

## Συμπεριφορά δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα με διαβρωμένο χαλύβδινο οπλισμό υπό φορτίο λειτουργικότητας

### Γαρυφαλιά Γ. Τριανταφύλλου

Υποψήφια Διδάκτωρ, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ  
E-mail: gtriant@civil.duth.gr

### Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης

Επίκουρος Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ  
E-mail: trousak@civil.duth.gr

### Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης

Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ  
E-mail: karabin@civil.duth.gr

### Εκτενής περίληψη

Η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού στις κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα αναδεικνύεται ως σημαντικό πρόβλημα μη ικανοποιητικής ανθεκτικότητας των κατασκευών και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε περιοχής. Παραθαλάσσιες περιοχές με έντονη παρουσία χλωριόντων, υψηλά επίπεδα υγρασίας και έκθεσης σε αέριους ρύπους αντιμετωπίζουν έντονα φαινόμενα διάβρωσης. Κτιριακές κατασκευές και γέφυρες που δέχονται συνεχή έκθεση στις επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος, οδηγούνται σε υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητας και ως εκ τούτου μείωση του χρόνου ζωής τους. Η Ελλάδα ως μια κατεξοχήν παραθαλάσσια χώρα, βιώνει τα τελευταία χρόνια έντονα προβλήματα γήρανσης και φθοράς λόγω των περιβαλλοντικών δράσεων. Σημαντικό είναι το οικονομικό κόστος της αποκατάστασης των βλαβών καθώς και οι επιπτώσεις στην ασφάλεια των κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων. Καινοτόμα υλικά και πρωτοποριακές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την επισκευή και αποκατάσταση των δομικών στοιχείων. Η χρήση σύνθετων υλικών (ινωπλισμένα πολυμερή, ΙΩΠ - Fiber Reinforced Polymers, FRP) αποτελεί σημαντική τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των κατασκευών. Τα ΙΩΠ μπορούν να αυξήσουν την ικανότητα των κατασκευών και να διευρύνουν τη διάρκεια ζωής τους. Η εφαρμογή τους σε στοιχεία από ωπλισμένο σκυρόδεμα που έχουν υποστεί διάβρωση, μπορεί να βελτιώσει την ικανότητά τους σε αντοχή, να ελαχιστοποιήσει την εμφάνιση ρηγματώσεων και να εμποδίσει την περεταίρω διάβρωση. Έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα με αντικείμενο την επιρροή της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού στην επιτελεστικότητα των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στην συμπεριφορά διαβρωμένων στοιχείων τα οποία πρώτα διαβρώθηκαν έως ένα ποσοστό και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε φορτίο λειτουργικότητας. Υπό πραγματικές συνθήκες, η διάβρωση και φόρτιση των κατασκευών που φέρουν τα φορτία λειτουργικότητας είναι μια ταυτόχρονη διαδικασία. Οι Yoon et al. (2000), Ballim et al. (2003) και Malumbela et al. (2009) διερεύνησαν την συμπεριφορά δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα υπό ταυτόχρονη φόρτιση και διάβρωση του οπλισμού. Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα πως υπό ταυτόχρονες συνθήκες, οι διαμήκεις εφελκυστικές παραμορφώσεις, οι ρηγματώσεις και οι βυθίσεις των διαβρωμένων δοκών αυξάνονταν περισσότερο με την αύξηση του βαθμού διάβρωσης καθώς και με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου, σε σχέση με τις μη διαβρωμένες δοκούς. Οι El Maaddawy et al. (2005) μελέτησαν πειραματικά την συμπεριφορά διαβρωμένων δοκών υπό σταθερό φορτίο 60%

του φορτίου διαρροής της δοκού χωρίς διάβρωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταυτόχρονη φόρτιση και η ύπαρξη καμπτικών ρωγμών κατά την διάρκεια της έκθεσης σε διάβρωση, αύξησαν το εύρος των ρωγμών λόγω διάβρωσης και μείωσαν την αντοχή των δοκών. Οι Hariche et al. (2012) ανέφεραν πως οι βυθίσεις των δοκών αυξήθηκαν με την βαθμιαία διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού υπό ταυτόχρονη φόρτιση, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια της διάβρωσης. Οι εγκάρσιες ρωγμές και οι τάσεις διόγκωσης που δημιουργούνται από τα προϊόντα διάβρωσης συνέβαλλαν σε αυτό.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς δοκών από Ω/Σ που έχουν υποστεί διάβρωση του οπλισμού σε διαφορετικούς βαθμούς. Στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Δ.Π.Θ. κατασκευάστηκαν 4 δοκοί με ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού  $\rho_s=0.0116$ , εκ των οποίων η 1η παραμένει ως δοκός αναφοράς χωρίς διάβρωση, ενώ οι υπόλοιπες 3 έχουν διαβρωθεί μέσω επιταχυνόμενης διαδικασίας. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εφαρμογή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στον εφελκυσμένο χαλύβδινο οπλισμό, ενώ ταυτόχρονα βυθίζονται σε δεξαμενή με διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Οι δοκοί υποβάλλονται σε κύκλους εντός και εκτός δεξαμενής για περεταίρω φυσική έκθεση.



Σχ. 1 Μοτίβο ρηγματώσεων λόγω διάβρωσης υπό μελέτη δοκού.

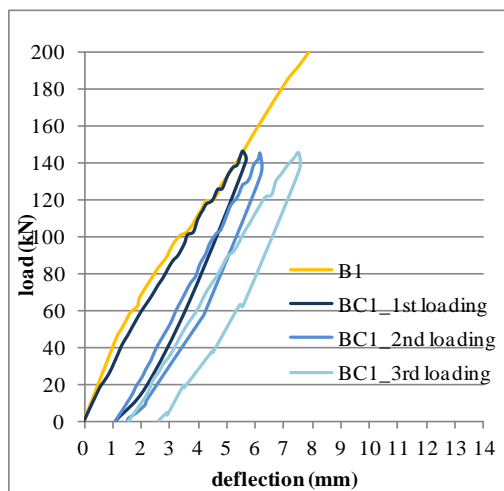


Σχ. 2 Καμπτικές ρωγμές μετά την φόρτιση της διαβρωμένης δοκού στο επίπεδο λειτουργικότητας.

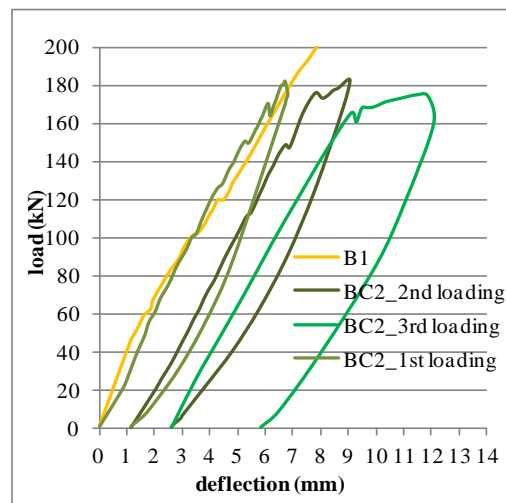
Η 1η δοκός αναφοράς και η 1η δοκός που διαβρώθηκε έως ένα μικρό ποσοστό, φορτίστηκαν μονότονα μέχρι αστοχίας. Οι εναπομένουσες 2 δοκοί δοκιμάστηκαν σε κύκλους επιταχυνόμενης διάβρωσης-φόρτισης στο φορτίο λειτουργικότητας και επιβολής περαιτέρω διάβρωσης. Έτσι προσεγγίζεται η πραγματική κατάσταση σε μια κατασκευή, η οποία ενώ υπομένει τα φορτία λειτουργίας υφίσταται διάβρωση των οπλισμών και υπάρχει αλληλεπίδραση. Ωστόσο, αποφεύχθηκε η υποβολή των δοκών σε σταθερό φορτίο με παράλληλη διάβρωση καθώς δεν είναι δυνατή η επίτευξη ίδιων συνθηκών διάβρωσης κατά μήκος των διαμήκων ράβδων. Έτσι, οι 2 δοκοί αρχικά διαβρώθηκαν έως ένα βαθμό και κατόπιν καταπονήθηκαν με μονότονο κατακόρυφο φορτίο σταδίου λειτουργικότητας που αντιστοιχεί σε ποσοστό 60% ή 75% του φορτίου διαρροής της δοκού που δεν έχει διαβρωθεί. Η κάθε δοκός υποβλήθηκε σε 3 διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης (ελαφρά, μέτρια, σημαντική διάβρωση) και φορτίστηκε αντίστοιχα σε καθένα από αυτά.

Καταγράφηκαν σημαντικά αυξημένες βυθίσεις για το ίδιο φορτίο από κύκλο σε κύκλο για την κάθε δοκό. Η δοκός BC1 που δοκιμάστηκε σε φορτίο λειτουργικότητας 60%, παρουσίασε αύξηση βύθισης 11.3% κατά την 2η φόρτιση (βαθμός απώλειας μάζας χάλυβα 8.5%) σε σχέση με την πρώτη (βαθμός απώλειας μάζας χάλυβα 5.7%). Κατά την 3<sup>η</sup> φόρτιση (βαθμός απώλειας μάζας χάλυβα 12%), η βύθιση για το ίδιο φορτίο αυξήθηκε ακόμη περισσότερο κατά 35.6%, σε σχέση με την αντίστοιχη της 1<sup>ης</sup> φόρτισης. Η δοκός BC2 που δοκιμάστηκε σε μεγαλύτερο φορτίο λειτουργικότητας 75%, παρουσίασε

ακόμη μεγαλύτερη αύξηση 33.1% κατά την 2<sup>η</sup> φόρτιση. Κατά την 3<sup>η</sup> φόρτιση, η βύθιση για το ίδιο φορτίο αυξήθηκε περισσότερο κατά 68.9%, σε σχέση με την αντίστοιχη της 1<sup>ης</sup> φόρτισης. Στα σχήματα 1 και 2 απεικονίζεται το διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου-βύθισης (load-deflection) στο μέσο κατά την διάρκεια της φόρτισης σε διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης 5.7%, 8.5% και 12%.



Σχ. 1 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης διαβρωμένης δοκού BC1.



Σχ. 2 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης διαβρωμένης δοκού BC2

Παράλληλα, παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις με ρωγμές αυξανόμενου εύρους. Για απώλεια μάζας 8.5%, η μέγιστη διαμήκης ρωγή στην μπροστά όψη κυμαινόταν μεταξύ 0.30-0.40 mm (από 0.25 mm για απώλεια μάζας 5.7%), ενώ 0.80 mm (από 0.60 mm) στο μεσαίο κάτω εφελκόμενο πέλμα και για τις δύο δοκούς. Για σημαντικό επίπεδο διάβρωσης με απώλεια της μάζας του χάλυβα της τάξης του 12%, οι ρωγμές λόγω διάβρωσης αυξήθηκαν σημαντικά για τις δύο δοκούς, με την μέγιστη στην μπροστά όψη να ισούται με 0.80 mm, ενώ στο εφελκόμενο πέλμα να αυξάνεται σε εύρος 1.25 mm.

Η αύξηση του εύρους της ρωγμής λόγω διάβρωσης από την καταπόνηση στο φορτίο λειτουργικότητας της δοκού BC1 ήταν από 0.30 mm σε 0.50 mm και για την δοκό BC2 από 0.40 mm σε 0.80 mm στον δεύτερο κύκλο φόρτισης. Στον τρίτο κύκλο φόρτισης, στην μπροστά όψη των δοκών σημειώθηκε αύξηση στο εύρος των διαμήκων ρωγμών από 0.50 σε 0.60 mm για την δοκό BC1 και από 0.60 σε 0.90 mm για την δοκό BC2.

## Βιβλιογραφία

- Ballim Y., Reid JC. (2003), "Reinforcement corrosion and the deflection of RC beam-an experimental critique of current test methods.", *Cement and Concrete Composites*, 25(6):625-632.
- El Maaddawy T., Soudki K., Topper T. (2005), "Long-term performance of corrosion damaged reinforced concrete beams.", *ACI Structural Journal*, 102(5):649-656
- Hariche L., Ballim Y, Bouhicha M., Kenai S. (2012), "Effect of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion.", *Cement and Concrete Composites*, 34:1202-1209.
- Malumbela G., Moyo P., Alexander M. (2009), "Behaviour of RC beams under sustained service loads.", *Construction and Building Materials*, 23(3):346-351.
- Yoon S., Wang K., Weiss WJ, Shah SP (2000), "Interaction between loading, corrosion and serviceability of reinforced concrete.", *ACI Material Journal*, 97(6):637-644.