

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΠΟ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ

Λ. Καραβοκυρός¹, Ν. Κατσιώτης¹, Γ. Μπατής¹, Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη¹

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

*(*loukas.kara@gmail.com)*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι μέθοδοι προστασίας του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος και η βελτιστοποίηση των συνθέσεων που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που προσβάλλονται από χλωριόντα θαλασσινού νερού. Επιπρόσθετα μελετάται η επίδραση της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα δομικό στοιχείο στην ανθεκτικότητά του στις επιβλαβείς συνθήκες του περιβάλλοντος, κυρίως του παραθαλάσσιου. Επιδιώκεται να διαπιστωθεί κατά πόσο η αλλαγή στην εσωτερική δομή που επιφέρουν τα φορτία σε ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος επηρεάζει την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Στο βασικό πειραματικό μέρος κατασκευάστηκαν 40 πρότυποι δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος η συμπεριφορά των οποίων χαρακτηρίζεται μέσω ηλεκτροχημικών μετρήσεων. Οι συνθέσεις δημιουργήθηκαν ακολουθώντας τα όρια που θέτει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016) αλλά και τα άλλα Διεθνή Πρότυπα και είναι: συμβατικό σκυρόδεμα ποιότητας C30/37, σκυρόδεμα C30/37 με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο, C30/37 με επιφανειακά ψεκαζόμενο στεγανωτικό, C30/37 με ξεκαλούπωμα στις 28 ημέρες, αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και γαρμπυλόδεμα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται έντονα προβλήματα μη ικανοποιητικής ανθεκτικότητας των κατασκευών, με την διάβρωση του οπλισμού να αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο πρόβλημα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του σιδήρου που σχηματίζεται στην επιφάνειά τους (παθητικοποίηση χάλυβα) λόγω της υψηλής αλκαλικότητας (pH περίπου 12.6) του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η διάβρωση μπορεί να αρχίσει όταν καταστραφεί αυτό το προστατευτικό στρώμα, είτε λόγω διείσδυσης χλωριόντων και υπέρβασης μιας κρίσιμης συγκέντρωσης, είτε λόγω μείωσης του pH του νερού των πόρων σε τιμές κάτω του 9. ^[1,2] Επειδή τα χλωριόντα που περιέχονται στο θαλασσινό νερό είναι πολύ πιθανό να εισέλθουν στη μάζα του σκυροδέματος παραθαλάσσιων ή θαλάσσιων κατασκευών, ο βαθμός επικινδυνότητας διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού είναι συγκρίσιμος με εκείνον που διατρέχουν κατασκευές που εκτίθενται σε χημικούς ή αντιπαγωγικούς παράγοντες. Η πλέον ευάλωτη περιοχή μίας θαλάσσιας κατασκευής είναι εκείνη της ζώνης διαβροχής (splash zone) ή της παλιρροιακής ζώνης (tidal zone), η οποία υπόκειται σε εναλλασσόμενους κύκλους ύγρυνσης και ξήρανσης και είναι αυτή που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη (κατηγορίες έκθεσης XS2 και XS3, κατά ΚΤΣ 2016). Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016) είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού ανθεκτικών κατασκευών από σκυρόδεμα και δίνει την δυνατότητα στην Ελλάδα να σχεδιάζει τις κατασκευές της για μεγάλη διάρκεια ζωής προτείνοντας πέραν των άλλων αυστηρές συνθέσεις σκυροδέματος στην πλειονότητα των κατηγοριών έκθεσης περιβάλλοντος. ^[1,3-5]

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αντικείμενο της έρευνας αποτελεί η εκτίμηση της επίδρασης της καμπτικής ευπόνησης που δέχεται ένα στοιχείο σκυροδέματος αλλά και της σύνθεσής του (κοκκομετρική διαβάθμιση, πρόσθετα, πρόσμικτα) στην ανθεκτικότητά του απέναντι στις επιβλαβείς συνθήκες του περιβάλλοντος, κυρίως του παραθαλάσσιου. Τα υλικά, οι τεχνικές καθώς και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται μπορούν να έχουν εφαρμογή σε κατασκευές από σκυρόδεμα με σκοπό

την επίτευξη της κατάλληλης σχέσης μεταξύ υλικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, στοχεύοντας στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Η έρευνα είναι υπό εξέλιξη και εμπίπτει σε ένα πεδίο που ενδείκνυται για επιπλέον έρευνα καθότι με τα υπάρχοντα ερευνητικά δεδομένα δεν είναι ξεκάθαρος ο βαθμός επιρροής των καμπτικών φορτίσεων στην εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης.^[6-8]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για το βασικό πειραματικό μέρος κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος σε διαβρωτικές συνθήκες με ταυτόχρονη μόνιμη καμπτική φόρτιση. Συγκεκριμένα για το πειραματικό μέρος της έρευνας κατασκευάστηκαν 40 δοκοί (σχεδιασμός υπό κλίμακα: 0,15x0,25x1,5m), 6 διαφορετικών συνθέσεων οι οποίες μελετώνται σε βάθος χρόνου 3 ετών σε διαβρωτικό περιβάλλον (τακτικός ψεκασμός με διάλυμα NaCl). Οι συνθέσεις δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος και είναι:

- Σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 (σύνθεση αναφοράς)
- Σκυρόδεμα C30/37 με πρόσθετο αναστολέα διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου)
- Σκυρόδεμα C30/37 με επιφανειακά ψεκαζόμενο στεγανωτικό
- Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα
- Γαρμπυλόδεμα
- Σκυρόδεμα C30/37 με ξεκαλούπωμα στις 28 ημέρες.

Οι συνθήκες στις οποίες δοκιμάζονται είναι:

- Έκθεση στο φυσικό περιβάλλον (δοκίμια αναφοράς),
- Αφόρτιστα σε διαβρωτικό περιβάλλον (τακτικός ψεκασμός με διάλυμα 4% NaCl)
- 1^ο επίπεδο φόρτισης (850kg), σε διαβρωτικό περιβάλλον,
- 2^ο επίπεδο φόρτισης (2550kg), σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Η παραγωγή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε εργοστάσιο σκυροδέματος. Τα καλούπια των δοκών δημιουργήθηκαν αποκλειστικά για την πειραματική διαδικασία και σχεδιάστηκαν υπο την κλίμακα κανονικών δοκών. Η μεταφορά και η τοποθέτηση των φορτίων έγινε με τη χρήση στοιχείων (μπλοκ) οπλισμένου σκυροδέματος (850kg/μπλοκ) τα οποία εδράστηκαν στο μέσο των δοκών προκειμένου να επιφέρουν τα επιθυμητά μόνιμα καμπτικά φορτία (Σχήματα 1,2).



Σχήματα 1,2. Πειραματική διάταξη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, μπλοκ φόρτισης

Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον έλεγχο της ποιότητας των παραγόμενων συνθέσεων (θλιπτική αντοχή σε 7,14,28 ημέρες) καθώς και για την εκτίμηση ιδιοτήτων νωπής φάσης (κάθιση, εξάπλωση, θερμοκρασία). Σε βάθος χρόνου 3 ετών πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού βάση ηλεκτροδίου αναφοράς θεικού χαλκού και της

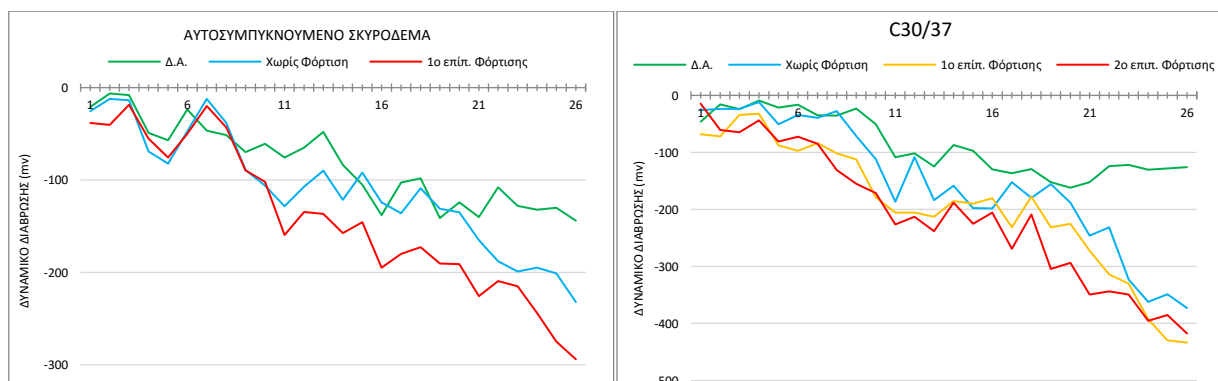
ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προκειμένου να εκτιμηθεί η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των υπό μελέτη συνθέσεων. Η επιτάχυνση της διείδυσης των χλωριόντων στο εσωτερικό των δοκών επιτυγχάνεται με τακτικό επιφανειακό ψεκάσμο με διάλυμα χλωριούχου νατρίου συγκέντρωσης 4%. Παρακάτω αναλύεται η σύνθεση σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ως βάση στο πειραματικό μέρος (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Ανάλυση σύνθεσης C30/37 που χρησιμοποιήθηκε ως σκυρόδεμα αναφοράς.

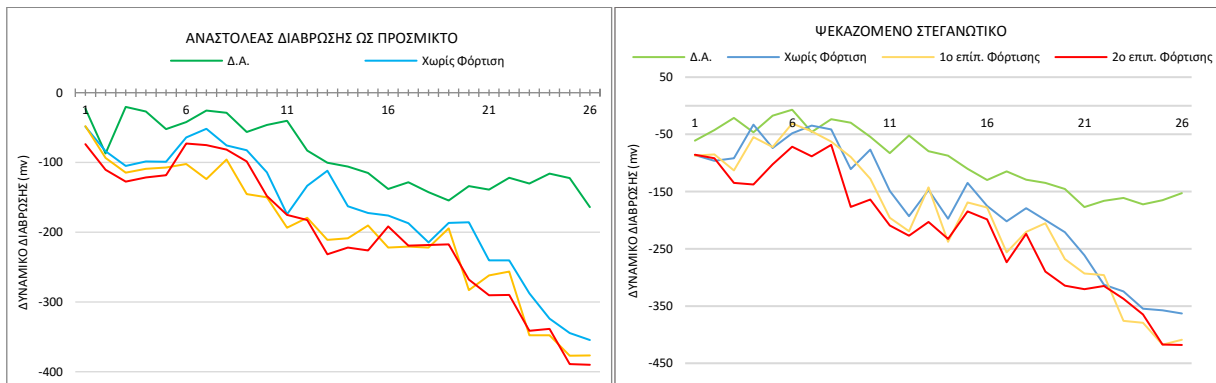
ΑΜΜΟΣ	975 kg/m ³
ΓΑΡΜΠΥΛΙ	280 kg/m ³
ΧΑΛΙΚΙ	650 kg/m ³
ΤΣΙΜΕΝΤΟ Ι 42,5	330 kg/m ³
H ₂ O	165 kg/m ³
Ρευστοποιητής (BV-90)	2 kg/m ³

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι αποτίμησης της διάβρωσης βασίζονται στην ηλεκτροχημική της φύση και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας (διεπιφάνειας μετάλλου-διαλύματος) τόσο για τη διερεύνηση του μηχανισμού διάβρωσης όσο και για τη παρακολούθηση και τον έλεγχο του στην πράξη ^[1,2]. Μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων προσδιορίζεται ποιά σύνθεση σκυροδέματος ανταποκρίνεται καλύτερα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και κατά πόσο επηρεάζει την ανθεκτικότητα της η μόνιμη καμπτική καταπόνηση που δέχεται. Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος πραγματοποιείται με τη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων Wenner (κατά ASTM G57) και η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού πραγματοποιείται με ηλεκτρόδιο αναφοράς θειικού χαλκού (κατά ASTM C876). Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 3-10) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη (ανά μήνα) της ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος αλλά και του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού των υπό μελέτη συνθέσεων και εν συνεχεία αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.



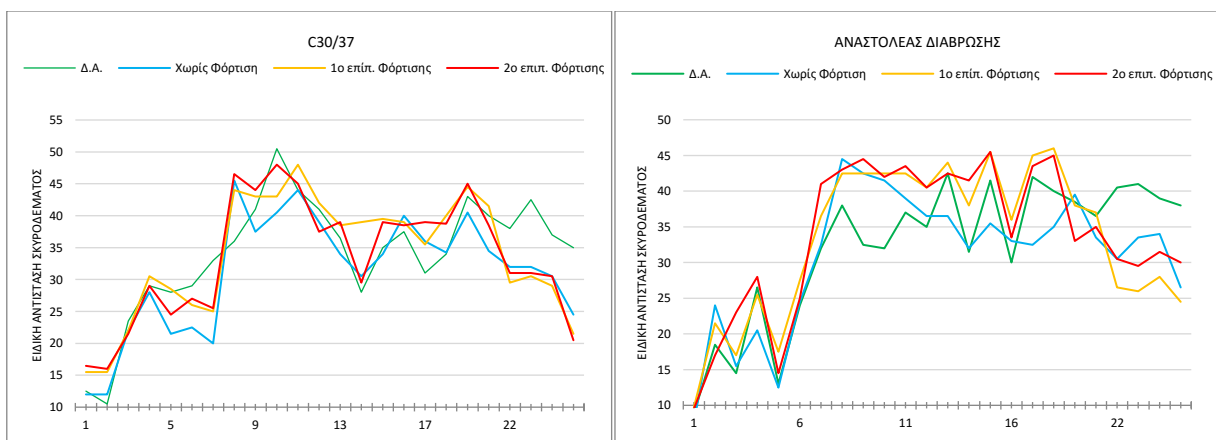
Σχήματα 3-4. Εξέλιξη δυναμικού διάβρωσης οπλισμού για 2 συνθέσεις σκυροδέματος



Σχήματα 5-6. Εξέλιξη δυναμικού διάβρωσης οπλισμού για 2 συνθέσεις σκυροδέματος

Από τα άνω διαγράμματα χρονικής εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού ανά σύνθεση (Σχήματα 3-6), προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

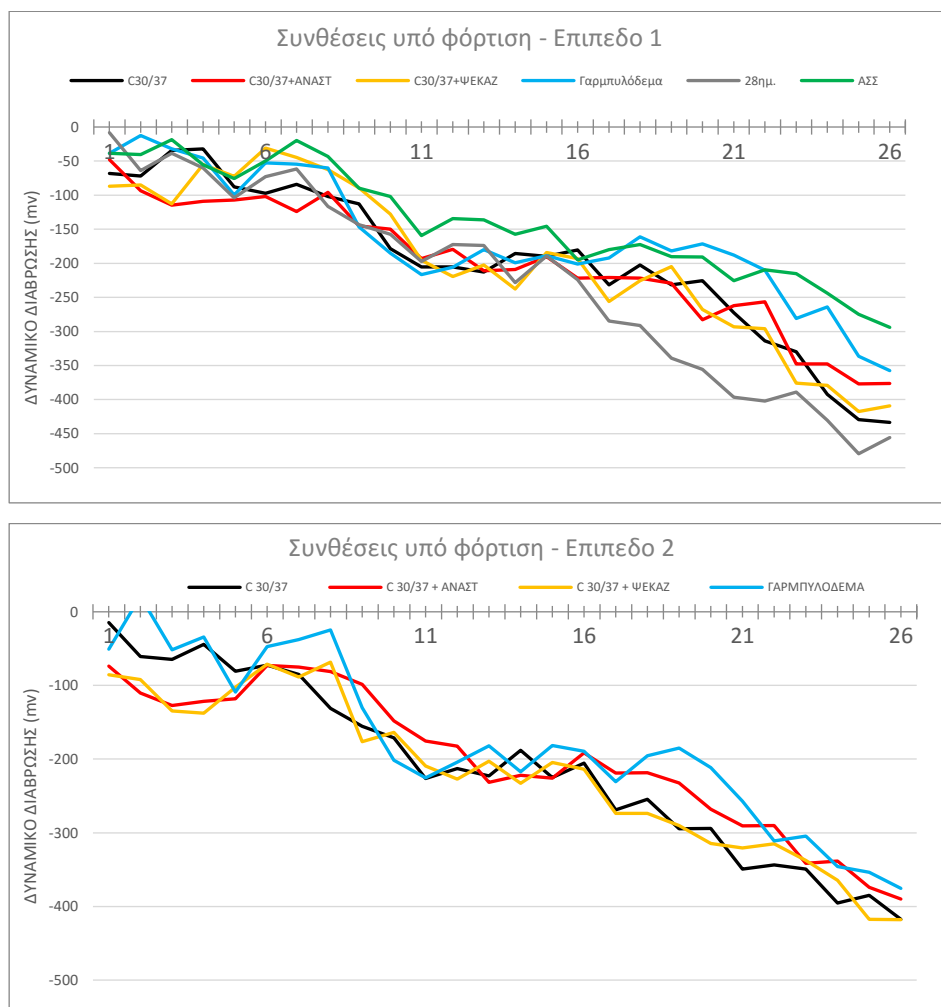
- Υπάρχει μια (αναμενόμενη) μετατόπιση του δυναμικού σε ηλεκτραρνητικότερες τιμές για τα δοκίμια που ψεκάζονται με διάλυμα NaCl, καθότι τα ιόντα χλωρίου επιταχύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης.
- Η φόρτιση δείχνει να επηρεάζει μετατοπίζοντας το δυναμικό σε ηλεκτραρνητικότερες τιμές. Χαρακτηριστικά σε όλες τις περιπτώσεις τα δοκίμια υπο φόρτιση δίνουν τις χαμηλότερες τιμές δυναμικού συγκριτικά με τα αφόρτιστα.
- Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δείχνουν την καλύτερη συμπεριφορά έναντι των υπολοίπων.



Σχήματα 7,8. Εξέλιξη ειδικής αντίστασης για τη βασική σύνθεση και με προσθήκη αναστολέα διάβρωσης

Από τα διαγράμματα εξέλιξης της ειδικής αντίστασης των υπό μελέτη συνθέσεων (Σχήματα 7-8), προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος, η φόρτιση δείχνει να μετατοπίζει χαμηλότερα τις τιμές της ειδικής αντίστασης τους, όχι ωστόσο σε αξιοσημείωτο βαθμό.
- Όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν συγκριτικά παρόμοιες τιμές ειδικής αντίστασης, με εξαίρεση τις πιο λεπτόκοκκες δομές (γαρμπυλόδεμα και αυτοσυμπυκνούμενο) που παρουσιάζουν ελαφρώς αυξημένες τιμές.
- Καλή (αναμενόμενα) ήταν η συμπεριφορά των μαρτύρων, καθότι δεν εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήματα 9,10. Εξέλιξη δυναμικού διάβρωσης οπλισμού ανά σύνθεση με ταυτόχρονη καμπτική φόρτιση

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήματα 9,10) βλέπουμε τη συμπεριφορά του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού των διαφορετικών συνθέσεων στο χρόνο. Από αυτά και απο τα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα προκύπτει πως το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει καλύτερη συμπεριφορά έναντι του σκυροδέματος αναφοράς (C30/37), ενώ καλύτερη συμπεριφορά από το συμβατικό παρουσιάζει και σε μια ομάδα το γαρμπυλόδεμα και ο αναστολέας διάβρωσης (ως πρόσθετο ή ψεκαζόμενος).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συνθέσεις σκυροδέματος που μελετώνται μπορούν να χωρισθούν σε 2 κατηγορίες με βάση τη δομή τους. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τις τέσσερις συνθέσεις με βάση το σκυρόδεμα ποιότητας C30/37 και η δεύτερη ομάδα από αυτές με πιο λεπτόκοκκες δομές (απουσία χονδρόκοκκου αδρανούς). Στην πρώτη ομάδα, ο αναστολέας διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο σκυροδέματος σε περιεκτικότητα 4% κατά βάρος του τσιμέντου και έδειξε συγκριτικά την καλύτερη συμπεριφορά σε διαβρωτικό περιβάλλον καθώς διατήρησε τις χαμηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης σε σχεδόν όλη τη διάρκεια των 3 ετών αλλά και στις τελικές μετρήσεις. Επειδή οι αναστολείς διάβρωσης είναι υδατοδιαλυτοί, υπάρχει ανησυχία ότι μπορεί να υπάρξει έκπλυση από το σκυρόδεμα ανόργανων αλάτων, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση του αναστολέα στο επίπεδο του οπλισμού. Όταν χρησιμοποιούνται σε σκυρόδεμα με χαμηλούς λόγους N/T, όπως συνέβη στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα της έκπλυσης μειώνονται σημαντικά. Η αντιδιαβρωτική ικανότητα του ψεκαζόμενου στεγανωτικού ήταν καλύτερη από το σκυρόδεμα

αναφοράς πράγμα το οποίο οφείλεται στη δημιουργία κρυστάλλων στους πόρους του σκυροδέματος, ωστόσο δεν ήταν καλύτερη από αυτή του αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο. Στην δεύτερη ομάδα παρατηρήθηκε καλύτερη συμπεριφορά από αυτήν της πρώτης σε όλες τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις. Αρκετά χαμηλές τιμές δυναμικού διάβρωσης και κατ' επέκταση πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά παρατηρήθηκε στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην ιδιαίτερη δομή του (αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T). Επίπλέον η μόνιμη φόρτιση δείχνει σε αρκετές περιπτώσεις να επηρεάζει την εξέλιξη της διάβρωσης ενισχύοντας τη διείσδυση χλωριόντων. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει πως συνθέσεις με χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο καθώς και ειδικές συνθέσεις σκυροδέματος έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε διαβρωτικό περιβάλλον και πρέπει να χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με έντονες περιβαλλοντικές εκθέσεις (π.χ. παραθαλάσσιες). Οι αναστολείς διάβρωσης είτε ως πρόσθετα είτε σε ψεκαζόμενη μορφή αυξάνουν το χρόνο ζωής μιας κατασκευής και παρά το αρχικά ψηλό τους κόστος πρέπει να επιλέγονται στο σχεδιασμό δομημάτων που στοχεύουν σε μεγάλη ηλικία. Η μόνιμη φόρτιση φαίνεται να είναι ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό των κατασκευών και δημιουργείται η ανάγκη να μελετηθεί επιπλέον ο συσχετισμός της με την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης και ο βαθμός επιρροής της [6,8]. Ιδιαίτερως σε περιπτώσεις δοκών που παραλαμβάνουν αυξημένα καμπτικά φορτία (π.χ. μεγάλα ανοίγματα) θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό τους, προκειμένου με βάση τα παραπάνω να επιτευχθεί η επιθυμητή ανθεκτικότητα. Οι λύσεις που μας προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες σκυροδέματος συμβάλουν ουσιαστικά στην προστασία των κατασκευών. Τα όρια που μας θέτουν οι νέοι κανονισμοί αποδεικνύονται λειτουργικά καθώς αυξάνουν το χρόνο ζωής των κατασκευών και επιτυγχάνουν μεγάλες ηλικίες (εως και άνω των 100 ετών). Οι αναλογίες του αναμίγματος που ενισχύουν την αντίσταση του οπλισμού έναντι διάβρωσης δεν είναι ουσιαστικά διαφορετικές από τις αναλογίες ενός καλής ποιότητας σκυροδέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες προς τον κ. Ηλία Κατσαφάδο, διευθυντή του Εργοστασίου Σκυροδέματος ΚΟΥΡΟΣ ΑΕ χωρίς τη συμβολή του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της βασικής πειραματικής διάταξης. Οι συγγραφείς επιθυμούν επίσης να ευχαριστήσουν τους Δρ. Μάριο Σ. Κατσιώτη και κ. Εμμανουήλ Τζανή της Τεχνολογικής Διεύθυνσης του Ομίλου TITAN (Α.Ε. Τσιμέντων TITAN).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] U.M. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, Chloride induced reinforcement corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values, *Corros. Sci.* 53 (4) (2011) 1451–1464.
- [2] M. Montemor, A. Simoes, M. Ferreira, Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques, *Cem. Concr. Compos.* 25 (4) (2003) 491–502.
- [3] C. Cao, M.M. Cheung, B.Y. Chan, Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate, *Corros. Sci.* 69 (2013) 97–109.
- [4] F. Zhang, J.S. Pan, C.J. Lin, Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution, *Corros. Sci.* 51 (9) (2009) 2130–2138.
- [5] S. Alvarez, A. Bautista, F. Velasco, Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions, *Corros. Sci.* 53 (5) (2011) 1748–1755.
- [6] J.J. Wang, P.A.M. Basheer, S.V. Nanukuttan, A.E. Long, Y. Bai, Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete, *Constr. Build. Mater.* 108 (2016) 56–66.
- [7] G.P. Li, F.J. Hu, Y.X. Wu, Chloride ion penetration in stressed concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 1145–1153.
- [8] H.L. Wang, C.H. Lu, W.L. Jin, Y. Bai, Effect of external loads on chloride transport in concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (7) (2011) 1043–1049.