

**ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ / ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ο/Σ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

ΦΑΡΑΝΤΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ Νο 1

Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το θέμα της διάβρωσης των ράβδων οπλισμού μελών οπλισμένου σκυροδέματος και εμβαθύνει πάνω σε ορισμένες πτυχές του. Αφού γίνει μια σύντομη αναφορά στους μηχανισμούς και τις επιπτώσεις της διάβρωσης, ακολουθεί μια ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση της επιρροής του φαινομένου στη συνάφεια χάλυβα σκυροδέματος. Κατόπιν δίνονται μέθοδοι αποτίμησης του βαθμού διάβρωσης των υπαρχόντων κατασκευών με έμφαση στις πιο εξελεγχόμενες. Τέλος από τον μεγάλο όγκο των μεθόδων προστασίας και/ή επισκευής δίνονται πληροφορίες σχετικά με την πρόσφατη και ακόμη όχι επαρκώς αξιόπιστη μέθοδο των ανασταλτικών διάβρωσης.

1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως σχεδόν όλα τα σύνθετα τεχνητά υλικά, το βασικό δομικό υλικό των ημερών μας, το σκυρόδεμα, και μάλιστα πολύ περισσότερο το οπλισμένο, θεωρείται θερμοδυναμικά ασταθές, και επομένως καταδικασμένο να αποσυντεθεί αργά ή γρήγορα από την ίδια τη φύση, ή να μετατραπεί σε άλλα σταθερότερα υλικά. Απ' αυτή την άποψη δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα που κατασκευάστηκαν πριν από αρκετές δεκαετίες, φθάνουν σήμερα στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι επειδή κρίνονται λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε επειδή κάποιος σεισμός ή τα φορτία χρήσης, προκάλεσαν μηχανική αστοχία, αλλά απλώς και μόνο λόγω φυσικής γήρανσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ακόμη και κατασκευές ηλικίας 10 ή 20 ετών αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια και κυρίως το πρόβλημα της διάβρωσης των οπλισμών (ειδικά στη χώρα μας), γίνεται αντιληπτό γιατί θεωρείται από τη διεθνή κοινότητα των μηχανικών σαν το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του οπλισμένου σκυροδέματος. Αντίθετα με τα θέματα μηχανικής συμπεριφοράς και αντοχής του, που έχουν ουσιαστικά λυθεί, για το πρόβλημα της αντοχής στο χρόνο η συστηματική επιστημονική έρευνα δεν έχει μακρά ιστορία, η δε κάλυψη από Κανονισμούς και Προδιαγραφές είναι από ελάχιστη ως ανύπαρκτη.

1.2.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνθήκη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου, Ca(OH)_2 , στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0,45% του τσιμέντου κατά βάρος, αν το χλωριούχο άλας είναι το NaCl (όπως π.χ. αν πηγή των χλωριόντων είναι το θαλασσινό νερό), ή το 0,3% του βάρους του τσιμέντου, αν το χλωριούχο άλας είναι το CaCl_2 . Το προστατευτικό οξείδιο μπορεί επίσης να διαλυθεί καθ' όλο το μήκος της ράβδου, αν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο μειωθεί σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε λέμε ότι ο χάλυβας οπλισμού αποπαθητικοποιήθηκε. Στην περίπτωση ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων και μείωσης του pH του νερού των πόρων, η αποπαθητικοποίηση των ράβδων συμβαίνει όταν ο λόγος των γραμμομοριακών συγκεντρώσεων χλωριόντων και υδροξυλίων στο νερό των πόρων ξεπεράσει το 0,3 περίπου.

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φθάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτα αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης (όχι ασυνήθιστες πρακτικές στη νησιωτική Ελλάδα) ή πρόσμεικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Η δεύτερη περίπτωση είναι πολύ συνισθισμένη σε παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου μέχρι σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά.

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα, CO_2 , της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε ανθρακικό ασβέστιο, CaCO_3 , ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος.

Η ενανθράκωση και η διείδυση των χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθότι η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη: Το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό κάτω από την οριακή συγκέντρωση του 0.4% - 0.6% που απαιτείται για τη διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Όταν όμως το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μετατραπεί με την ενανθράκωση σε CaCO_3 , τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα.

Μετά την τοπική ή γενική απώλεια του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου, ο οπλισμός αρχίζει να οξειδώνεται. Η οξείδωση είναι μια ηλεκτροχημική αντίδραση με ηλεκτρολύτη το νερό των πόρων. Σε ένα σημείο της γυμνής επιφάνειας δημιουργείται άνοδος, από την οποία κατιόντα σιδήρου διαλύονται στο νερό των πόρων, αφήνοντας πίσω τους ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα τελευταία κινούνται μέσω της ράβδου προς την κάθοδο, η οποία μπορεί να σχηματισθεί σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της ράβδου, ακόμα κι αν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου δεν έχει καταστραφεί εκεί. Έτσι σαν κάθοδος μπορεί να λειτουργήσει το σύνολο της επιφάνειας της ράβδου. Στην κάθοδο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συνδυάζονται με το νερό των πόρων του σκυροδέματος και με το οξυγόνο που διαλύεται σε αυτό από την αέρια φάση των πόρων, δίνοντας ανιόντα υδροξυλίου. Τα τελευταία κινούνται μέσω του νερού των πόρων προς την άνοδο, όπου αντιδρούν με τα διαλυμένα κατιόντα σιδήρου, παράγοντας τελικά οξείδια του σιδήρου, δηλ. σκουριά, και ανασυνθέτοντας το νερό που είχε ηλεκτρολυθεί στην κάθοδο (επίδραση του νερού ως καταλύτη).[13 και 6]

1.3.ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η διάβρωση της ράβδου δεν έχει μόνο το προφανές αποτέλεσμα της μείωσης της διατομής της ράβδου κατά την ποσότητα του σιδήρου που μετατρέπεται σε σκουριά (τα χλωριόντα προκαλούν τοπική αλλά εξαιρετικά μεγάλη διάβρωση). Μειώνει επίσης, και μάλιστα δυσανάλογα, την ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός με πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στη σεισμική συμπεριφορά του μέλους. Επιπλέον, επειδή η σκουριά έχει όγκο 2 ως 6 φορές μεγαλύτερο από αυτόν του σιδήρου από τον οποίο έχει παραχθεί, η εναπόθεση του στρώματος της σκουριάς στην επιφάνεια της ράβδου αναπτύσσει μια σημαντική εσωτερική πίεση στο σκυροδέμα που την περιβάλλει, προκαλώντας τελικά τη ρηγμάτωση (διάρρηξη) του τελευταίου κατά ακτινικά επίπεδα που διέρχονται από τον άξονα της ράβδου. Όταν η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι μικρή και/ή ο εγκάρσιος οπλισμός είναι λίγος ή ανύπαρκτος, η ρηγμάτωση φθάνει στην επιφάνεια του σκυροδέματος και αποτινάσσει την επικάλυψη, μειώνοντας ή μηδενίζοντας τη συνάφεια και εκθέτοντας ακόμη περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση.[13]

2.ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΧΑΛΥΒΑ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το βασικό πρόβλημα που σχετίζεται με την υποβάθμιση του οπλισμένου σκυροδέματος λόγω της διάβρωσης, δεν είναι ότι ο οπλισμός ο ίδιος χάνει σταδιακά τη μηχανική αντοχή του, παρά το ότι τα προϊόντα της διάβρωσης ασκούν τάσεις μες στο σκυρόδεμα που δεν μπορούν να υποστηριχθούν από τις πλαστικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα αυτό να ρηγματωθεί. Αυτό οδηγεί στην εξασθένηση της συνάφειας σκυροδέματος-χάλυβα και επηρεάζει ευθέως τη λειτουργικότητα και την αντοχή των μελών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ότι ο χάλυβας οπλισμού προσφέρει αντοχή και πλαστιμότητα στα φέροντα μέλη της κατασκευής μέσω του δεσμού και της αγκύρωσής του στο σκυρόδεμα, γίνεται αντιληπτό πόσο το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια της κατασκευής ακόμα και σε μη προχωρημένα στάδια διάβρωσης.

Μια σειρά από πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ανά τον κόσμο βοήθησαν στην ποσοτικοποίηση του φαινομένου, ώστε οι μηχανικοί να είναι σε θέση να κάνουν μια πρώτη εκτίμηση της έκτασης της διάβρωσης, να διαπιστώσουν τους κινδύνους ή να προβλέψουν τους μελλοντικούς χωρίς να είναι πλήρως εξαρτώμενοι από χρονοβόρες και δαπανηρές μεθόδους μέτρησης της διάβρωσης. Στη συνέχεια δίνονται βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν και διατίθενται στη βιβλιογραφία.

Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε περίπτωση επαρκούς επικάλυψης είναι η εξής. Αρχικά τα διογκούμενα προϊόντα της διάβρωσης στην επιφάνεια των ράβδων προκαλούν επιμήκεις ρωγμές στην επικάλυψη του σκυροδέματος. Οι ρωγμές ή ακόμα και τυχόν αποφλοιώσεις της επικάλυψης σημαίνουν απώλεια των εγκάρσια στις ράβδους θλιπτικών δυνάμεων και επομένως μείωση των δυνάμεων δεσμού στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Παράλληλα το μαλακό στρώμα σκουριάς στην επιφάνεια του οπλισμού μειώνει το συντελεστή τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Σταδιακά η απομείωση των νευρώσεων των παραμορφωμένων ράβδων προκαλεί μια σημαντική ελάττωση στις δυνάμεις αλληλοεμπλοκής μεταξύ νευρώσεων και των ενδιάμεσων τμημάτων σκυροδέματος, ο οποίος θεωρείται και ο βασικός μηχανισμός συνάφειας μεταξύ των δύο υλικών.

Ακολουθούν κάποιες μέσες τιμές που προέκυψαν από μια σειρά πειραμάτων. Η αντοχή του δεσμού συνάφειας αυξάνει περίπου 17% και η ολίσθηση της ράβδου μειώνεται στα αρχικά στάδια της διάβρωσης. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται μέχρι διάβρωση της τάξης του 4-5% και αποδίδεται στην αύξηση της τραχύτητας της ράβδου και την περίσφιξη που προσφέρει το σκυρόδεμα. Με την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής (διάβρωση περίπου 5%) η αντοχή συνάφειας πέφτει σταδιακά για επιπλέον διάβρωση περίπου 1% και στη συνέχεια μειώνεται ραγδαία. Για 2-4% επιπλέον διάβρωση μετά τη ρωγμή, η συνάφεια υποβαθμίζεται στην απομένουσα τιμή 33-35% (. Κατόπιν μέχρι και 80% ποσοστό διάβρωσης η αντοχή του δεσμού πέφτει μόνο κατά 20%. Επομένως η στιγμή που η διάβρωση προκαλεί ρηγματώση είναι πολύ καθοριστική, γιατί από κει και πέρα αρκεί μια μικρή επιπλέον διάβρωση για να μειώσει τη συνάφεια σε απαράδεκτα επίπεδα.

Ο μηχανισμός αστοχίας δείχνει ότι αμέσως μετά τη ρωγμή, υψηλές τιμές αντίστασης του δεσμού μπορούν να αποκτηθούν, εφόσον τα ενδιάμεσα προϊόντα διάβρωσης είναι αμελητέα και αξιόλογη φθορά των νευρώσεων δεν έχει λάβει χώρα ακόμη. Η αστοχία που μπορεί να συμβεί εδώ (από τη μεταφορά ισχυρών θλιπτικών ή εφελκυστικών δυνάμεων του οπλισμού) στο σκυρόδεμα είναι τύπου διάρρηξης του σκυροδέματος και προκαλείται από τάσεις στεφάνης εξαιτίας της δράσης των νευρώσεων στο σκυρόδεμα. Σε ένα επίπεδο διάβρωσης περίπου 12% ο τύπος αστοχίας μεταβάλλεται σε συνεχούς ολίσθησης της ράβδου. Πλέον η συνδυασμένη δράση της αυξημένης φθοράς των νευρώσεων, η 'λίπανση' από το ενδιάμεσο διαβρωμένο στρώμα και η απώλεια της περίσφιξης από το σκυρόδεμα μεταβάλλουν απότομα το μηχανισμό αστοχίας. Άλλωστε σε επίπεδα διάβρωσης περίπου 7% οι νευρώσεις έχουν

χάσει περίπου το 45% του ύψους τους, ενώ σε διάβρωση 12%, το 70% του ύψους τους. Η σημαντική αύξηση της ρωγμής και η φθορά των νευρώσεων εξηγούν τη μείωση της αντοχής

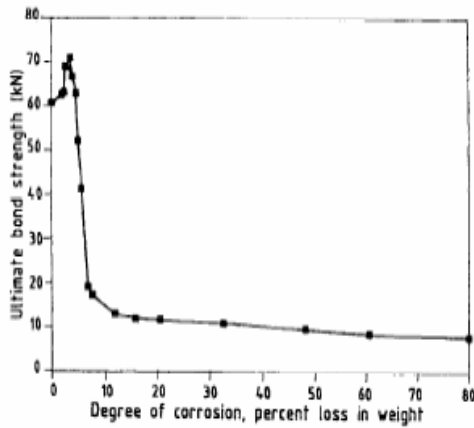


Figure 4 Relationship between the ultimate bond strength and different degrees of corrosion

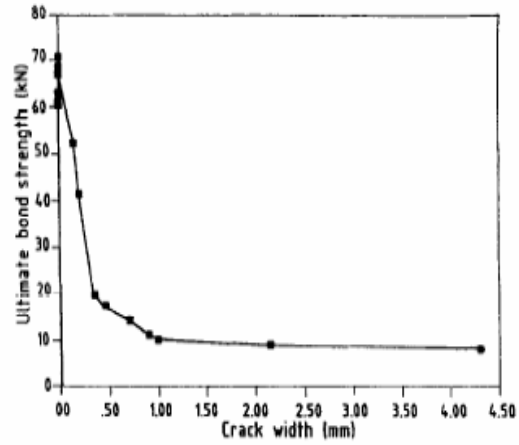


Figure 9 Effect of corrosion crack width on ultimate bond strength

Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion

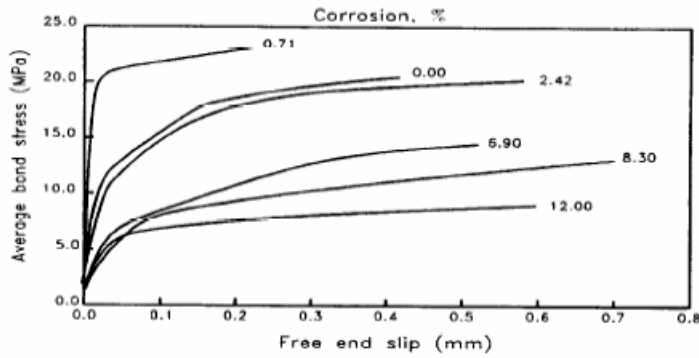


Fig. 6. Comparison of bond behaviour for pullout normal portland cement specimen with different levels of corrosion.

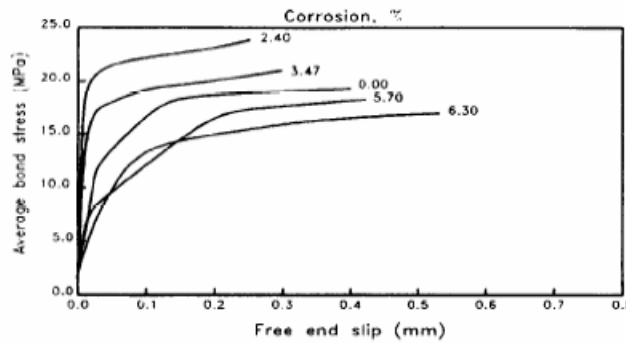


Fig. 7. Comparison of bond behaviour for pullout fly ash specimen with different levels of corrosion.

του δεσμού χάλυβα-σκυροδέματος μεταξύ 5%-7% ποσοστού διάβρωσης. Ρωγμή περίπου 0.3 mm και απώλεια ύψους νευρώσεων της τάξης του 25% αποτελούν κρίσιμες τιμές πέρα από τις οποίες η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος πέφτει δραματικά.

Αν χρησιμοποιηθεί ως πρόσμεικτο στο τσιμέντο ιπτάμενη τέφρα, η διάβρωση επιβραδύνεται σημαντικά στα πρώτα της στάδια (περίπου 3 φορές), ενώ και βελτιώνεται σημαντικά και η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος. Για παράδειγμα διάβρωση 6.5% προκάλεσε μείωση της αντοχής συνάφειας κατά 27% και 14% σε μέλη ο/σ, με 100% τσιμέντο κανονικό τύπου Portland και 70% τύπου Portland – 30% ιπτάμενη τέφρα αντίστοιχα.

Στις περιοχές κοντά στους συνδετήρες η συνάφεια μένει σχεδόν ανεπηρέαστη για προωρημένο στάδιο διάβρωσης, εξαιτίας της εγκάρσιας υποστήριξης που προσφέρουν στο σκυρόδεμα γύρω από τον επιμήκη οπλισμό.

Διάβρωση σε ποσοστό πέραν του 4-5% προκαλεί περίπου γραμμική αύξηση των βελών κάμψης μελών.

Ακολουθούν κάποιες ποσοτικές εκφράσεις μεταξύ των παραμέτρων του φαινομένου που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Ο Cabrera προτείνει την εξής σχέση για τον υπολογισμό της αύξησης της διαμέτρου ράβδου οπλισμού για πλάκες:

$$\Delta d = ((\sqrt{d^2 + 4W_i d/\rho}) - d)/2$$

Όπου d είναι η διάμετρος της ράβδου (cm)

Δd είναι η αύξηση της διαμέτρου ράβδου λόγω διάβρωσης (cm)

W_i είναι η απώλεια βάρους του χάλυβα (g/cm^2)

ρ είναι η πυκνότητα του προϊόντος διάβρωσης (g/cm^3)

Το πλάτος της ρωγμής υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση

$$W_c = 4\Delta d(((c_1 + d/2)/(c_2 + d/2))\sin\theta + \cos\theta) \sin\theta$$

Όπου W_c είναι το πλάτος της ρωγμής (cm)

c_1, c_2 είναι οι αποστάσεις της ράβδου από την επιφάνεια επικάλυψης και από την επιφάνεια κάθετα σε αυτή. (cm)

θ είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της πρώτης ρωγμής με αυτή της δεύτερης (περίπου 10° σύμφωνα με πειραματικές μελέτες)

Με τις σχέσεις αυτές μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης μετρώντας τις ρωγμές στην επιφάνεια. Οι σχέσεις αυτές δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια όταν η πυκνότητα της σκουριάς κυμαίνεται μεταξύ 3 και 9 (g/cm^3), το οποίο σημαίνει ότι η αντίδραση οξειδωσης δίνει προϊόν με όγκο περίπου διπλάσιο του μη διαβρωμένου χάλυβα και η απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας δεν ξεπερνά τα 0.2 g/cm^2 .

Οι Han-Seung Lee, Takafumi Noguchi και Fuminori Tomosawa προτείνουν τις παρακάτω σχέσεις για την επίδραση της διάβρωσης στην αντοχή και τη δυσκαμψία του δεσμού χάλυβα-σκυροδέματος.

σ_B : Compressive strength of concrete.

Δ_{wc} : Corrosion percentage at cracking (%).

Corrosion percentage (%)	Maximum bond strength (τ_{max}) (MPa)	Bond rigidity (D_s) (MPa)
$\Delta_w < \Delta_{wc}$	$\tau_{max} = 0.34\sigma_B - 1.93$	$D_s = 16.5\sigma_B - 160$
$\Delta_w \geq \Delta_{wc}$	$\tau_{max} = 5.21e^{-0.0561\Delta_w}$	$D_s = 1160\Delta_w^{-1.014}$

Οι Xiaohui Wang Xila Liu ανέπτυξαν ένα αμιγώς θεωρητικό μοντέλο που βασίζεται στους νόμους της ελαστοπλαστικής και με το οποίο προβλέπουν με καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα το ποσοστό διάβρωσης που οδηγεί σε ρηγμάτωση. Συγκεκριμένα υπολογίζουν το βάθος που έχει εισχωρήσει η διάβρωση στη διατομή της ράβδου (x_{cr}) συναρτήσει του βάθους κάλυψης, της διαμέτρου του οπλισμού, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και την αναλογία όγκου μεταξύ της σκουριάς και του καθαρού χάλυβα.[1, 2, 3, 4, 5]

3.ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Προκειμένου να εξετάσει την κατάσταση μιας κατασκευής από πλευράς διάβρωσης οπλισμών και να εκτιμήσει την μελλοντική πορεία και τα μέτρα που χρειάζονται να ληφθούν, ο μηχανικός χρειάζεται να κάνει πρώτα μια γενική αυτοψία και κατόπιν μια λεπτομερέστερη εξέταση. Στοιχεία που χρειάζεται να γνωρίζει, έστω και κατά προσέγγιση, για να αξιολογήσει τα αποτελέσματα της εξέτασης και να αποφασίσει για τα μέτρα που τυχόν απαιτούνται είναι η ηλικία της κατασκευής, η μέση ετήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας στην περιοχή και, προκειμένου περί παραθαλάσσιων κατασκευών, η απόσταση από τη θάλασσα και η κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων.

Η αυτοψία συνίσταται σε μια γενική οπτική εξέταση όλης της επιφάνειας της κατασκευής. Αν η εξέταση ορισμένων τμημάτων της επιφάνειας από κοντά είναι δύσκολη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυάλια ή βίντεο. Η γενική εξέταση έχει στόχο τον εντοπισμό ρωγμών παράλληλων στις ράβδους οπλισμού και/ή κηλίδων σκουριάς στην επιφάνεια.

Αν η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι επιχρισμένη, τέτοιου είδους ρωγμές θα έχουν κατά πάσα πιθανότητα διαπεράσει το επίχρισμα, ή και προκαλέσει την αποκόλλησή του. Για το λόγο αυτό, και λαμβάνοντας υπ' όψη τον προστατευτικό ρόλο του επιχρίσματος έναντι ενανθράκωσης ή διείδυσης χλωριόντων, επίχρισμα που δεν προδίδει διάβρωση των ράβδων στο υποκείμενο σκυρόδεμα, δεν χρειάζεται να αφαιρεθεί στο στάδιο αυτό, απλά και μόνον για λόγους γενικής οπτικής εξέτασης του σκυροδέματος.

Η λεπτομερέστερη οπτική εξέταση γίνεται σε θέσεις όπου υπάρχουν σαφείς ενδείξεις διάβρωσης, καθώς και σε μερικές θέσεις διαφόρων στοιχείων που δεν εμφανίζουν τέτοιες ενδείξεις. Το ποιες θα είναι αυτές οι θέσεις, εξαρτάται από τη σκοπούμενη μελλοντική χρήση της κατασκευής. Αν πρόκειται να γίνει αλλαγή χρήσης και να αυξηθούν τα μόνιμα ή τα κινητά, σε σχέση με αυτά τα οποία έχουν καταπονήσει την κατασκευή μέχρι τη στιγμή της αυτοψίας, τότε χρειάζεται να ελεγχθούν τα οριζόντια στοιχεία (πλάκες δοκοί) κοντά στις θέσεις των μέγιστων ροπών κάμψης, θετικών ή αρνητικών, εφ' όσον βέβαια στις θέσεις αυτές το εφελκόμενο πέλμα είναι επισκεψίμο και δεν καλύπτεται από επιστρώσεις δαπέδων ή τοιχοποιίες. Ανεξάρτητα από το αν προβλέπεται αλλαγή χρήσης ή όχι, και επειδή στην Ελλάδα καθοριστικός της ασφάλειας της κατασκευής είναι ο σεισμός, χρειάζεται να ελεγχθούν τα περισσότερα (ή και όλα) τα κατακόρυφα στοιχεία και μάλιστα στις κρίσιμες για το σεισμό περιοχές: κοντά στην κορυφή και κοντά στη βάση. Μεταξύ των δύο αυτών θέσεων αναμένεται να υπάρχουν διαφορές στη διάβρωση λόγω διαφοράς πορώδους του σκυροδέματος της επικάλυψης των ράβδων: στη βάση η συμπίκνωση είναι καλύτερη, αλλά ο ενδεχόμενος συνωστισμός των ράβδων στην περιοχή των αγκυρώσεων και των ματισμάτων μπορεί να προκαλέσει κενά στη μάζα και αυξημένο πορώδες της επικάλυψης. Επιπλέον σε στοιχεία του εξωτερικού περιβλήματος ενός κτιρίου, η πλευρά που βρίσκεται σε επαφή με την εξωτερική ατμόσφαιρα θα διαφέρει από αυτήν που βρίσκεται προς το εσωτερικό, τόσο από πλευράς ενδεχόμενης περιεκτικότητας σε χλωριόντα (μεγαλύτερη προς τα έξω) όσο και από πλευράς ενανθράκωσης (εντονότερη προς το εσωτερικό λόγω μικρότερης σχετικής υγρασίας και μικρότερου βαθμού κορεσμού των πόρων, και επομένως και από πλευράς διάβρωσης. Επίσης σε παραθαλάσσιες περιοχές οι εξωτερικές πλευρές της κατασκευής που είναι προς τη θάλασσα θα διαφέρουν από τις άλλες.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, επιλέγονται τα στοιχεία που θα εξεταστούν λεπτομερέστερα και οι αντίστοιχες θέσεις. Οι θέσεις τοπικής εξέτασης μπορεί να είναι μόνο μία ή δύο ανά περιοχή του κτιρίου.

Στις θέσεις λεπτομερους τοπικής εξέτασης αφαιρείται τοπικά το σκυρόδεμα μέχρις αποκαλύψεως του κυρίου οπλισμού, με σκοπό:

α) Την εξέταση του βαθμού διάβρωσης των ράβδων

β) Τη μέτρηση της επικάλυψης των ράβδων με σκυρόδεμα

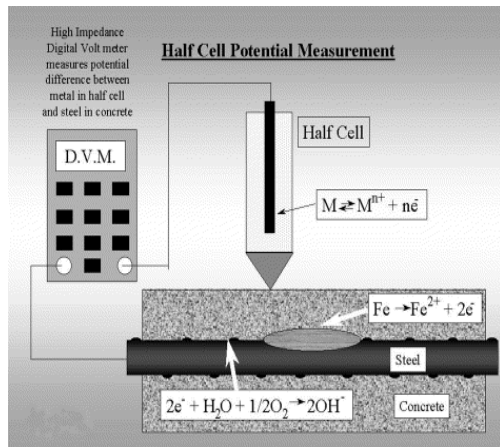
γ) Τη μέτρηση του βαθμού ενανθράκωσης με ψεκασμό της επιφάνειας της τομής με διάλυμα φαινυλοφθαλείνης σε οινόπνευμα (οπότε η μη ενανθρακωμένη περιοχή γίνεται ροζ), αμέσως μετά την τομή. Αν η ενανθράκωση δεν έχει φθάσει ακόμα στη ράβδο, μπορεί να εκτιμηθεί ο χρόνος που θα χρειαστεί για να συμβεί αυτό, με βάση το σημερινό βάθος ενανθράκωσης και τη σημερινή ηλικία του σκυροδέματος, καθώς και την αναλογία βάθους ενανθράκωσης με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου για ανεπίχρηστο σκυρόδεμα.

δ) Τη διαπίστωση ύπαρξης χλωριόντων, με ψεκασμό με κατάλληλα χρωματικό δείκτη (π.χ. νιτρικό άργυρο). Για λόγους ευκρίνειας, μπορεί να αφαιρεθεί το ήδη χρωματισμένο από το δείκτη φαινυλοφθαλείνης επιφανειακό στρώμα της τομής. Σε περίπτωση διαπίστωσης χλωριόντων, αλλά ακόμα κι αν δεν έχει γίνει ο ψεκασμός αυτός, συνίσταται να ληφθούν δείγματα σκυροδέματος υπό μορφή τριμμάτων, από διάφορα βάθη από την επιφάνεια, για εργαστηριακή μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωριόντα. Θα πρέπει να σημειώνεται η θέση και το βάθος λήψης του κάθε δείγματος, ώστε μετά την εργαστηριακή εξέταση να μπορεί να συσχετισθεί η περιεκτικότητα σε χλωριόντα, όχι μόνον με τη θέση αλλά και με το βάθος: Αν η περιεκτικότητα είναι περίπου σταθερή, τότε τα χλωριόντα προϋπήρχαν στο δείγμα. Αν μειώνεται με το βάθος, προέρχονται από το περιβάλλον.

Στη συνέχεια περιγράφονται κάποιες από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους που δίνουν πιο ακριβείς πληροφορίες για το ποσοστό διάβρωσης.

1) ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Οι μετρήσεις διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού (half cell potential measurement) είναι από



τις πιο συνηθισμένες στην πράξη για τη διερεύνηση της αποαθητικοποίησης του οπλισμού που σημαίνει ότι η διάβρωση πρόκειται να αρχίσει σύντομα αν δε έχει ήδη αρχίσει. Μια απλουστευτική διάταξη δίνεται στο σχήμα. Της μέτρησης προηγείται αποκάλυψη των ράβδων σε ορισμένες θέσεις και ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους για να διαπιστωθεί ότι υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια. Κατόπιν συνδέεται μια ράβδος μέσω ηλεκτρικού καλωδίου με έναν πόλο βολτομέτρου, ενώ ο άλλος συνδέεται με ηλεκτρόδιο αναφοράς (συνήθως από χαλκό ή θεικό χαλκό), που είναι σε επαφή με την επιφάνεια του σκυροδέματος. Το ηλεκτρόδιο μετακινείται στην επιφάνεια του

σκυροδέματος, με μετρήσεις που γίνονται κατ' αρχήν κάθε ένα μέτρο περίπου. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μεθόδου όπου η διαφορά δυναμικού υπερβαίνει τα 200mV, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποαθητικοποίησης των ράβδων και λαμβάνονται μετρήσεις σε μικρότερες αποστάσεις, π.χ. κάθε 25 ως 50cm. Διαφορές δυναμικού πάνω από 350mV σημαίνουν βέβαιη αποαθητικοποίηση των υποκείμενων ράβδων.

Εντούτοις η τυφλή αποδοχή των παραπάνω τιμών μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα και διαφορά δυναμικού ακόμα και πάνω από 350mV μπορεί να μην συνεπάγεται την παρουσία σημαντικής διάβρωσης. Το φαινόμενο

αυτό σχετίζεται στενά με φαινόμενα πόλωσης προερχόμενα από την περιορισμένη διάχυση του οξυγόνου στο προς εξέταση μέλος οπλισμένου σκυροδέματος. Λόγω της περιορισμένης πρόσβασης του οξυγόνου ο χάλυβας ενεργοποιείται, αλλά η διαδικασία της διάβρωσης δεν προχωρά, ενώ το μετρούμενο δυναμικό μπορεί να πέσει ακόμα και κατά 1V σε σχέση με το διαποτισμένο ηλεκτρόδιο. Για το λόγο αυτό η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή σε βυθισμένο ή σε περιβάλλον με μεγάλη σχετική υγρασία σκυρόδεμα γιατί υπερτιμά σημαντικά το βαθμό διάβρωσης.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι τα σκυροδέματα παρουσιάζουν διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάλογα κυρίως με την ανθεκτικότητα και αντοχή τους και το φαινόμενο αυτό μπορεί να εμφανιστεί και για διάφορες στρώσεις του ίδιου μέλους. Έτσι στην ουσία αν οι μετρήσεις δυναμικού γίνονται μακριά από τον οπλισμό εξαιτίας της επικάλυψης, πρόκειται για μεικτά δυναμικά. Το μέτρο αυτής της διαφοροποίησης μπορεί να φτάσει τα 200-300 mV, που είναι αρκετό για να κάνει τα συμπεράσματα αμφισβητήσιμα.

Επιπλέον απομακρυσμένα ηλεκτρικά ρεύματα, η θέση αναφοράς του ηλεκτροδίου, ο τύπος του τσιμέντου και η παρουσία ρηγματώσεων επηρεάζουν τις μετρήσεις των δυναμικών χωρίς αυτές οι διαφοροποιήσεις να μπορούν να προβλεφθούν.

Παρ' όλα αυτά η τεχνική αυτή θεωρείται ευρέως ότι μπορεί να εφαρμοστεί για μια πρώτη, προσεγγιστική χαρτογράφηση της διάβρωσης του οπλισμού σε μια κατασκευή. Ωστόσο η ποσοτικοποίηση και η πιο αξιόπιστη πρόβλεψη ή διαπίστωση της διάβρωσης απαιτεί τη χρήση άλλων ηλεκτροχημικών μεθόδων.

2) ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΟΛΩΣΗ

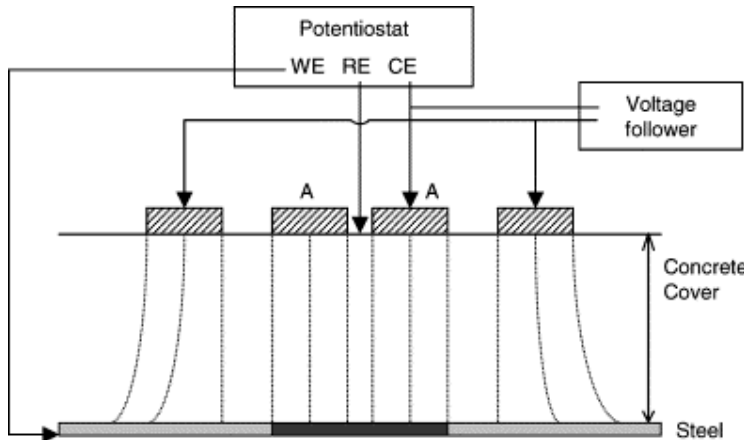
Η μέθοδος της γραμμικής πόλωσης (polarisation) ή επίσης γνωστή ως αντίσταση πόλωσης (polarisation resistance) στηρίζεται στη σχέση μεταξύ του δυναμικού που αναπτύσσει ένα τμήμα διαβρωμένου χάλυβα και του συνεχούς ρεύματος από εξωτερική πηγή που εφαρμόζεται σε αυτό. Εκτιμάται ο ρυθμός διάβρωσης μέσω του ρεύματος που προκαλεί η διάβρωση (I_{corr}) και υπολογίζεται από τη σχέση των Stern-Geary.

$$I_{\text{corr}} = B/R_p, \text{ όπου } B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)}$$

I_{corr} είναι το ρεύμα που τροφοδοτούμε το κύκλωμα και β_a , β_c η ανοδική και καθοδική σταθερά του Tafel αντίστοιχα και $R_p = dE/dI$ η αντίσταση πόλωσης, όπου dE η μεταβολή στο δυναμικό και dI η μεταβολή στο ηλεκτρικό ρεύμα. Η τιμή R_p σχετίζεται κατόπιν με την περιεκτικότητα CaCl_2 στο σκυρόδεμα και άρα το βαθμό διάβρωσης από τα χλωριόντα. $R_p \approx 10^5 - 10^6 \ \Omega \text{ cm}^2$ σημαίνει σκυρόδεμα χωρίς χλωρίδια δηλαδή πλήρης παθητικοποίηση του οπλισμού και $R_p \approx 10^3 - 10^4 \ \Omega \text{ cm}^2$ σημαίνει σκυρόδεμα με 3% CaCl_2 (ενεργοποίηση οπλισμού). Μετρώντας τη μεταβολή της αντίστασης παίρνουμε το ρυθμό διάβρωσης του οπλισμού.

Η βασική δυσκολία στην εφαρμογή αυτής της τεχνικής προκύπτει από την ανομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού σήματος που εφαρμόζεται δια μέσου του ηλεκτροδίου μέτρησης το οποίο έχει διαστάσεις πολύ μικρότερες από το υπό εξέταση μέλος της κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος. Αντί για ομοιόμορφη κατανομή σε όλο το μεταλλικό σύστημα, το ηλεκτρικό σήμα τείνει να εξαφανιστεί με την αύξηση της απόστασης από το ηλεκτρόδιο. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο που επιδρά στη μετρούμενη αντίσταση και μειώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα.

Η πιο αποδοτική τεχνική είναι αυτή του δαχτυλιδιού φρούρησης (guard ring technique). Αυτή συνίσταται στην τοποθέτηση ενός δεύτερου ηλεκτροδίου-μετρητή σε διάταξη ομόκεντρου κύκλου γύρω από τον πρώτο που επιτρέπει τον περιορισμό του σήματος σε μια καλά καθορισμένη περιοχή της κατασκευής. Το σχήμα δείχνει πως εφαρμόζεται αυτή η τεχνική. Και τα δύο ηλεκτρόδια διατηρούνται στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό σε σχέση με το εργαζόμενο ηλεκτρόδιο (working electrode) που δεν είναι άλλο παρά ο χάλυβας του οπλισμού, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση της ηλεκτρικής ροής από το κεντρικό ηλεκτρόδιο-μετρητή. Επομένως, ενώ ένα κεντρικό βοηθητικό καλώδιο πολώνει τοπικά τις ράβδους



οπλισμού, ένα άλλο γύρω από το πρώτο προσφέρει πόλωση στην υπόλοιπη περιοχή των ράβδων πλην αυτής που επηρεάζεται από το κεντρικό ηλεκτρόδιο. Εφ' όσον το ρεύμα του κεντρικού ηλεκτροδίου είναι γνωστό, όπως επίσης και η περιοχή του οπλισμού που επηρεάζεται από αυτό, η αντίσταση μπορεί να προσδιοριστεί.

Η ανάπτυξη φορητών και εύχρηστων συσκευών ελέγχου που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική και η αξιοπιστία που προσφέρει, την καθιστούν επαρκή για άμεσο, επι τόπου προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης.

3) Η ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)) είναι μια τεχνική που στηρίζεται στον τομέα φυσικής των συχνοτήτων. Η βασική ιδέα της EIS είναι ότι μια ηλεκτροχημική διεπιφάνεια μπορεί να αντιμετωπισθεί ως συνδυασμός παθητικών ηλεκτρικών στοιχείων κυκλωμάτων, δηλ., αντίσταση, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή. Όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται σε αυτά τα στοιχεία, το επακόλουθο ρεύμα λαμβάνεται με τη χρησιμοποίηση του νόμου του Ωμ. Με έναν απλό τρόπο, η σύνθετη αντίσταση μπορεί να θεωρηθεί ως αντίσταση ενός κυκλώματος σε ένα εναλλασσόμενο κυματικό σχηματισμό. Η τεχνική βρίσκει αυξανόμενες εφαρμογές, και έχει σπουδαία προσφορά στην έρευνα διάβρωσης.

Η EIS είναι μια ισχυρή τεχνική για να μελετηθεί το σύστημα χάλυβα-σκυροδέματος. Παρέχει πληροφορίες για διάφορες παραμέτρους, όπως η παρουσία επιφανειακών στρωμάτων, τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, διεπιφανειακή διάβρωση και φαινομένων μεταφοράς-μάζας. Εντούτοις, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι δύσκολη και η ανάγκη ενός ισοδύναμου κυκλώματος που μπορεί να αλλάξει ανάλογα την κατάσταση του χάλυβα, καθιστά την τεχνική καταλληλότερη για τις εργαστηριακές μελέτες. Η τεχνική είναι επίσης χρονοβόρα, παράχει όμως λεπτομερή γνώση του συστήματος χάλυβα σκυροδέματος.

4) Η εφαρμογή των ΕΠΙΒΑΤΙΚΩΝ (transient) μεθόδων, όπως ο γαλβανοστατικός παλμός και οι κουλοστατικοί (coulostatic) μέθοδοι, που λειτουργούν στην περιοχή του χρόνου στο σύστημα χάλυβα-σκυροδέματος έχει γίνει κοινή πρακτική τα τελευταία χρόνια. Αυτές οι τεχνικές ευνοούνται από τη σχετικά αργή απόκριση της διεπιφάνειας χάλυβα-σκυροδέματος, η οποία καθιστά τη συλλογή δεδομένων στην περιοχή του χρόνου προτιμότερη από αυτή στην περιοχή συχνότητας (όπως στην EIS). Ένα άλλο πλεονέκτημα των τεχνικών είναι ότι

μπορούν να παρέχουν τις τιμές της αντίστασης πόλωσης και της διπλής χωρητικότητας στρώματος από τη μέτρηση ενός χρόνου σταθερού ανά περιοχή μονάδων, που είναι ανεξάρτητη από τη συνολική περιοχή χάλυβα κάτω από τη μέτρηση. Αυτό γίνεται ένα πλεονέκτημα για επί τόπου έρευνα σε σχέση με άλλες τεχνικές που χρειάζονται τη γνώση της περιοχής των συστημάτων.

Στη γαλβανοστατική τεχνική παλμού (GPT) μια μικρή τρέχουσα διαταραχή (IAP) εφαρμόζεται στο χάλυβα οπλισμού χρησιμοποιώντας ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο στη συγκεκριμένη επιφάνεια κατά τρόπο παρόμοιο όπως στις γραμμικές μετρήσεις πόλωσης. Η απόκριση, ένα επιβατικό δυναμικό, καταγράφεται έπειτα όπως φαίνεται σχέση.

$$V_i = I_{ap} \cdot R_{\Omega} + I_{ap} \cdot R_p [1 - \exp(-t/(R_p \cdot C_{dl}))]$$

όπου t είναι ο χρόνος, R_p και C_{dl} είναι η αντίσταση πόλωσης και η διπλή ικανότητα στρώματος στην επιφάνεια της ράβδου χάλυβα, αντίστοιχα, και ρ είναι η ωμική αντίσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου επιφάνειας και της ράβδου χάλυβα.

Η λεπτομερής ανάλυση και προσαρμογή της απόκρισης συστημάτων επιτρέπουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος και του υπολογισμού του ρυθμού διάβρωσης.

Οι επιβατικές μέθοδοι που λειτουργούν στη χρονική περιοχή έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για τον επιτόπου έλεγχο, γρήγορες και μη καταστρεπτικές και παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του χάλυβα καθώς επίσης και πληροφορίες για τη συγκεκριμένη ειδική αντίσταση. Η παρουσία διαδικασιών διαφορετικών από τις διαδικασίες ενεργοποίησης ελέγχου μπορεί να προκαλέσει αποκλίσεις από την αναμενόμενη εκθετική συμπεριφορά και καθιστά συνεπώς δύσκολο τον υπολογισμό σχετικών παραμέτρων του συστήματος, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην υποτίμηση ή την υπερεκτίμηση του ποσοστού διάβρωσης.

μέθοδος	ανιχνεύει	χρήση	ταχύτητα κατά προσέγγιση
οπτική	επιφανειακές ρωγμές/κηλίδες	γενική	1 m ² /s
χτύπημα με σφυρί	εσωτερικές ατέλειες	γενική	0.1 m ² /s
μέτρηση επικάλυψης	βάθος & μέγεθος οπλισμού	γενική	1 ανάγνωση σε 5'
φαινολοφθαλείνη	βάθος ενανθράκωσης	γενική	1 ανάγνωση σε 5'
περιεκτικότητα χλωριόντων	διάβρωση από χλωριόντα	γενική+εργαστήριο	1 ανάγνωση σε 5' + χρόνος εργ. ανάλυσης (χρόνος πυρηνοληψίας + εργαστηρίου)
διαπερατότητας	ρυθμός διάχυσης	πυρινολήπτης+ειδίκευση	(χρόνος πυρηνοληψίας + εργαστηρίου)
πετρογραφία	ιδιότητες σκυροδέματος	πυρινολήπτης+ειδίκευση	(χρόνος πυρηνοληψίας + εργαστηρίου)
ηλεκτρικό δυναμικό	κίνδυνος διάβρωσης	γενική / ειδίκευση	1 ανάγνωση σε 5"
Αντίσταση πόλωσης	ρυθμός διάβρωσης	ειδίκευση	1 ανάγνωση σε 5'-30'

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι ευρύτερα διαδεδομένες μέθοδοι αποτίμησης με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. [9,11, 13]

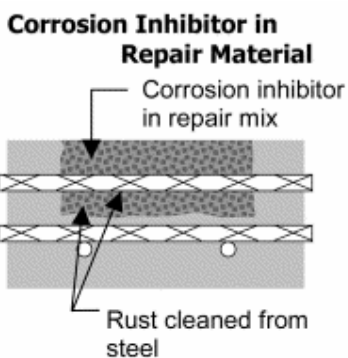
4.ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό επιλέχθηκε, αντί γενικής αναφοράς στο μεγάλο όγκο των μέτρων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης, να επικεντρωθεί με περισσότερη λεπτομέρεια σε μία όχι ακόμη πολύ διαδεδομένη μέθοδο.

Οι ανασταλτικοί παράγοντες (inhibitors) διάβρωσης είναι πρόσμεικτα που προστίθενται σε μικρές συγκεντρώσεις στο σκυρόδεμα για την επισκευή μελών ή την ανέγερση νέων

κατασκευών. Πρόκειται για χημικές ενώσεις, οργανικά ή ανόργανα άλατα που προστατεύουν τον οπλισμό, με το να εμποδίζουν την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον σκυρόδεμα.

Τα ανασταλτικά διάβρωσης πρωτοεφαρμόστηκαν με επιτυχία σε σωληνώσεις και πολεμικές μηχανές για πολλές δεκαετίες. Η χρήση τους στο σκυρόδεμα είναι πιο πρόσφατη και πολλή πιο περιορισμένη. Υπήρχε μια διστακτικότητα να δοκιμαστούν ως πρόσμεικτα στο σκυρόδεμα, γιατί δεν μπορούσαν να αντικατασταθούν, αν αποδεικνύονταν αναποτελεσματικά, να προστεθούν επιπλέον ποσότητες, αν καταναλώνονταν η αρχική, ή να αφαιρεθούν αν είχαν επιβλαβείς συνέπειες. Η ευκολία εφαρμογής, η ευελιξία των ανασταλτικών σχετικά με τη δοσολογία και η συμβατότητά τους γύρω από πολλά θέματα που αφορούν την κατασκευή και λειτουργία των δομημάτων έκαναν τη χρήση τους ελκυστική. Αν και πολλοί ανασταλτικοί παράγοντες της διάβρωσης χάλυβα στο σκυρόδεμα έχουν προταθεί, μόνο λίγοι έχουν μελετηθεί σοβαρά για την αποτελεσματικότητα και την επιρροή στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παράσχει πληροφορίες σχετικά με την μη διαδομένη ακόμη αυτή μέθοδο.



Διακρίνονται 3 κατηγορίες ανασταλτικών ανάλογα με το πως επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης: α) ανοδικοί (δρουν στις περιοχές ανόδου), β) καθοδικοί (δρουν στις περιοχές καθόδου) γ)μεικτοί (δρουν και στις δύο)

Οι ανοδικοί ανασταλτικοί παράγοντες καταπνίγουν τις αντιδράσεις στην άνοδο, ενώ οι περισσότεροι για να δράσουν πρέπει να είναι σε ποσότητα αρκετή ώστε να εξουδετερώσουν τα χλωριόντα. Για να είναι λοιπόν αποτελεσματική η δράση τους θα πρέπει να έχει γίνει εκτίμηση της συγκέντρωσης των χλωριούχων αλάτων στο σκυρόδεμα.

Οι καθοδικοί ανασταλτικοί παράγοντες ενεργούν είτε με την επιβράδυνση της καθοδικής αντίδρασης είτε κατακρημνίζοντας επιλεκτικά τις καθοδικές περιοχές. Τα υλικά σε αυτήν την ομάδα είναι ισχυροί αποδέκτες πρωτονίων και εμποδίζουν την οξείδωση του σιδήρου.

Οι μεικτοί ανασταλτικοί παράγοντες μπορούν να δράσουν ταυτόχρονα και στις ανοδικές και καθοδικές διαδικασίες. Είναι συνήθως πιο επιθυμητοί επειδή εμποδίζουν την προσβολή από χλωρίδια καθώς επίσης και τη δημιουργία ανοδικών και καθοδικών περιοχών στις αποπαθητικοποιημένες περιοχές του χάλυβα..

Αποδεδειγμένα ικανοποιητική προστασία από διάβρωση προσφέρουν πρόσμεικτα όπως το νιτρώδες άλας νατρίου, νιτρώδες άλας βáriου, νιτρώδες άλας καλίου, χρωμικό άλας καλίου, και διχρωμικό άλας καλίου, με το πρώτο να προστατεύει πολύ καλά από τα χλωριόντα και επιπλέον να είναι και οικονομικό.. Από πειραματικές μελέτες συνιστώμενες ποσότητες των ανασταλτικών αυτών είναι 0.5 ως 3% κ.β. σκυροδέματος. Ωστόσο τα άλατα του νατρίου παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο να αντιδράσουν με αδρανή πλούσια σε πυρίτιο, σχηματίζοντας προϊόντα που διογκώνονται και προκαλούν ρηγμάτωση. Όλες οι παραπάνω ουσίες επιφέρουν μείωση της αντοχής του σκυροδέματος ή του επισκευαστικού κονιάματος στο οποίο προστίθενται και ιδίως τα χρωμικά άλατα του καλίου και του νατρίου.

Σημαντική προστασία προσφέρει το νιτρώδες ασβέστιο (το δημοφιλέστερο πρόσμεικτο) ως ανοδικός τύπος ανασταλτικού παράγοντα. Σταματά τη διάβρωση αντιδρώντας με ιόντα σιδήρου διαμορφώνοντας ένα λεπτό στρώμα σιδηρικού οξειδίου του σιδήρου, Fe_2O_3 , γύρω από την άνοδο. Είναι το μόνο ανασταλτικό που αποφέρει αύξηση της θλιπτικής αντοχής και επιπλέον δρα σαν ρευστοποιητής. Σοβαρό μειονέκτημα είναι ότι είναι αποτελεσματικό μόνο σε επαρκώς μεγάλες ποσότητες, ενώ παρουσιάζει και την τάση να διασκορπίζεται στη μάζα του σκυροδέματος, από το να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του σιδήρου. Ακόμη αυξάνει τη συστολή ξήρανσης,

Τα ανασταλτικά με βάση τις αλκανολαμίνες (κυρίως τριεθανολαμίνη, μονοεθανολαμίνη και μεθυλδιεθανολαμίνη) έχουν την ικανότητα να κάνουν χρήση του πορώδους του σκυροδέματος και κινούμενα μέσω το δίκτυο των πόρων φθάνουν στην επιφάνεια της ράβδου οπλισμού και σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα. Επιπλέον μειώνουν την εισροή χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Ακριβώς επειδή δρουν τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο κατατάσσονται ως μεικτοί. Συνιστώμενη ποσότητα 1% κ.β. τσιμέντου, αν όμως υπάρχει αυξημένη ποσότητα χλωριόντων απαιτείται αναλογική αύξηση σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών.

Το μονοφθοριοφωσφορικό άλας του νατρίου έχει εφαρμοστεί ευρύτατα με επιτυχία για την παρεμπόδιση έναρξης της διάβρωσης, όσο και για τη μείωση του ρυθμού επέκτασή της αν αυτή έχει ήδη αρχίσει. Αντίθετα με την κοινή πρακτική σχετικά με τον τρόπο εφαρμογή των ανασταλτικών, εφαρμόζεται με διείδυση από την επιφάνεια του σκληρυμένου σκυροδέματος, γιατί ως πρόσμεικτο καθυστερεί πολύ την ανάμειξη του σκυροδέματος σχηματίζοντας αδιάλυτες ενώσεις. Δεν προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

Εξαιρετικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή σε σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την επισκευή μελών παρουσιάζουν οι ανασταλτικές ουσίες που χαρακτηρίζονται ως 'μεταναστεύουσες' (migrating). Ονομάζονται έτσι γιατί έχουν την ικανότητα να μεταναστεύουν σε περιοχές της μάζας του σκυροδέματος, πέρα από το σημείο εφαρμογής τους μέσω διάχυσης. Όταν έρχονται σε επαφή με τον οπλισμό σχηματίζουν ένα μονομοριακό στρώμα και ανακόπτουν τη διάβρωση τόσο στις ανοδικές όσο και στις καθοδικές περιοχές. Έρχονται να αντιμετωπίσουν ένα από τα βασικά προβλήματα των παραδοσιακών επισκευαστικών σκυροδεμάτων, δηλαδή τη διάβρωση των γειτονικών προς το επισκευασμένο τμήμα περιοχών. Οι ουσίες αυτές μετακινούμενες μπορούν να προσφέρουν προστασία και σε τμήματα του οπλισμού πέρα από αυτό που 'θεραπεύτηκε'. Είναι πτητικές ουσίες (τύπου VCI) και εφαρμόζονται στο σκυρόδεμα με μυστρί ή μηχανή ψεκασματος.

Τέλος κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν και κάποιες ουσίες για τις οποίες δεν υπάρχουν στοιχεία από εφαρμογές στην πράξη, αλλά εμφανίζουν πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά σε πολύ επιθετικό περιβάλλον, όσον αφορά τα χλωριόντα, πειραματικών εφαρμογών. Συγκεκριμένα η 5-εξυλ-βενζοτρίαζόλη, (C6BTA), το γλυκεροφωσφορικό νάτριο (GPH), και το δικυκλοεξυλαμινικό νιτρώδες άλας (DCHAMN) παρείχαν από πολύ καλύτερη ως παρόμοια προστασία σε σχέση με το νιτρώδες άλας του νατρίου που θεωρείται ένα από τα πιο αποτελεσματικά ανασταλτικά που έχουν εφαρμοστεί στην πράξη.

Σημαντικό μειονέκτημα όλων των ανασταλτικών είναι ότι αν το σκυρόδεμα ρηγματωθεί για λόγους διαφορετικούς από τη διάβρωση, τότε χάνεται σε μεγάλο βαθμό η προστασία που προσφέρουν γιατί σημαντικές ποσότητες απομακρύνονται από το νερό που διαπερνά τη ρωγμή. Για το λόγο αυτό συνίσταται ο συνδυασμός τους με ινοπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο δε ρηγματώνεται και αναιρεί το μειονέκτημα αυτό. Επίσης αν προστεθούν σε σκυρόδεμα ή κονίαμα με το οποίο επισκευαστούν μόνο τοπικά κάποια μέλη, είναι πιθανόν (πλην των μεταναστευτικών) να επιταχύνουν τη διάβρωση γύρω από την περιοχή που επισκευάστηκε αποτελώντας μια μη διαβρωμένη καθοδική περιοχή.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα ανασταλτικά πρόσμεικτα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, κι έχοντας κατά νου ότι δεν εξαφανίζουν το πρόβλημα, αλλά το αναστέλουν για κάποιο σημαντικό διάστημα. (6, 7, 8,10,12)

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η διάβρωση των οπλισμών σε επίπεδα άνω του 4-5% αρχίζει να υποβαθμίζει σημαντικά τη συνάφεια χάλυβα σκυροδέματος, και προκαλεί ρηγματώσεις, αποφλοίωση της επικάλυψης, αύξηση των βελών κάμψης και μείωση των αντοχών των μελών. Διάφορες πειραματικές μελέτες μας εφοδιάζουν με σχέσεις που συνδέουν τη

διάβρωση με τα φαινόμενα που προκαλεί. Εξελιγμένες μέθοδοι όπως της μέτρησης του ηλεκτρικού δυναμικού, της αντίστασης πόλωσης, της ηλεκτροχημικής φασματοσκόπησης σύνθετης αντίστασης και οι επιβατικές προσφέρουν πολλαπλές πληροφορίες γύρω από τη διάβρωση των οπλισμών. Οι ανασταλτικές ουσίες διάβρωσης αποτελούν μια απλή και αρκετά αποτελεσματική μέθοδο προστασίας/επισκευής, αρκεί να χρησιμοποιηθούν με προσοχή και επίγνωση των αδυναμιών τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion

J. G. Cabrera (1996)

2.Modeling bond strength of corroded reinforcement without stirrups

X. Wang, X. Liu (2004)

3.Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion

Han-Seung Lee, Takafumi Noguchi and Fuminori Tomosawa (2002)

4.Corrosion influence on bond in reinforced concrete

Congqi Fang, Karin Lundgren, Liuguo Chen and Chaoying Zhu (2004)

5.Effect of reinforcement corrosion on bond strength

Abdullah A. Almusallam, Ahmad S. Al Gahtani, Abdur Rauf Aziz and Rasheeduzzafar (1996)

6.Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair concepts or misconcepts

Alexander M. Vaysburd and Peter H. Emmons (2004)

7.Corrosion protection investigation of reinforcement by inorganic coating in the presence of alkanolamine-based inhibitor

G. Batis, P. Pantazopoulou and A. Routoulas (2003)

8.Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar

G. Batis, A. Routoulas and E. Rakanta (2003)

9. The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures

John P. Broomfield, Kevin Davies and Karel Hladky (2002)

10.How to make today's repairs durable for tomorrow - corrosion protection in concrete repair

A. M. Vaysburd and P. H. Emmons (2000)

11.Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques

M. F. Montemor, A. M. P. Simões and M. G. S. Ferreira (2003)

12.Corrosion inhibitors in concrete—part I: the principles

C. M. Hansson, L. Mammoliti and B. B. Hope

13.Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος ΙΙΙ

Φαρδής Μιχαήλ (2003)