδοση του χάλυβα, η διάβρωση συνδέεται με αρνητικές συνέπειες στις δυνάμεις του δεσμού συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος (Fu X. 1997, Stanish K. 1997). Είναι γνωστό, ότι η απώλεια του δεσμού συνάφειας, λόγω διάβρωσης, συνοδεύεται από σχετική ολίσθηση των υλικών (σκυρόδεμα-χάλυβας), έτσι που το δομικό στοιχείο να συμπεριφέρεται ως "άοπλο". Η αξιοπιστία των δυνάμεων συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, ελέγχονται κυρίως από: τη χημική πρόσφυση, την τριβή και τη μηχανική πρόσφυση (ACI 408R-03 2012). Οι (Li και Zheng 2005) έδειξαν ότι η μηχανική υποβάθμιση της συνάφειας οφείλεται σε σειρά παραγόντων όπως: η γεωμετρία της ράβδου, το προφίλ της επιφάνειάς της, η σύνθεση του σκυροδέματος, η θλιπτική αντοχή του και το πάχος της επικάλυψης c. Ο Maslehuddin (1990) έδειξε ότι χαμηλά επίπεδα βλάβης διάβρωσης, προσωρινά βελτιώνουν τον δεσμό συνάφειας καθώς στην συνέχεια με την εξέλιξη των διαβρωτικών φαινομένων επέρχεται ταχεία υποβάθμιση. Αντίστοιχα, ο Auyeung (2001), αναφέρει ότι η απώλεια του δεσμού συνάφειας σε διαβρωμένες ράβδους οπλισμού δίχως περίσφιξη, είναι κρισιμότερη από τη μείωση της εγκάρσιας διατομής, καθώς περίπου 2% απώλεια διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε 80% μείωση του δεσμού συνάφειας. Η σημαντική συνεισφορά της παρουσίας εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων), αναδεικνύεται λεπτομερώς και από την Lundgren (2007). Λόγοι παρακολούθησης των παράκτιων και των κατασκευών εν γένει που υποφέρουν από την παρουσία χλωριόντων, ωθούν συχνά τους επιθεωρητές έργων, να συσχετίσουν την διάρκεια ζωής των κατασκευών με την περιεκτικότητα χλωριδίων στο σκυρόδεμα καθώς τούτο συνιστά μία γενικά αποδεκτή σταθερή πρακτική. Είναι γνωστό εξάλλου ότι τα μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής για την έναρξη της διάβρωσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, στην πλειονότητα τους απαιτούν οριακή τιμή (κατώφλι) περιεκτικότητας χλωριδίου (CTV).

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχει επικρατήσει ούτε έχει καθιερωθεί (συγκεκριμένη) τιμή που να έχει επαληθευτεί ευρέως από τους

ερευνητές. Το γεγονός αυτό, σχετίζεται σε σημαντικό βαθμό με την αδυναμία αποδοχής συγκεκριμένης αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού της τιμής του κατωφλίου χλωριδίων, με συνέπεια πολλές παρερμηνείες και διαφορετικά αποτελέσματα. Οι σημαντικότερες προδιαγραφές που σχετίζονται με την περιεκτικότητα χλωριδίων στο σκυρόδεμα που παρατίθενται (ACI 318M-14 2014, ACI 201.2R-01 2001, AS 1379 2007, CSA, CSA A23.1-09/A23.2-09 2009, ASTM C1202 2012, EN206-1 2004, BIS 2000, Code of practice for structural use of concrete 2013, NZS 3101-Part 1 1997), αποτυπώνουν ανάγλυφα και την διαφορετική προσέγγιση στο εν λόγω ζήτημα.

Οι τεχνικές επιθεωρήσεις αποτίμησης της ανθεκτικότητας του φέροντος οργανισμού των κατασκευών αποτελεί μία ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία. Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος όπου ο σιδηροοπλισμός δεν είναι οπτικά προσβάσιμος, εκεί οι μετρήσεις χλωριδίων και η εκτίμηση της βλάβης διάβρωσης είναι ελεγχόμενης αξιοπιστίας. Αντίθετα όμως με τα ανωτέρω, η εκδήλωση και η ποσοτικοποίηση του εύρους των επιφανειακών ρωγμών στο σκυρόδεμα είναι ορατή και μετρήσιμη. Με βάση το γεγονός αυτό ήδη καταγράφεται μία τάση από ορισμένους ερευνητές ώστε να συσχετίσουν τις επιφανειακές ρωγμές του σκυροδέματος με τη βλάβη διάβρωσης του σιδηροοπλισμού και την υποβάθμιση των δυνάμεων του δεσμού συνάφειάς του τοπικά με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Πρόσφατες δε έρευνες από τους Andrade et al (2016) και Tahershamsi (2016) παρέχουν πληροφορίες και αποτελέσματα συσχέτισης του εύρους της επιφανειακής ρωγμής με το επίπεδο διάβρωσης και την υποβάθμιση της δύναμης του δεσμού συνάφειας.

Στην παρούσα εργασία τίθενται προς συζήτηση και ανάλυση τα αποτελέσματα ευρείας πειραματικής μελέτης περί της συσχέτισης της υποβάθμισης των δυνάμεων του δεσμού συνάφειας και του εύρους (πλάτους) της επιφανειακής ρωγμάτωσης. Κυριότεροι παράμετροι εισαγωγής στη συσχέτιση αυτή, είναι το πάχος επικάλυψης c , η πυκνότητα των συνδετήρων, η κατηγορία σκυροδέματος και ο βαθμός βλάβης διάβρωσης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παρούσα εργασία η επίτευξη ελεγχόμενης βλάβης διάβρωσης πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικής επιταχυνόμενης τεχνικής.

Με στόχο την εξέταση της επίδρασης διαφορετικών βαθμών βλάβης διάβρωσης στη δύναμη συνάφειας, καταρχάς διενεργήθηκαν πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος όπου η βλάβη περιορίστηκε σε μία κύρια ράβδο και στους συνδετήρες κατάλληλα εγκιβωτισμένων σε πρισματικό δοκίμιο σκυροδέματος. Στη συνέχεια, χαρτογραφήθηκε, μετρήθηκε και υπολογίστηκε το μέσο εύρος της επιφανειακής ρηγμάτωσης στο σκυρόδεμα

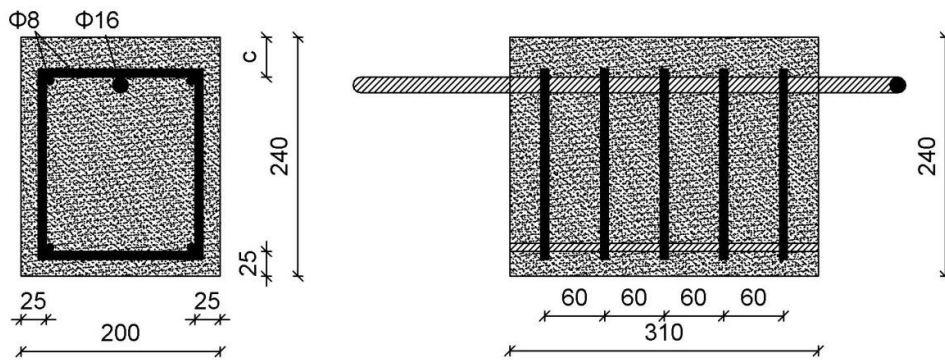
λόγω της επελθούσας βλάβης στον χάλυβα (Σχήμα 2). Προκειμένου δε να προσδιοριστεί η μεταβολή της αντοχής συνάφειας για κάθε επίπεδο διάβρωσης, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων εξόλκευσης (pull-out tests) πριν και μετά από την διάβρωση. Έκαστο δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος είχε διαστάσεις 24x20x31 (cm), με κύριο ημικιβωτισμένο στο σκυρόδεμα διαμήκη οπλισμό διαμέτρου 16mm, κατηγορίας B500c. Εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις εγκάρσιου οπλισμού όπως: α) δοκίμια δίχως συνδετήρες, β) δοκίμια με συνδετήρες ΣΦ8/240mm, γ) δοκίμια με συνδετήρες ΣΦ8/120mm και δ) δοκίμια με συνδετήρες ΣΦ8/60mm. Άλλη παράμετρος που εξετάστηκε παράλληλα με τα ανωτέρω, ήταν δύο περιπτώσεις επικάλυψης σκυροδέματος (κατηγορίας C20/25) πάχους 25mm και πάχους 40mm αντίστοιχα (Σχήμα 3). Της σκυροδέτησης, ακολούθησε περίοδος συντήρησης (curing) των δοκιμών 28 ημερών. Με το πέρας του διαστήματος των 28 ημερών, τα δοκίμια, τοποθετήθηκαν σε κελιά ηλεκτροδιάβρωσης με διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 5% κατά βάρος νερού, παρουσία ράβδου ανοξείδωτου χάλυβα (κάθοδος του κυκλώματος) στην ίδια διεύθυνση με τον εγκιβωτισμένο χάλυβα. Με σκοπό την επίτευξη διαφορετικών επιπέδων βλάβης διάβρωσης, τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος παρέμειναν στα κελιά για διαφορετικούς χρόνους επιβάλλοντας εξωτερικό ρεύμα 0.5mA/cm².

Μετά το πέρας της ηλεκτροδιάβρωσης παρατηρήθηκαν επιφανειακές ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα παράλληλες στο διαμήκη και εγκάρσιο σιδηροοπλισμό. Καταγράφηκαν οι τιμές του πλάτους των εν λόγω ρωγμών, από μετρήσεις σε διακριτά τμήματα ρωγμής μήκους 20 mm έως 50 mm / 5mm έκαστο, δηλαδή ανά διαστήματα 5mm για το κάθε επιμέρους μήκος ρωγμής και εν τέλει, υπολογίστηκε το μέσο εύρος ρωγμής για κάθε επίπεδο διάβρωσης.

Για την μελέτη της μεταβολής του δεσμού συνάφειας μεταξύ του κύριου σιδηροοπλισμού και του σκυροδέματος, σε όλα τα δοκίμια (διαβρωμένα και μη διαβρωμένα) πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης. Προς τούτο, σχεδιάστηκε συγκεκριμένη ιδιοσυσκευή (Σχήμα 4), η οποία επιτρέπει την απευθείας μεταφορά της εκάστοτε επιβαλλόμενης δύναμης από τον χάλυβα στο σκυρόδεμα. Οι μηχανικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε σερβοϋδραυλική μηχανή γενικών δοκιμών MTS ($P_{max}=200$ kN) επί της οποίας προσαρμόστηκε κατάλληλα η ιδιοσυσκευή του Σχήματος 4.



Σχήμα 2. Η λόγω διάβρωσης επιφανειακή ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα (δοκίμιο δίχως συνδετήρες).



Σχήμα 3. Αριστερά, τυπική άποψη της διατομής (μεταβαλλόμενου πάχος επικάλυψης c) - Δεξιά, άποψη της κατά μήκος διάταξης σιδηροοπλισμού (συνδετήρες Φ8/60mm).



Σχήμα 4. Αριστερά, η ιδιοσυσκευή μεταφοράς δύναμης από τον σιδηροοπλισμό στο σκυροδέμα. Δεξιά, πειραματική διαδικασία μέτρησης της αντοχής συνάφειας μέσω της ιδιοσυσκευής σε σερβοϋδραυλική μηχανή MTS.

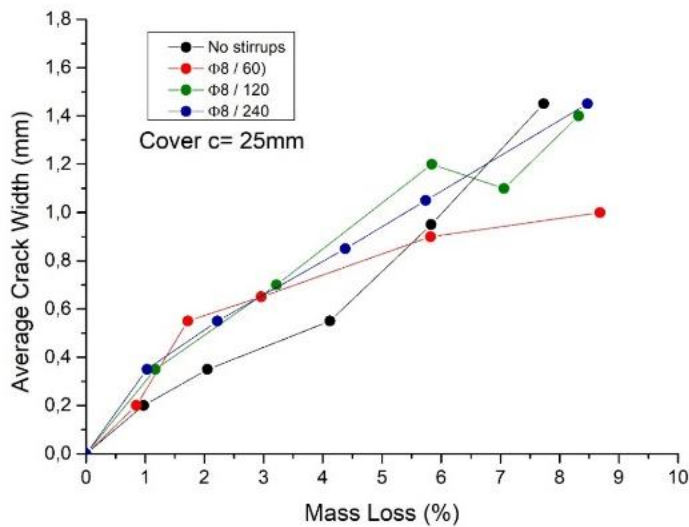
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η απώλεια της παθητικής προστασίας του χάλυβα είχε ως αποτέλεσμα την γρήγορη διάβρωση του και εκ του λόγου αυτού, την γραμμική (κατά μήκος των χαλύβων) εμφάνιση ποικίλου εύρους ρηγματώση του σκυροδέματος.

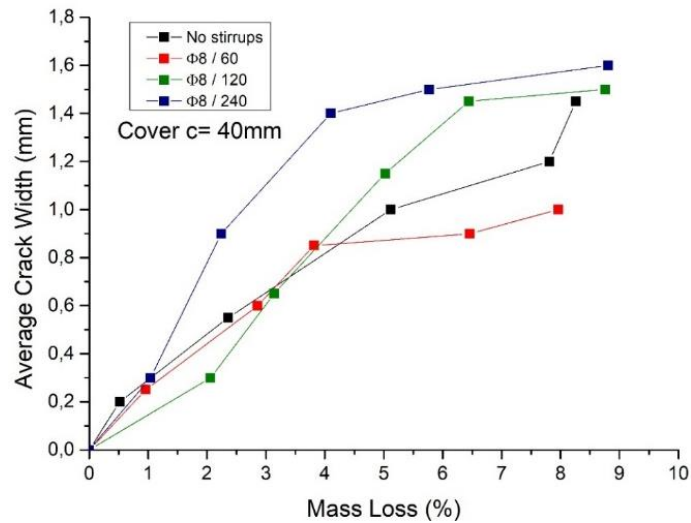
Μετά από τις μετρήσεις του εύρους ρηγματώσης, υπολογίστηκε το μέσο εύρος και σε συνδυασμό με την υπολογισθείσα απώλεια μάζας του χάλυβα, συντάχθηκαν τα διαγράμματα που φαίνονται στα Σχήματα 5 και 6. Με βάση ένα σταθερό πρόγραμμα διαρκούς παρακολούθησης των επιφανειακών ρηγματώσεων, πραγματοποιήθηκαν συνεχείς μετρήσεις των ρηγματώσεων (μήκος και πλάτος). Από τα διαγράμματα αυτά προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Η ομάδα δοκιμών με πάχος επικάλυψης 25 mm (Σχήμα 5) μέχρι την απώλεια μάζας **6%-7%**, παρουσίασε κοινό εύρος επιφανειακών ρηγματώσεων. Παρότι αρχικά τα δοκίμια της σειράς με ΣΦ8/60 εμφάνισαν τα υψηλότερα εύρη ρηγματώσης (αυτό δικαιολογείται από την ποσοστιαία υψηλή ποσότητα χάλυβα), στην συνέχεια τα δοκίμια αυτά επέδειξαν εμφανώς περιοριστικές τάσεις ανάπτυξης επιφανειακής ρηγματώσης.

- Η ομάδα δοκιμών με πάχος επικάλυψης 40 mm (Σχήμα 6) μέχρι την απώλεια μάζας 4 % και με συνδετήρες ΣΦ8/60 και ΣΦ8/120 όπως και τα δοκίμια δίχως συνδετήρες, επέδειξαν περίπου κοινό εύρος επιφανειακών ρηγματώσεων. Σε αντίθεση με αυτά, τα δοκίμια με συνδετήρες ΣΦ8/240 κατέγραψαν πολύ γρήγορα υψηλότερα εύρη ρωγμών. Παρόλα αυτά, τα δοκίμια της σειράς με ΣΦ8/60, στην συνέχεια παρουσίασαν επίσης περιοριστικές τάσεις ανάπτυξης επιφανειακής ρηγμάτωσης. Το γεγονός αυτό εξηγείται σαφέστατα λόγω θέσης της κύριας ελεγχόμενης ράβδου ($40\text{mm} > 25\text{mm}$).



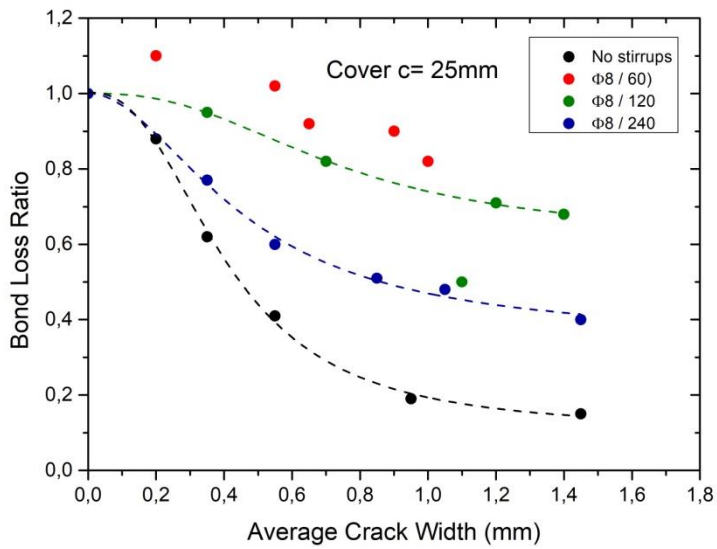
Σχήμα 5. Συσχέτιση του μέσου εύρους ρηγμάτωσης και της ποσοστιαίας απώλειας μάζας (Επικάλυψη 25mm).



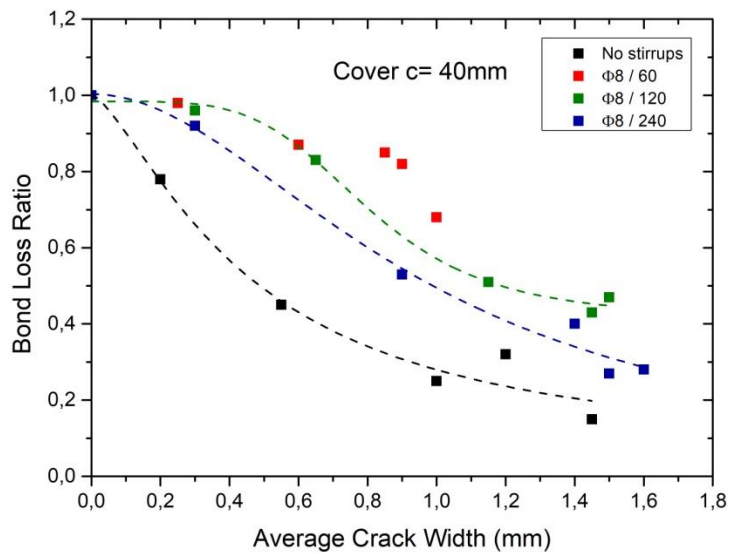
Σχήμα 6. Συσχέτιση του μέσου εύρους ρηγμάτωσης και της ποσοστιαίας απώλειας μάζας (Επικάλυψη 40mm).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και ο υπολογισμός του μέσου εύρους επιφανειακής ρηγμάτωσης, συσχετίστηκαν στην συνέχεια με την απώλεια της δύναμης του δεσμού συνάφειας (bonding) η οποία παρουσιάζεται στα διαγράμματα των Σχημάτων 7 και 8. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η μείωση της συνάφειας ακολουθεί εκθετική μορφή. Επίσης:

- Σε αμφότερες τις ομάδες δοκιμών (με επικάλυψη 25mm και 40mm) Σχήματα 7 και 8, επιβεβαιώθηκε ότι ή αύξηση του μέσου εύρους της επιφανειακής ρηγμάτωσης, επέφερε μείωση της δύναμης της συνάφειας.
- Επίσης, στις ομάδες δοκιμών (με επικάλυψη 25mm και 40mm), Σχήματα 7 και 8, γίνεται σαφές ότι η πύκνωση των συνδετήρων επιβραδύνει την απομείωση των δυνάμεων δεσμού συνάφειας, με ευεργετικά αποτελέσματα στην ασφάλεια. Ειδικότερα στα δοκίμια με επικάλυψη 25mm και χρήση συνδετήρων ανά 60mm, η απόδοση του bonding μέχρι το μέσο εύρος ρηγμάτωσης των 0.58mm (παρότι αυξήθηκε πραγματικά) θεωρούμε ότι παρέμεινε περίπου σταθερή. Στο ίδιο εύρος ρηγμάτωσης όλες οι άλλες κατηγορίες δοκιμών κατέγραψαν μειωμένη απόδοση κατά: 60%, 40% και 15% για δοκίμια δίχως συνδετήρες, για δοκίμια με συνδετήρες ανά 240mm και για δοκίμια ανά 120mm αντίστοιχα.
- Μεταξύ των δύο ομάδων δοκιμών με πάχος επικάλυψης 25mm και 40mm, η μηχανική απόδοση των δοκιμών της πρώτης ομάδας, καταγράφηκε σαφέστερα προβλέψιμη έναντι της δεύτερης ομάδας δοκιμών.



Σχήμα 7. Συσχέτιση του λόγου απώλειας της δύναμης συνάφειας και του μέσου εύρους ρηγμάτωσης (Επικάλυψη 25mm).



Σχήμα 8. Συσχέτιση του λόγου απώλειας της δύναμης συνάφειας και του μέσου εύρους ρηγμάτωσης (Επικάλυψη 40mm).

- Η αραίωση των συνδετήρων ανά 240mm και επικάλυψη 25mm φαίνεται ότι δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το βαθμό απομείωσης του bonding σε σχέση με τη μη χρήση συνδετήρων (κάτω του 40%), Σχήμα 7. Με αναγωγή στις παλαιές υφιστάμενες κατασκευές όπου η χρήση συνδετήρων ακολουθούσε παλαιές πρακτικές (4 τεμάχια το τρέχον μέτρο κοκ), εκεί είναι αναπόφευκτη η ισχυρή απώλεια των δυνάμεων δεσμού συνάφειας των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.
- Στην περίπτωση της κατηγορίας δοκιμίων με επικάλυψη 40mm, η απουσία συνδετήρων υποβαθμίζει με ταχύ ρυθμό τη δύναμη συνάφειας, αντίθετα με την περίπτωση πύκνωσης των συνδετήρων όπου αυτή λειτουργεί ευεργετικά καθυστερώντας την υποβάθμισή της.
- Μεταξύ των δύο κατηγοριών δοκιμίων των δύο ομάδων με συνδετήρες ανά 60mm και συνδετήρες ανά 120mm προκύπτει σαφής υποβάθμιση των δυνάμεων συνάφειας των δοκιμίων με επικάλυψη 40mm έναντι των αντίστοιχων με επικάλυψη 25mm. Σημαντικός λόγος της συμπεριφοράς αυτής είναι αφενός η μικρότερη ενεργός επιφάνεια σκυροδέματος (λόγω επικάλυψης 40mm) και αφετέρου η συνολικά αυξημένη βλάβη διάβρωσης στον όγκο του δοκιμίου εξ αιτίας της ενδότερης (40mm>25mm) αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος λόγω διάβρωσης του σιδηροοπλισμού.
- Στα δοκίμια με συνδετήρες ανά 240mm των δύο κατηγοριών επικάλυψης (25 mm και 40mm) δεν καταγράφηκε ανάλογη συμπεριφορά. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να οφείλεται σημαντικά στην ποικίλη συνέργεια ορισμένων παραγόντων όπως κλίμακας δοκιμίων και της επελθούσας μειωμένης βλάβης διάβρωσης στους αραιούς συνδετήρες.
- Σαφέστατα, η δύναμη συνάφειας, υποβαθμίζεται δραματικά με αύξηση του εύρους της επιφανειακής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Και στα δύο σχήματα (bond loss ratio - crack width), φαίνεται ότι με αύξηση του εύρους της επιφανειακής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος οι καμπύλες παρουσιάζουν φθίνουσα πορεία (υποβάθμιση συνάφειας). Τα αποτελέσματα αυτά, έρχονται σε πλήρη συμφωνία με την παρατήρηση των Fang και Lundgren (2006) μόνο στην περίπτωση των πυκνών συνδετήρων ανά 60mm και στα δύο πάχη επικάλυψης. Επίσης, στην περίπτωση της επικάλυψης 25mm φαίνεται να έρχεται σε συμφωνία για τις περιπτώσεις των συνδετήρων ανά 120mm και ανά 240mm.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη πειραματικών δοκιμών σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος όπου συσχετίστηκε η βλάβη διάβρωσης του σιδηροοπλισμού με το εύρος της επιφανειακής ρηγμάτωσης και την απομείωση της αντοχής συνάφειας. Από την μελέτη αυτή, προέκυψαν τα ακόλουθα :

- Η βλάβη διάβρωσης του σιδηροοπισμού, προκαλεί εύρος επιφανειακής ρηγμάτωσης που συνδέεται στενά τόσο με την ύπαρξη και την πυκνότητα των συνδετήρων όσον και με το πάχος της εκάστοτε επικάλυψης.
- Με αύξηση του εύρους της επιφανειακής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος, οι δυνάμεις του δεσμού συνάφειας, μειώνονται εκθετικά (με συνάρτηση εκθετικής μορφής). Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, συγκλίνουν ικανοποιητικά με αποτελέσματα αντίστοιχων μελετών στη βιβλιογραφία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ACI 201.2R-01, Guide to durable concrete, Am. Concr. Institute, Comm. (2001).

ACI 318M-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, 2014.

ACI 408R-03: Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (Reapproved 2012).

Andrade C., Cesetti A., Mancini G., Tondolo F., Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening, *Structural Concrete* (2016), No. 4, Volume 17, Issue 4 December 2016, pp. 533–540.

Apostolopoulos Ch., Papadopoulos M., Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 4, April 2007, pp. 855-864.

Apostolopoulos Ch., Papadakis V., Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 12, December 2008, pp. 2316-2324.

Apostolopoulos Ch., Demis S., Papadakis V., Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth analysis, *Construction and Building Materials*, Volume 38, January 2013, pp. 139-146.

AS 1379, Specification and supply of concrete, Aust. Stand. (2007) 1–53.

ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Am. Soc. Test. Mater. (2012) 1–8. doi:10.1520/C1202-12.2.

Auyeung Y., Bond properties of corroded reinforcement with and without confinement, PhD Thesis, New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, 2001.

Bureau of Indian Standard (BIS), Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice, IS 456(4th Rev.). (2000) New Delhi, India.

Code of practice for structural use of concrete 2013, Hong kong, 2013.

CSA, CSA A23.1-09/A23.2-09: Concrete materials and methods of concrete constr. / Test methods and standard practices for concrete, CSA Group, 2009.

Elbusaefi, A., «The effect of steel bar corrosion on the bond strength of concrete manufactured with cement replacement materials», Διδακτορική Διατριβή, School of Engineering, Cardiff University, 2014.

EN206-1, the new concrete standards, Dublin, 2004.

Fu X., Chung D.D.L., Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar, *Cem. Concr. Res.* 27 (12) (1997), pp. 1811–1815.

Li C. Q. and Zheng J. J. Propagation of reinforcement corrosion in concrete and its effects on structural deterioration. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57, No. 5, pp. 261–271.

Liu, Y. et al, 1998, Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Material Journal*, 95 (6), pp. 675-681.

Lundgren K., Effect of corrosion on the bond between steel and concrete: an overview, *Magazine of Concrete Research*, 2007, 59, No. 6, August, pp. 447–461.

Maslehuddin M., Allam I., Al-Sulaimani G., Al-Mana A., Abduljauwad S., Effect of Rusting of Reinforcing Steel on its Mechanical Properties and Bond with Concrete, *Materials Journal*, Volume 87, Issue 5, January 1990, pp. 496-502.

NZS 3101-Part 1, Concrete structures standard, Part 1 - The design of concrete structures, Stand. Coun. Concr. Des. Committee, P-3101. (2006) 697.

Stanish K., Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete, 1997.

Tahershamsi M., Fernandez I., Lundgren K. and Zandi K. (2016): Investigating Correlations between Crack Width, Corrosion Level and Anchorage Capacity. *Structure and Infrastructure Engineering*.

Transportation Research Board, Highway deicing: comparing salt and calcium magnesium acetate, special report 235, National Research Council, Washington, DC, 1991.

Wallbank E.J., The performance of concrete in bridges: a survey of 200 highway bridges, London, 1989.

Fang C., Lundgren K., Plos M., Gylltoft K., Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete, *Cement and Concrete Research* 36 (2006), pp. 1931–1938.