ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΑΤΙΣΕΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΚΥΡΙΑΚΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

Προπτυχιακή Φοιτητήτρια Δ.Π.Θ., <u>anastasiachkyriakou@gmail.com</u>

Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετά την επίδραση της διάβρωσης στους μηχανισμούς απόκρισης δομικών στοιχείων τα οποία φέρουν ματίσεις των οπλισμών στις κρίσιμες διατομές. Από την διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας συλλέχθηκαν δεδομένα από πειράματα σε υποστηλώματα, αντιπροσωπευτικά και της προ αλλά και της μετά την ισχύ των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών πρακτικής, των οποίων η στοχευμένη διάβρωση των κρίσιμων περιοχών, όπου υφίσταται η μάτιση των κύριων οπλισμών, προηγήθηκε της ανακυκλιζόμενης καμπτικής φόρτισης. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να αξιολογηθεί/επαληθευθεί μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, η οποία στοχεύει στην αποτίμηση των κύριων μηχανισμών απόκρισης (κάμψης, διάτμησης και αγκύρωσης/μάτισης) σε όρους αντοχών και παραμορφώσεων, δομικών στοιχείων με και χωρίς την επίπτωση της διάβρωσης των οπλισμών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιδιαίτερη σημασία σε ερευνητικό και κατασκευαστικό επίπεδο δίδεται τις τελευταίες δεκαετίες στους παράγοντες που μειώνουν την αντοχή του οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.), στα είδη και τους τρόπους διάβρωσης, καθώς και στις επιπτώσεις αυτών στην κατασκευή, με την έννοια της ανθεκτικότητας να έχει εισαχθεί πλέον στις βασικές αρχές του σχεδιασμού. Οι παράμετροι που συντέλεσαν στο να ερευνηθούν αναλυτικότερα οι παράγοντες αυτοί είναι οι ολοένα αυξανόμενες παρατηρήσεις της καταστρεπτικής δράσης της διάβρωσης στις κατασκευές, καθώς και το αυξημένο κόστος επισκευών που αυτές απαιτούσαν. Επιπλέον, λόγω της μείωσης του προσδόκιμου ζωής των κατασκευών, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος πρόωρων και ψαθυρού τύπου αστοχιών σε πιθανές σεισμικές δράσεις, θέτοντας ταυτόχρονα σε κίνδυνο και ανθρώπινες ζωές.

Κύριο ρόλο στην απόκριση μιας κατασκευής Ο.Σ. έναντι σεισμικής διέγερσης έχουν τα υποστηλώματα, τα οποία υπόκεινται σε συνδυασμένη δράση αξονικού και τέμνουσας. Πειραματικά, συνήθως μελετώνται βάσει του απλού συστήματος πρόβολος-θεμέλιο ώστε η κατανομή ροπών να ταυτίζεται με αυτή υποστηλώματος σε διπλή καμπυλότητα. Μέγρι σήμερα περιορισμένος είναι ο αριθμός σχετικών πειραματικών μελετών όπου η διάβρωση είναι παράμετρος μελέτης, στοχεύοντας στην επίδρασή της α) στη καμπτική αντοχή με διάβρωση μόνο των συνεχών οπλισμών, [1,2]), β) στην διατμητική αντοχή (με διάβρωση μόνο των συνδετήρων [3,4], όπου όμως το ενδεχόμενο λυγισμού των θλιβομένων διαμηκών ράβδων λόγω ανεπαρκούς στήριξης μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμένη καμπτική απόκριση στην περίπτωση που η απομένουσα λόγω διάβρωσης διατμητική αντοχή επαρκεί), και γ) στην αντοχή ματίσεων στην περιοχή σύνδεσης [5,6]. Η αναλυτική προσέγγιση των ανωτέρω μηγανισμών απόκρισης υπό την επίπτωση της διάβρωσης έχει ήδη διατυπωθεί ως μία καθολική μεθοδολογία από τους Πανταζοπούλου, Ταστάνη και Δολιανίτου [7,8] όπου, σε όρους ανταγωνιζόμενων τεμνουσών και των συν αυτώ αθροιζομένων παραμορφώσεων, προκύπτει πώς ο βαθμός διάβρωσης αναδεικνύει τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας ανατρέποντας την επιθυμητή ιεράρχηση. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία η διάβρωση ποσοτικοποιείται μέσω διαφόρων παραμέτρων όπως: η απώλεια διαμέτρου των οπλισμών (βάθος διείσδυσης διάβρωσης), ο βαθμός ψαθυροποίησης του χάλυβα, ο οποίος σχετίζεται με τη μείωση της ικανότητας παραμόρφωσής του εξαιτίας της διάβρωσης που δημιουργεί εξαχνώσεις (pitting corrosion), η μείωση της αντοχής σε συνάφεια λόγω εξάλειψης των

νευρώσεων (μείωση συντελεστή τριβής) αλλά και λόγω ρηγμάτωσης της επικάλυψης σκυροδέματος των οπλισμών.

Η επαλήθευση της ανωτέρω μεθοδολογίας μέσω συσχέτισης με πειραματικά δεδομένα ως προς τις περιπτώσεις α) και β) έχει ήδη πιστοποιηθεί [9]. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η επαλήθευση της ανωτέρω μεθοδολογίας σχετικώς με υποστηλώματα που φέρουν διαβρωμένες ματίσεις στην περιοχή σύνδεσή τους (π.χ. θεμέλιο), η οποία διεξήγθη στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας [10]. Επειδή αποτελεί πάγια πρακτική η παράθεση διαμήκων οπλισμών στον πόδα υποστηλωμάτων τόσο στην προ όσο και στην μετά την ισχύ των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών εποχή, διερευνόνται αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις δοκιμίων και των δύο περιόδων: δοκίμια με λείες ράβδους και χαμηλή θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και δοκίμια σχεδιασμένα με βάση τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς [6].

Η μηχανική συμπεριφορά μάτισης διαμήκων ράβδων ελέγχεται από τον μηχανισμό συνάφειας ράβδου – σκυροδέματος. Επειδή η συμπεριφορά της συνάφειας στο στάδιο αντοχής έχει βρεθεί να είναι ταυτόσημη στα προβλήματα μάτισης και αγκύρωσης [11], παρατίθενται ευρήματα από πειράματα διαβρωμένων αγκυρώσεων: από την εργασία [12] προέκυψε ότι για απώλεια διαμέτρου από επιταχυνμένη, ηλεκτροχημική διάβρωση έως 0.4% η αντοχή συνάφειας αυξάνει ως προς την τιμή αναφοράς (μηδενική διάβρωση) ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά η πτώση είναι ιδιαίτερα σημαντική (π.χ. για διάβρωση 1% και 2% η μείωση του φορτίου αντοχής ήταν αντίστοιχα 25% και 38%) συνοδευόμενη από αύξηση των ολισθήσεων. Από πειράματα σε φυσικά διαβρωμένα στοιχεία [13,14] προέκυψε ότι για τα δοκίμια με μέσο επίπεδο βλαβών, στα οποία η απώλεια διαμέτρου κυμάνθηκε από 0.3% έως 2.3%, η αντοχή συνάφειας υπέστη μείωση έως 17%. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις τεχνητής και φυσικής διάβρωσης φαίνεται ότι στην πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα είναι επιδεινωμένα εξαιτίας του τύπου σκουριάς που δημιουργείται [15]. Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων της μελέτης [16] ως προς την επίδραση του βαθμού τεχνητής διάβρωσης (έως 10% σε απώλεια διατομής) στην δομική απόκριση στοιχείων με σημαντικό μήκος μάτισης ($l_0=45D_b$, όπου D_b η διάμετρος ράβδου, ώστε να εξασφαλίζεται η πλάστιμη, καμπτική συμπεριφορά), προέκυψε ότι αυτά, μόλις προσέγγισαν το φορτίο διαρροής των ράβδων αστόχησαν ψαθυρά. Γίνεται σαφές από τα ανωτέρω ότι ο πολλαπλός τρόπος (απώλεια διαμέτρου, ψαθυροποίηση του χάλυβα, εξάλειψη νευρώσεων, ρηγμάτωση της επικάλυψης σκυροδέματος) με τον οποίο η διάβρωση βάλει την σχέση τάσης συνάφειας ολίσθησης μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος καθιστά εξόγως επισφαλή την δομική απόκριση στοιχείων Ο.Σ. που φέρουν ματίσεις.

2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ [6, 17, 18]

Οι ερευνητές [6,17,18] μελέτησαν την δομική συμπεριφορά διαβρωμένων υποστηλωμάτων υποκείμενων σε ανακυκλιζόμενη τέμνουσα παρουσία θλιπτικού αξονικού φορτίου μέσω δοκιμίων τύπου προβόλου που έφεραν διαβρωμένες ματίσεις των διαμήκων οπλισμών στην περιοχή μέγιστης ροπής. Τα δοκίμια είχαν ίδια γεωμετρία διατομής (300x200mm), διατμητικό άνοιγμα (L_s=1200mm), ποσοστό όπλισης (1.2% από 4Φ14) και μήκος μάτισης (l_o=40D_b), όμως διακρίνονται ως προς την ποιότητα των υλικών και τις λεπτομέρειες όπλισης (cl_o=40D_b), όμως διακρίνονται ως προς την ποιότητα των υλικών και τις λεπτομέρειες όπλισης σε δύο σειρές: Στην πρώτη σειρά (LS-Low Strength, σχεδιασμός με βάση την προ του '70 πρακτική στην Τουρκία) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 4MPa, οι οπλισμοί ήταν λείες ράβδοι κατηγορίας S220 (ο οπλισμός διάτμησης ήταν Φ8/200mm με s/D_b=14) και το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο ήταν 124kN (v=0.52). Ο βαθμός διάβρωσής τους (ως απώλεια διατομής διαμήκους ράβδου) κυμάνθηκε από 6% έως 28%. Στην δεύτερη σειρά (NS-Normal Strength, σχεδιασμός με βάσει τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς) η θλιπτική αντοχή του σκυροχάλυβας S420 (με οπλισμό διάτμησης ήταν νευροχάλυβας S420 (με οπλισμό διάτμησης φ8/100mm, με s/D_b=7) και το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο ήταν 282kN (v=0.2).

Ο βαθμός διάβρωσης κυμάνθηκε από 9% έως 54%. Σημειώνται ότι διάβρωση συνέβη κυρίως στους διαμήκεις οπλισμούς και λιγότερο στους συνδετήρες και των δύο σειρών.

Η απόκριση δύναμης – μετατόπισης τόσο για την θετική όσο και για την αρνητική κατεύθυνση φόρτισης (Σχ. 1, 2) επιλέγεται εδώ να γίνει σε απευθείας παράθεση ώστε να είναι άμεσα ορατή η σύγκριση τους. Επίσης η συμπεριφορά του κάθε διαβρωμένου δοκιμίου συγκρίνεται με τη συμπεριφορά του δοκιμίου – μάρτυρα (πράσινη καμπύλη). Για τα δοκίμια LS (Σχ.1) συγκρίνονται οι δύο αποκρίσεις με το μέσο όρο των δύο αποκρίσεων του δοκιμίου – μάρτυρα. Για τα δοκίμια NS (Σχ.2), η σύγκριση των διαβρωμένων δοκιμίων έγινε και πάλι με το μέσο όρο των κατευθύνσεων του δοκιμίου – μάρτυρα ως εξής: για τα διαβρωμένα δοκίμια των οποίων τα αποτελέσματα για τις θετικές και αρνητικές κατευθύνσεις φόρτισης ήταν παραπλήσια, η σύγκριση έγινε με την πιο αντιπροσωπευτική κατεύθυνση. Μόνη εξαίρεση αποτέλεσε το δοκίμιο NS-X9 που είχε διαφορετική συμπεριφορά στους δυο κλάδους, έτσι ελήφθη ο μέσος όρος αυτών.



Σχήμα 1. Περιβάλλουσες τέμνουσας δύναμης – μετατόπισης κορυφής δοκιμίων LS



Σχήμα 2. Περιβάλλουσες τέμνουσας δύναμης – μετατοπισης κορυφής δοκιμίων NS

Ως προς τα δοκίκμια LS (Σχ. 1), παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις μια υποδιέστερη συμπεριφορά της αρνητικής κατεύθυνσης φόρτισης, και αυτό διότι η συνάφεια των θλιβομένων διαβρωμένων ράβδων κατά την θετική φόρτιση έχει βληθεί, οπότε όταν αυτές τίθενται σε εφελκυσμό κατά την αρνητική φόρτιση δεν είναι δυνατή η ανάληψη ισοδύναμου φορτίου για ίδιο μέγεθος μετατόπισης (σημειώνεται ότι επρόκειτο για ευθύγραμμες ματίσεις λείων ράβδων χωρίς άγκιστρο). Επίσης για διάβρωση μέχρι 12% όλες οι αποκρίσεις υπόκεινται της απόκρισης του δοκιμίου – μάρτυρα, ενώ παραδόξως για τα μεγαλύτερα ποσοστά διάβρωσης υπέρκεινται. Οι ερευνητές αναφέρουν περί βελτίωσης της τριβής που επιφέρει η εναποθεση των προϊόντων σκουριάς γύρω από την ράβδο, όμως αυτό, κατ' άλλους ερευνητές [12], συμβαίνει όταν τα επίπεδα διάβρωσης είναι μικρά (<0.5%). Πιθανολογείται γι' αυτά τα δοκίμια ότι η αύξηση της αντοχής τους οφείλεται στην βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος κατά την φάση διαβροχής στους κύκλους διάβρωσης. Ως τυπική μορφή αστοχίας των LS δηλώθηκε η διαμόρφωση των ράβδων, η



Σχήμα 3. Διαγράμματα (α) της ανηγμένης τέμνουσας αντοχής, (β) της αντίστοιχης στροφής και (γ) της στροφής αστοχίας συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης για τα δοκίμια LS - NS [6,17,18].

θραύση της επικάλυψης σκυροδέματος των θλιβομένων ράβδων και ο ταυτόχρονος λυγισμός αυτών (ως συνδυασμός των υψηλών τιμών v=0.52 και s/D_b=14).

Για τα NS (Σχ. 2), οι αποκρίσεις των δύο κατευθύνσεων ήταν παραπλήσιες, διαβρωμένα ενώ όλα τα δοκίμια υπόκεινται του μάρτυρα. Σημειώθηκε ότι ανέπτυξαν αποσχιστικές ρωγμές παράλληλα των διαμήκων ράβδων και η αστογία προήλθε τελικά από θραύση των αναμονών στην ένωση υποστηλώματος θεμελίου διότι όλη πλαστική η παραμόρφωση επικεντρώθηκε στις θέσεις αυτές όπου παρατηρήθηκε τοπική διάβρωση (pitting).

Προκειμένου να διαφανεί η επίδραση του βαθμού διάβρωσης (ως απώλεια διατομής διαμήκους ράβδου) σε δείκτες συμπεριφοράς όπως η μέγιστη αναλαμβανόμενη τέμνουσα Po.corr (εδώ ανηγμένη ως προς αντογή του αδιάβρωτου δοκιμίου-μάρτυρα, Po.ave), η αντίστοιχη στροφή θο καθώς και η στροφή θ_u για απώλεια αντοχής 15%, κατασκευάζονται τα διαγράμματα του Σχ. 3. Αναλύοντας τους δείκτες παρατηρείται ότι:

α) το μέγιστο φορτίο (Σχ. 3α) για τα δοκίμια LS υφίσταται ανεπαίσθητη μείωση (τιμές θετικής κατεύθυνσης φόρτισης) ως προς την τιμή του μάρτυρα για βαθμό διάβρωσης έως 12% ενώ αυξάνει -ενώ δεν θα έπρεπε- από 20 έως 40% για βαθμούς διάβρωσης 28% και 21% αντίστοιχα. Για τα δοκίμια NS υπάρχει σαφής πτωτική τάση συναστήσει του βαθμού διάβρωσης.

β) η στροφή στο μέγιστο φορτίο θ_0 (Σχ. 3β) για τα δοκίμια LS έχει ως εξής: για το δοκίμιο μάρτυρα είναι 1.2% και φαίνεται να πέφτει σε τιμή 1%, η οποία είναι αμετάβλητη ανεξαρτήτως του βαθμού διάβρωσης– εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο LS-X28 το οποίο επέδειξε πλάστιμη συμπεριφορά. Για τα δοκίμια NS ο δείκτης αυτός προκύπτει ανεπηρέαστος.

Γ) η στροφή στην αστοχία θ_u (Σχ. 3γ) των διαβρωμένων δοκιμίων LS είναι σαφώς περιορισμένη (τιμές στροφών από 1.5 έως 2%) σε σχέση με τον μάρτυρα (3%). Για τα διαβρωμένα δοκίμια NS ωστόσο παρατηρείται αμετάβλητη και ως προς τον μάρτυρα και ως προς τον βαθμό διάβρωσης (της τάξης του 3.5%).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ: ΑΔΙΑΒΡΩΤΗ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η μεθοδολογία αποτίμησης αδιάβρωτων/διαβρωμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος αναπτύχθηκε από τους Σ. Πανταζοπούλου, Σ. Ταστάνη και Σ. Δολιανίτου [7,8] σε υπολογιστικό φύλλο (spreadsheet). Ως προς την αδιάβρωτη κατάσταση, περιληπτικά εδώ αναφέρεται ότι στο spreadsheet εισάγονται τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, όπλισης καθώς και οι καταστατικοί νόμοι των υλικών. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση της διατομής και να προκύψουν τα εντατικά μεγέθη στα διάφορα στάδια συμπεριφοράς γίνεται διακριτοποίηση της διατομής σε φέτες, δημιουργώντας περισφιγμένες και απερίσφικτες ζώνες (αν υφίστανται συνδετήρες). Τα σημαντικά στάδια συμπεριφοράς είναι: η πρώτη ρηγμάτωση-λήξη ελαστικής συμπεριφοράς, η διαρροή εφελκυόμενου οπλισμού, η θραύση θλιβόμενης ζώνης – αν έπεται της διαρροής, καθώς και η αστοχία της μάτισης, είτε αυτή συμβαίνει προ διαρροής όπου η συνάφεια λαμβάνεται στην αντοχή της, είτε αυτή συμβαίνει μετά την διαρροή οπότε η συνάφεια λαμβάνεται απομειωμένη, υποστηριζόμενη μόνο από τους συνδετήρες. Με δεδομένο την οριακή τιμή παραμορφώσης του σκυροδέματος ή του χάλυβα, ανάλογα με το εκάστοτε στάδιο συμπεριφοράς, πραγματοποιείται επαναληπτική διαδικασία ώστε να βρεθεί η άγνωστη παραμόρφωση του έτερου υλικού ώστε οι εσωτερικές δυνάμεις της διατομής να βρίσκονται σε ισορροπία με την εξωτερικά ασκούμενη αξονική δύναμη (αν υπάργει). Δεδομένων των παραμορφώσεων των δύο υλικών στα διάφορα στάδια υπολογίζονται η σχετική καμπυλότητα, η αναλαμβανόμενη ροπή από τη διατομή και η αντίστοιγη καμπτική τέμνουσα (από διαίρεση της ροπής με το μήκος διατμητικού ανοίγματος). Η αποτίμηση της διατμητικής αντοχής γίνεται βάσει κανονιστικών σχέσεων [19,20] και συνδέεται, απομειωτικά, με την πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ_{Λ} [21]. Ακολούθως αποτιμάται η τέμνουσα που αντιστοιχεί στην αντοχή της μάτισης. Ειδικότερα, υπολογίζεται η συνολική δύναμη συνάφειας των ράβδων (πλήρης μέχρι την διαρροή και μειωμένη μετά την διαρροή) και συγκρίνεται με την δύναμη διαρροής των οπλισμών (ως πλήρης) και με την δύναμη των οπλισμών στο στάδιο της θραύσης -αν έπεται της διαρροής -(ως μειωμένη). Μέσω της σύγκρισης προκύπτει πότε σηματοδοτείται ακριβώς η αστοχία της μάτισης, οπότε υπολογίζεται η σχετική τάση και παραμόρφωση των οπλισμών (υιοθετείται διγραμμικός νόμος χωρίς πλατό για τον χάλυβα) και με αντίστοιχη καμπτική ανάλυση υπολογίζεται η σχετική ροπή και άρα η αντίστοιχη τέμνουσα μάτισης. Ως συνέπεια των ως άνω υπολογισμών, προκύπτει η τέμνουσα αντοχής του δομικού στοιχείου Vulim στην αδιάβρωτη κατάσταση ως η ελάχιστη εκ των τριών μηχανισμών που περιγράφηκαν ανωτέρω.

Η παραμορφωσιακή κατάσταση του υποστηλώματος σε κάθε στάδιο, καθώς και η πλαστιμότητα μ_Δ, υπολογίζεται ως άθροισμα συμβολών, εν προκειμένω λόγω κάμψης Δ_{flex}, διάτμησης Δ_{shear} και ολίσθησης Δ_{slip} του διαμήκους οπλισμού που συσσωρεύεται ως άνοιγμα ρωγμής στην βάση του στοιχείου, δηλαδή: Δ = Δ^{flex} + Δ^{shear} + Δ^{slip}. Σημειώνεται εδώ ότι η συνιστώσα Δ^{slip} στην παρούσα, αναθεωρημένη, έκδοση της μεθολογίας λαμβάνει υπόψη την

ολίσθηση τόσο από το διατμητκό άνοιγμα (όπου αναπτύσσεται η μάτιση) όσο και από το θεμέλιο [22].

Ως προς την διαβρωμένη κατάσταση, η αποτίμηση των επιπτώσεων της διάβρωσης είναι δυνατή όταν είναι γνωστοί στο μελετητή δυο παράγοντες, ο βαθμός διάβρωσης και ο βαθμός ψαθυροποίησης του χάλυβα. Ο βαθμός διάβρωσης, Χ, εκφράζεται ως το βάθος διείσδυσης της διάβρωσης, δηλαδή $X=\Delta D_b/D_b$, και ορίζεται ως η μεταβολή της διαμέτρου της ράβδου. Ο βαθμός ψαθυροποίησης σχετίζεται με τη μείωση της ικανότητας παραμόρφωσης του χάλυβα, και αφορά κατά κύριο λόγο την διάβρωση κατά βελονισμό (pitting corrosion). Οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν την καμπτική ανάλυση καθώς και την διατμητική αντοχή (αν αφορούν τους συνδετήρες). Η τέμνουσα αντοχή μάτισης επηρεάζεται από την εκτιμώμενη αντοχή συνάφειας πολλαπλώς (π.χ. μείωση του συντελεστή τριβής μεταξύ ράβδουσκυροδέματος, μείωση της συμβολής της επικάλυψης λογω απόσχισης από την διογκωτική φύση των προϊόντων σκουριάς, μείωση της συμβολής των συνδετήρων λόγω απώλειας διατομής τους, βλ. ειδικότερα [7,8]).

Στην επόμενη ενότητα, η μεθοδολογία εφαρμόζεται εισάγοντας δεδομένα (π.χ. γεωμετρία, υλικά, όπλιση και βαθμός διάβρωσης) από την πειραματική έρευνα των [6,17,18]. Οι προκύπτουσες αναλυτικές τέμνουσες (από την καμπτική απόκριση, την διατμητική αντοχή και την αντοχή της μάτισης) και μετακινήσεις συγκρίνονται με την πειραματική απόκριση των δοκιμίων υποστηλωμάτων (αδιάβρωτων και διαβρωμένων) και εξακριβώνεται ο βαθμός επάρκειας της προτεινόμενης μεθοδολογίας να εκτιμά τις επιπτώσεις της διάβρωσης τόσο στα ίδια τα μεγέθη των μηχανισμών συμπεριφοράς όσο και στην ανατροπή της ιεράρχησης αυτών. Έτσι, με δεδομένο πλέον τι διαθέτει το διαβρωμένο δομικό στοιχείο, μπορεί ο μηχανικός να προχωρήσει στους κατάλληλους τρόπους ανάκτησης σε επίπεδο επισκευής ή προσαύξησης σε επίπεδο ενίσχυσης.

4. ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η μελέτη περιλαμβάνει δυο σειρών δοκιμίων, μιας με εξαιρετικά χαμηλή θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, λείες ράβδους και ανεπαρκείς οπλισμούς διάτμησης (πρώτη σειρά, συμβολισμός LS) και μιας με κανονική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και νευροχάλυβα με σχεδιασμό με βάση τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (δεύτερη σειρά, συμβολισμός NS).

4.1 Ανάλυση στην αδιάβρωτη κατάσταση

Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι τιμές των τεμνουσών που προέκυψαν μέσω της ανάλυσης των βασικών μηχανισμών αστοχίας. Από τη σύγκριση των μεγεθών προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας που θα εκδηλωθεί πρώτος είναι η αστοχία της μάτισης προ της διαρροής.

| Μηχανισμός | Κάμψη (διαρροή) | Κάμψη (θραύση) | Διάτμηση | Μάτιση (προ διαρροής) | Αγκύρωση |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------|--------------------------|----------|
| Τέμνουσα V (kN) | 28.8 | 26.7 | 68.4 | <u>15.3</u> | 21.8 |
| | | | | | |

Πίνακας 1 Τιμές της τ
έμνουσας V όλων των μηχανισμών απόκρισης

Η μετακίνηση κορυφής στο στάδιο αστοχίας της μάτισης υπολογίζεται 6.41mm. Μορφώνεται το διάγραμμα καμπτικής τέμνουσας – στροφής για όλους τους μηχανισμούς αστοχίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.

Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζονται επίσης ι) η αναλυτική τιμή της διατμητικής αντοχής κατά FIB 24 και ΕΚΟΣ 2000 (η οποία υφίσταται απομείωση υπολογίζοντας τις τιμές της

τέμνουσας θεωρώντας μια υποθετική τιμή πλαστιμότητας) και ιι) η τέμνουσα αντοχής της μάτισης, καθώς και η πειραματική απόκριση. Παρατηρείται ότι η αστοχία του δοκιμίου δεν θα προκύψει λόγω διάτμησης ή κάμψης, αλλά θα επέλθει λόγω μάτισης προ της διαρροής. Επειδή η καμπτική τέμνουσα τέμνεται με την τέμνουσα μάτισης, αυτό είναι το σημείο κατά το οποίο βάσει της ανάλυσης αστοχεί το δοκίμιο. Η τέμνουσα στο σημείο είναι 15.33 kN και η αντίστοιχη στροφή 0.535%. Η τιμή αυτή προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά την τιμή αστοχίας του δοκιμίου κατά την εκτέλεση του πειράματος ($P_o = 16$ kN), καθώς και την αντίστοιχη στροφή του πειράματος. Πέραν αυτής της τιμής οι ολισθήσεις αυξάνουν και το αναλαμβανόμενο φορτίο μειώνεται.



Σχήμα 4. Διάγραμμα τέμνουσας - στροφής του αδιάβρωτου δοκιμίου LS-X0

4.2 Ανάλυση στην διαβρωμένη κατάσταση

Από τις πειραματικές μετρήσεις της επιρροής της διάβρωσης στους κύριους οπλισμούς μετράται η απώλεια επιφάνειας ΔΑ/Α και προκύπτει η διαβρωμένη διάμετρος D_{b,cor}. Κατά



Σχήμα 5. Διαγράμματα τέμνουσας - στροφής των διαβρωμένων δοκιμίων (α) LS-X6 και (β) LS-X8

την ανάλυση, υπολογίζεται ο βαθμός διάβρωσης, Χ, ο οποίος εκφράζεται ως το βάθος διείσδυσης της διάβρωσης, δηλαδή X=ΔDb/Db. Σημειώνεται ότι ο διατμητικός οπλισμός λαμβάνεται ως αδιάβρωτος. Από την ανάλυση της τέμνουσας απόκρισης προκύπτει ότι για όλα τα διαβρωμένα δοκίμια της πρώτης σειράς δοκιμίων (LS) ο μηγανισμός που θα προκληθεί πρώτος είναι η αστοχία της μάτισης προ της διαρροής. Αντίθετα, τα δοκίμια της δεύτερης σειράς (NS), μπόρεσαν να διατηρήσουν την μορφών ιεράρχηση των αστοχίας, εκδηλώνοντας αστοχία λόγω κάμψης.

Κατασκευάζονται τα διαγράμματα τέμνουσας - στροφής όπως συνέβη και στην αδιάβρωτη κατάσταση του δοκιμίου LS-X0. Στο δοκίμιο LS-X6 (Σχ. 5α) η αστοχία σηματοδοτείται από το σημείο τομής καμπτικής απόκρισης και τέμνουσας μάτισης, το οποίο αντιστοιχεί σε τέμνουσα 14.49kN και στροφή 0.57%. Πράγματι, και κατά την πειραματική απόκριση, οι τιμές αυτές ταυτίζονται αριθμητικά, αφού P=15.08kN και θ = 0.6%. Μέχρι αυτή την τιμή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, ενώ πέραν αυτής οι ολισθήσεις αυξάνουν σημαντικά και το αναλαμβανόμενο φορτίο μειώνεται. Αντίστοιχα, στο δοκίμιο LS-X8 (Σχ. 5β) το σημείο τομής καμπτικής απόκρισης και τέμνουσας αντοχής μάτισης αντιστοιχεί σε τέμνουσα 14.04 kN και στροφή 0.56%. Κατά την πειραματική απόκριση η τιμή της τέμνουσας αντοχής είναι αρκετά κοντά στην τιμή που μετρήθηκε ($P_o = 15.7$ kN), ενώ η στροφή προσδιορίζεται στο 0.75%. Συνεπώς, η ανάλυση οδηγεί σε σχετική υποεκτίμηση των μεγεθών.

Στο δοκίμιο LS-X12 (Σχ.6) η αστοχία θα συμβεί σε τέμνουσα 13.41 kN και στροφή 0.55%.



Σχήμα 6. Διάγραμμα τέμνουσας - στροφής του διαβρωμένου δοκιμίου LS-X12

Κατά την πειραματική απόκριση η αντοχή του δοκιμίου έλαβε την τιμή 15.9kN, ενώ η στροφή ήταν 0.75%. Παρατηρείται λοιπόν μια υποεκτίμηση των μεγεθών κατά την ανάλυση, όμως οι τιμές που προκύπτουν είναι λογικές και αναμενόμενες δεδομένης της αύξησης του βαθμού διάβρωσης. Μη αναμενόμενες είναι 01 τιμές της πειραματικής απόκρισης, όπως συνέβη και στο δοκίμιο LS-X8, αφού τόσο το LS-X8 όσο ειδικά το LS-X12 επέδειξαν μεγαλύτερη αντοχή από το LS-X6, με τιμές που προσεγγίζουν ακόμα και το αδιάβρωτο δοκίμιο.

Αναλύοντας τα δοκίμια κανονικής αντοχής, στο αδιάβρωτο δοκίμιο NS-X0 δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή τόσο κατά ΕΚΩΣ όσο και κατά FIB 24 ξεπερνά τις υπόλοιπες αντοχές κατά τουλάχιστον 80kN, στο Σχήμα 7 έχει απομονωθεί το διάγραμμα για λόγους ευκρίνειας τιμές έως και την τέμνουσα μάτισης, ενώ ως υπόμνημα απεικονίζεται το συνολικό διάγραμμα. Ως πειραματική συμπεριφορά λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών των δυο κατευθύνσεων φόρτισης, δεδομένης της απόκλισης μεταξύ αυτών. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η αναλυτική συμπεριφορά προσέγγισε με εξαιρετικά καλή ακρίβεια την πειραματική συμπεριφορά του θετικού κλάδου φόρτισης (καμπτική αντοχή πειραματικά 56.3kN σε στροφή 1.5% και αναλυτικά 56.4kN σε στροφή 1.93%) Σύμφωνα με την αποτίμηση μέσω της μεθοδολογίας, η τέμνουσα διαρροής είναι 52.34 kN σε στροφή 0.83%,



ενώ η πραγματική (μέσος όρος των δυο κατευθύνσεων) ήταν 46 kN σε στροφή 0.75%. Από την αναλυτική προσέγγιση, αστοχεί προκύπτει ότι στοιχείο το καμπτικά, χωρίς να έχει προηγηθεί αστοχία από διάτμηση ή μάτιση. Τα μεγέθη προκύπτουν κατά που την καμπτική αντοχή υπολογίζονται αναλυτικά ως στροφή 1.6% σε δύναμη 56.44 kN, ενώ τα αντίστοιγα πειραματικά αποτελέσματα είναι στροφή 1.5% και δύναμη 52 kN. Η προσέγγιση είναι αρκετά ικανοποιητική.

Όσον αφορά τα διαβρωμένα δοκίμια της κατηγορίας NS, στο δοκίμιο NS-X9 η μετακίνηση κορυφής στο στάδιο αστοχίας της μάτισης υπολογίζεται 18.46mm. Μορφώνεται

το διάγραμμα καμπτικής τέμνουσας – στροφής για όλους τους μηχανισμούς αστοχίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 8, και πάλι απομονώνοντας τους κλάδους έως και την τέμνουσα μάτισης λόγω της μεγάλης τιμής της τέμνουσας διατμητικής αντοχής κατά ΕΚΩΣ και κατά FIB 24. Είναι εμφανές ότι η αστοχία του δοκιμίου θα προκύψει λόγω κάμψης. Παρατηρείται ότι η αποτίμηση της συμπεριφοράς κατά την ανάλυση προσέγγισε ικανοποιητικά την

Σχήμα 8. Διαγράμματα τέμνουσας - στροφής του διαβρωμένου δοκιμίου NS-X9

πειραματική συμπεριφορά. Ειδικότερα, κατά την εκτέλεση του πειράματος η διαρροή συνέβη σε τέμνουσα 39 kN σε στροφή 0.87%, ενώ στην ανάλυση η διαρροή υπολογίστηκε ότι συμβαίνει σε τέμνουσα 47.55 kN σε στροφή 0.98%. Αντίστοιχα για την καμπτική αντοχή, στο πείραμα υπολογίζεται σε τέμνουσα 45.1 kN και στροφή 1.5%, με τις τιμές της ανάλυσης να είναι 51.1 kN και 1.54%. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι η προσέγγιση των τιμών είναι ικανοποιητική και η συμπεριφορά αποτιμήθηκε σε μεγάλο βαθμό, με μια μικρή υπερεκτίμηση των τιμών των καμπτικών τεμνουσών.

Τέλος, το δοκίμιο NS-X13 αναλύθηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η αστοχία του δοκιμίου θα προκύψει λόγω κάμψης. Κατά την εκτέλεση του πειράματος η διαρροή συνέβη σε τέμνουσα 38 kN σε στροφή 0.7%, ενώ στην ανάλυση η διαρροή υπολογίστηκε ότι συμβαίνει σε

Σχήμα 9. Διάγραμμα τέμνουσας - στροφής του διαβρωμένου δοκιμίου NS-X13

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

τέμνουσα 45.93 kN σε στροφή 1.05%. Αντίστοιχα κατά την καμπτική αντοχή, στο πείραμα υπολογίζεται σε τέμνουσα 42.4 kN και στροφή 1%, με τις τιμές της ανάλυσης να είναι 49.34 kN και 1.56% αντίστοιχα. Συνεπώς αναλυτικά γίνεται μια υπερεκτίμηση των τιμών, καθώς η πειραματική συμπεριφορά ιδιαίτερα κατά την αστοχία του δοκιμίου είναι χαμηλότερη. Πιθανό είναι και υπερεκτιμήθηκε συνάφεια κατά την ανάλυση (ως προς την πραγματική) ή να υπήρχε εντονότερη τοπική διάβρωση (a_{pit}) που να οδήγησε τοπική υπερφόρτιση των ράβδων.

Μέσω της ανάλυσης των πειραματικών αποτελεσμάτων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος που φέρουν ματίσεις στις κρίσιμες διατομές τους και της εφαρμογής της μεθοδολογίας αποτιμήθηκε σε μεγάλο βαθμό η μηχανική συμπεριφορά των στοιχείων. Κατά την ανάλυση, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων όλων των μηχανισμών και υπολογίστηκαν οι στροφές σε όλα τα στάδια συμπεριφοράς. Δόθηκε η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των τεμνουσών των μηχανισμών, εξάγοντας κατ' αυτόν τον τρόπο άμεσα συμπεράσματα για τον μηχανισμό αστοχίας που εκδηλώνεται πρώτος. Στην περίπτωση της πρώτης σειράς (LS), ο μηχανισμός που εκδηλώθηκε πρώτος ήταν σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία της μάτισης, αστοχία που μπορεί να επέλθει είτε πριν είτε μετά τη

διαρροή του οπλισμού. Σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία της μάτισης επήλθε προ της διαρροής των οπλισμών. Η αντοχή της μάτισης μειώνεται εξαιτίας της μείωσης της αντοχής συνάφειας λόγω αποφλοίωσης της επικάλυψης, καθώς μετά την αποφλοίωση την όποια αντοχή συνάφειας συντηρεί μόνο ο οπλισμός διάτμησης, εάν υπάρχει. Η προσέγγιση όλων των δοκιμίων ήταν πολύ ικανοποιητική, καθώς μέσω της μεθοδολογίας υπολογίστηκαν με μεγάλη ακρίβεια η μορφή αστοχίας, η πτώση της δυσκαμψίας, ενώ και το φορτίο αντοχής προσεγγίζεται πολύ ικανοποιητικά. Στη δεύτερη σειρά δοκιμίων (NS), ο μηγανισμός που εκδηλώθηκε πρώτος ήταν σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία λόγω κάμψης. Λόγω της καλύτερης ποιότητας υλικών, η μείωση της αντοχής της μάτισης δεν μπορεί ανατρέψει την ιεράργηση των μορφών αστογίας, ιδιαίτερα το στάδιο της διαρροής των οπλισμών, ωστόσο μετά τη διαρροή των οπλισμών και τη ρηγμάτωση της επικάλυψης η αντοχή συνάφειας σταδιακά μειώνεται, με μοναδικό εν ενεργεία μηχανισμό αυτόν του οπλισμού διάτμησης, οδηγώντας σε σημαντικές ολισθήσεις των ράβδων. Η προσέγγιση όλων των δοκιμίων ήταν πολύ ικανοποιητική, τόσο στο στάδιο της διαρροής όσο και στο στάδιο της θραύσης, καθώς μέσω της μεθοδολογίας υπολογίστηκαν με μεγάλη ακρίβεια η μορφή αστοχίας, η πτώση της δυσκαμψίας, ενώ και το φορτίο αντοχής προσεγγίζεται πολύ ικανοποιητικά, δεδομένων και των ασαφειών που προκύπτουν από τον τρόπο που οι διάφοροι ερευνητές ποσοτικοποιούν τη διάβρωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Drakakaki A. and Apostolopoulos C.A. (2016). Mechanical performance of a reinforced concrete column under seismic loads, before and after corrosion influence. 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, Chania, Crete

[2] Tastani S.P., Pantazopoulou S. (2002). "Experimental and analytical Investigation of corroded bar anchorages." invited paper in "Befestigungstechnik" Volume Compiled by the Institut für Werks to feim Bauwesen, Universität Stuttgart, in honor of Prof. R. Eligehausen, pp. 281-292.

[3] S.N. Bousias, T.C. Triantafillou, M.N. Fardis, L. Spathis, and B.A. O'Regan, "Fiber-Reinforced Polymer Retrofitting of Rectangular Reinforced Concrete Columns with or without Corrosion", Structural Journal, ACI, January 2004, Volume 101, Issue 4

[4] Yu-Chen Ou, Hou-Heng Chen, "Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Beams with Corroded Transverse Steel Reinforcement", Journal of Structural Engineering, ASCE, April 2014, Volume 140, Issue 9

[5] Aquino W., Hawkins N. (2007) Seismic retrofitting of corroded reinforced concrete columns using carbon composites. Structural Journal ACI, January 2007, Vol. 104, Issue 3

[6] Göksu Ç. (2012). Seismic behaviour of RC columns with corroded plain and deformed reinforcing bars. PhD thesis, Dept. Civil Engineering, Istanbul Technical University, Turkey, 231pp.

[7] Ταστάνη Π.Σ., Πανταζοπούλου Ι.Σ. (2007). Αποτίμηση και αναβάθμιση διαβρωμένων κατασκευών Ο.Σ. με Σύνθετα Υλικά Ι.Ο.Π.. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 1-2.

[8] Ταστάνη Σ.Π., Δολιανίτου Σ., Πανταζοπούλου Στ. (2009). "Πρότυπη Εφαρμογή Μεθοδολογίας Αποτίμησης / Ενίσχυσης Διαβρωμένων Κατασκευών Ο.Σ.", πρακτικά 16ουΣυνέδριου Σκυροδέματος, Πάφος, 21-23 Οκτωβρίου, 2009, Κύπρος.

[9] Αλυσανδράτου Γ. (2018). Εφαρμογή Μεθοδολογίας Αποτίμησης Διαβρωμένων Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος. Διπλωματική Εργασία, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ (Επιβλέπουσα: Ταστάνη Σουσάνα, Επ. Καθηγήτρια).

[10] Κυριάκου Αναστασία – Δήμητρα (2019). Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Διαβρωμένων Ματίσεων Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος. Διπλωματική Εργασία, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ (Επιβλέπουσα: Ταστάνη Σουσάνα, Επ. Καθηγήτρια).

[11] Tastani S.P., Brokalaki E. and Pantazopoulou S.J. (2015). "State of Bond along Lap-

Splices", ASCE J. of Structural Engineering, 141(10): 04015007.

[12] Mangat P. S. and Elgarf M. S. (1998). Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams. Materials and Structures. Vol. 32, March 1999, pp. 89-97

[13] Tahershamsi M., Zandi K., Lundgren K., Plos M. (2014). Anchorage of naturally corroded bars in reinforced concrete structures. Magazine of concrete research, V. 66, Issue 14, pp. 729-744.

[14] Tahershamsi M., Fernandez I., Lundgren K., Zandi K. (2016) Investigating correlations between crack width, corrosion level and anchorage capacity. Structure and Infrastructure engineering. V.13, No. 10, pp. 1294-1307.

[15] ACI Committee 222 (2001). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01). American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 41pp.

[16] Pantazopoulou S.J. et al. (2017). The performance of corroded lap splices in reinforced concrete beams, Corrosion Reviews, 0(0), pp. -. Retrieved 27 Sep. 2018, from doi:10.1515/corrrev-2017-0086.

[17] Caglar Goksu, Pinar Inci and Alper Ilki (2015). Effect of Corrosion on Bond Mechanism between Extremely Low-Strength Concrete and Plain Reinforcing Bars. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 30(3): 04015055

[18] Caglar Goksu and Alper Ilki Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Corroded Deformed Reinforcing Bars. ACI Structural Journal, V. 113, No. 5.

[19] ΕΚΟΣ (2000). "Ελληνικός κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος", ΟΑΣΠ-ΣΠΜΕ, Απρίλιος 2001.

[20] FIB Bulletin No. 24 (2003). "Seismic assessment and retrofit of r.c. buildings". Technical report prepared by T.G. 7.1, International Federation for Structural Concrete (fib).

[21] Moehle J., Elwood K. and Sezen H. (2002). Gravity load collapse of building frames during earthquakes. "Proceedings of S. Uzumeri Symposium on Behavior and design of concrete structures for seismic performance", ACI SP-197, pp. 215-238.

[22] Megalooikonomou K., Tastani S.P., Pantazopoulou S.J. (2018). "Effect of yield penetration on column plastic hinge length", Elsevier Engineering Structures, Vol. 156, pp: 161-174.