

Αντοχή Συνδέσεων Πλάκας-Υποστυλώματος Υπό Σεισμική Καταπόνηση Strength of Flat Slab-Column Connections in Cyclic Loading

Ευτυχία ΛΙΟΣΑΤΟΥ¹, Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ²

Λέξεις κλειδιά: Μυκητοειδείς πλάκες, Διάτρηση, Σεισμικός σχεδιασμός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Ποσοτικοποιείται η απομείωση της αντοχής συνδέσεων πλακών με το υποστύλωμα σε έκκεντρη διάτρηση υπό συνδυασμό κατακόρυφων φορτίων στην πλάκα και ανακυκλιζόμενης καμπτικής ροπής στο υποστύλωμα. Δημιουργήθηκε βάση πειραματικών δεδομένων με όλα τα στοιχεία που ενδέχεται να επηρεάζουν την συμπεριφορά συνδέσεων μυκητοειδών πλακών-υποστυλωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση του υποστυλώματος. Η απομείωση της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση υπό μονότονη φόρτιση κατά Ευρωκώδικα 2 δίνεται με απλά γραμμικά προσομοιώματα, συναρτήσει του επιβαλλόμενου δείκτη πλαστιμότητας ή (κατά προτίμηση από πλευράς ακρίβειας) της επιβαλλόμενης γωνίας στροφής χορδής της πλάκας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα προσομοιώματα δείχνουν μεγαλύτερη πτώση της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση με την ανακύκλιση σε πλάκες με οπλισμό διάτρησης, απ'ότι χωρίς αυτόν.

ABSTRACT : A model is developed for the degradation of the strength of slab-column connections in eccentric punching shear due to cycling of the moment transferred from the column to the slab under constant gravity loading. The model is developed by statistical processing of cyclic test results from the literature. The models show that strength in eccentric punching shear as given by Eurocode 2 for monotonic loading decreases linearly with increasing cyclic chord rotation or chord rotation ductility factor of the slab. The cyclic strength degradation is larger if there is shear reinforcement in the slab than when there is not.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλάκες χωρίς δοκούς δεν καλύπτονται επαρκώς από τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, περιλαμβανομένου του Ευρωκώδικα 8. Ο λόγος είναι η ανεπάρκεια των γνώσεων για τη συμπεριφορά της σύνδεσης με το υποστύλωμα υπό δράσεις που εισάγουν ανακυκλιζόμενη έκκεντρη διάτρηση στην

¹ Υποψ. Διδάκτορας, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, email: liosatou@upatras.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, email: fardis@upatras.gr

πλάκα. Οι πλάκες χωρίς δοκούς είναι τρωτές σε ψαθυρή αστοχία λόγω διάτρησης γύρω από την κεφαλή των υποστυλωμάτων. Ο Ευρωκώδικας 2 έχει υιοθετήσει προσομοίωμα για τη μεταφορά καμπτικών ροπών υπό μονοτονική φόρτιση από την πλάκα στο υποστύλωμα και αντίστροφα, σύμφωνα με το οποίο η κάμψη μεταβιβάζεται στην πλάκα μέσω έκκεντρης τέμνουσας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκε βάση πειραματικών δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. αναφορές), προκειμένου να αναπτυχθεί ένα απλό προσομοίωμα υπολογισμού της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση πλακών χωρίς δοκούς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ως επέκταση του Ευρωκώδικα 2. Περιλαμβάνει 48 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης του υποστυλώματος και της σύνδεσης, και 14 μονοτονικά πειράματα.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ

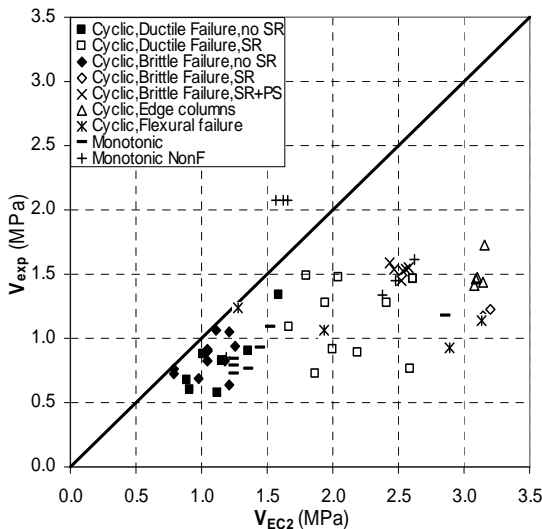
Το σημείο αστοχίας των δοκιμών εντοπίστηκε στα διαγράμματα επιβαλλόμενης ροπής - γωνίας στροφής της σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος. Η διάκριση των πειραμάτων έγινε με βάση τον τρόπο αστοχίας. Θεωρήθηκε ότι δοκίμια που αστόχησαν με απότομη πτώση της τιμής της τέμνουσας του υποστυλώματος λόγω αστοχίας της σύνδεσης με την πλάκα, αστόχησαν καθαρά (και ψαθυρά) λόγω διάτρησης (Brittle failure). Ως ροπή αστοχίας στη σύνδεση λήφθηκε η τιμή που προκύπτει ακριβώς πριν την πτώση της επιβαλλόμενης δύναμης.

Δοκίμια που παρουσίασαν ομαλή πτώση της επιβαλλόμενης δύναμης πριν αστοχήσουν λόγω διάτρησης διαφοροποιούνται από τα προηγούμενα στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Ductile failure). Ως ροπή αστοχίας λήφθηκε το 80% της μέγιστης ροπής που άντεξε η σύνδεση. Κάποιες πλάκες που δεν αστόχησαν λόγω διάτρησης αλλά καμπτικά αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία (Flexural failure). Τέλος, διαφορετική κατηγορία αποτελούν τα πειράματα υπό μονοτονική φόρτιση του υποστυλώματος, ορισμένα εκ των οποίων δεν αστόχησαν στο εύρος της επιβαλλόμενης ροπής (Non-failure).

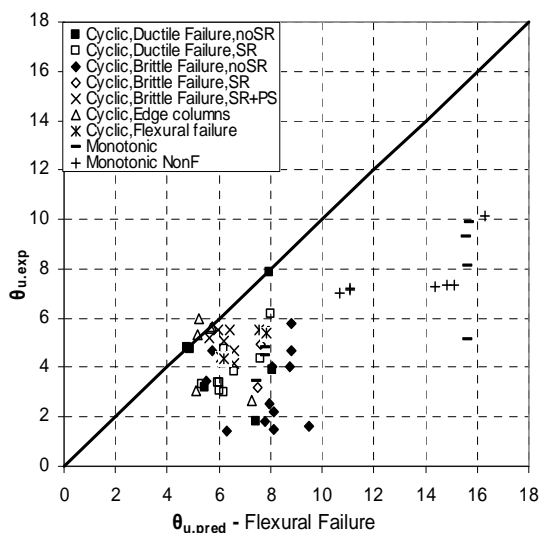
Στο Σχήμα 1 συγκρίνεται η πειραματική αντοχή σε διάτρηση με τη θεωρητική κατά Ευρωκώδικα 2 (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής ασφαλείας 1.5 που ενυπάρχει στο προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 2). Το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 2 φαίνεται να υπερεκτιμά την αντοχή για μονοτονική φόρτιση του υποστυλώματος. Όμως στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι να αμφισβητήσει το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα για έκκεντρη διάτρηση υπό μονοτονική φόρτιση, και μάλιστα βάσει των λίγων δοκιμών της βάσης δεδομένων που αστόχησαν μονοτονικά.

Στο Σχήμα 2 συγκρίνονται η πειραματική τιμή της γωνίας στροφής χορδής της πλάκας κατά την αστοχία της σύνδεσης, με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή για αστοχία της πλάκας λόγω κάμψης (δηλαδή, αν η καμπτική ροπή επιβάλλεται στην πλάκα ομοιόμορφα κατά μήκος μιας γραμμής, αντί σημειακά από το υποστύλωμα). Η πειραματική τιμή προέκυψε από τη συνολική γωνιακή

παραμόρφωση του συστήματος πλάκα-υποστώλωμα, αφού αφαιρέθηκε η συμβολή της παραμόρφωσης του υποστυλώματος, όπως αυτή εκτιμήθηκε θεωρητικά από την καμπτική ένταση του υποστυλώματος και την ενεργό ελαστική δυσκαμψία του. Η θεωρητική τιμή της γωνίας στροφής της πλάκας στην καμπτική αστοχία υπολογίστηκε σύμφωνα με τις σχέσεις των (Μπισκίνης & Φαρδής 2006, Μπισκίνης 2007, ΚΑΝΕΠΕ). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η αστοχία των πλακών λόγω έκκεντρης διάτρησης συμβαίνει σε γωνίες στροφής χορδής μικρότερες απ'αυτές που προκαλούν καμπτική αστοχία της πλάκας.



Σχήμα 1. Σύγκριση πειραματικής με θεωρητική τιμή της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση κατά EC2 (χωρίς συντελεστή ασφαλείας).



Σχήμα 2. Σύγκριση πειραματικής τιμής της επιβαλλόμενης γωνίας στροφής στην πλάκα με τη θεωρητική τιμή όπου αστοχεί η πλάκα λόγω κάμψης.

ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΛΟΓΩ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΗΣ

Αναπτύχθηκε προσομοίωμα απομείωσης της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση λόγω ανακύκλισης της εκκεντρότητας της δύναμης με τη βοήθεια 38 πειραμάτων της βάσης. Δεν ελήφθησαν υπόψη τα πειράματα υπό μονοτονική φόρτιση του υποστυλώματος, ούτε τα πειράματα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση όπου η πλάκα αστόχησε καμπτικά. Τέλος δεν ελήφθησαν υπόψη πειράματα με προένταση στην πλάκα.

Απομείωση της αντοχής συναρτίζει της γωνίας στροφής χορδής

Όσο μεγαλύτερη είναι η επιβαλλόμενη γωνία στροφής χορδής, θ_u , τόσο

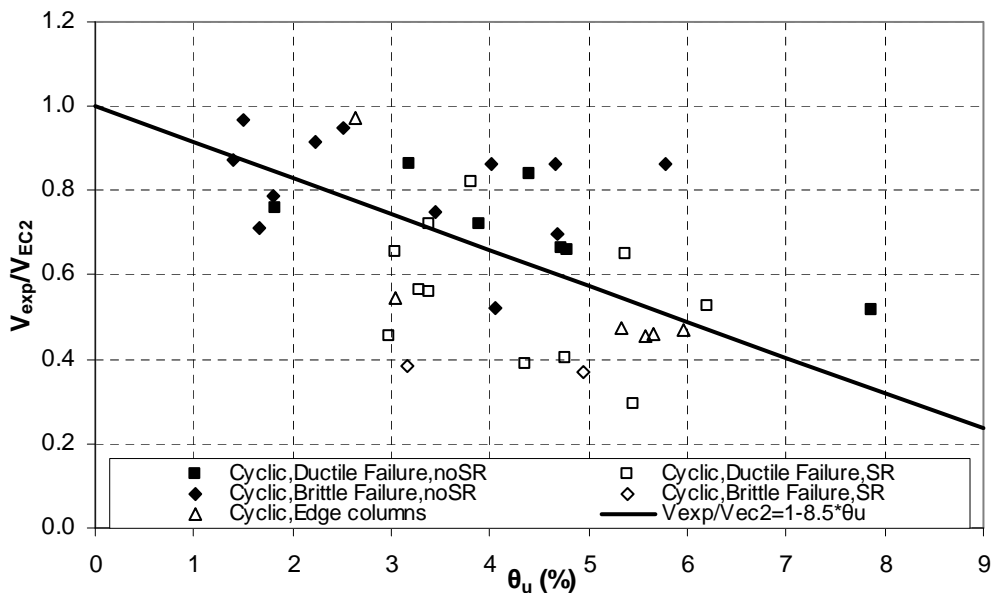
μεγαλύτερη είναι και η μείωση της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση στα δοκίμια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Η Εξ. (1) εκφράζει τη διάμεσο ευθεία των τιμών του λόγου πειραματικής αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση προς θεωρητική κατά Ευρωκώδικα 2 (χωρίς το συντελεστή ασφαλείας 1.5 που ενυπάρχει στο προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 2). Η Εξ. (2) είναι το γραμμικό προσομοίωμα, με θ_u σε rad. Η διάμεσος των λόγων της πειραματικής προς την προτεινόμενη θεωρητική αντοχή είναι 1.00, με συντελεστή μεταβλητότητας 27.5% για το σύνολο των 38 δοκιμίων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

$$\frac{V_{exp}}{V_{EC2}} = 1 - 8.5\theta_u \quad (1)$$

$$V_{pred} = (1 - 8.5\theta_u)V_{EC2} \quad (2)$$

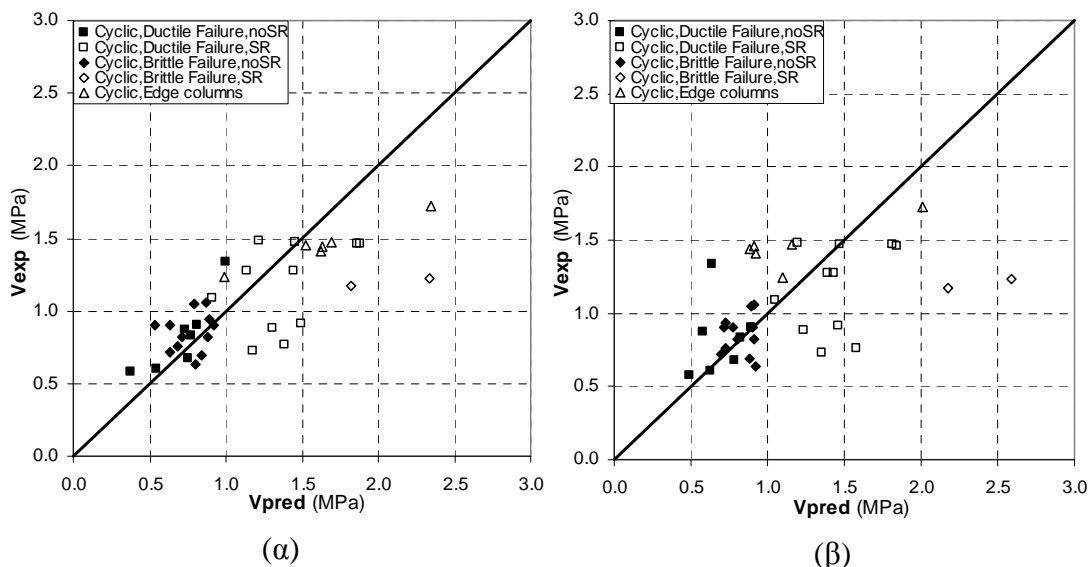
Στο Σχήμα 4(α) συγκρίνεται η πειραματική με την προτεινόμενη θεωρητική τιμή. Ένα μέρος της διασποράς οφείλεται στον κατ' εκτίμηση εντοπισμό του σημείου αστοχίας και στη θεωρητική εκτίμηση της συμβολής του υποστρώματος στην πειραματική γωνιακή παραμόρφωση του συστήματος πλάκα-υποστύλωμα, από την καμπτική ένταση του υποστρώματος και την ενεργό ελαστική δυσκαμψία του.

Η διαφοροποίηση των τιμών των δοκιμίων με ή χωρίς οπλισμό διάτρησης υποδεικνύει την ανάγκη δημιουργίας διαφορετικών προσομοιωμάτων για δοκίμια με ή χωρίς οπλισμό διάτρησης, όπως γίνεται αργότερα στην εργασία αυτή.



Σχήμα 3. Λόγος πειραματικής προς θεωρητική αντοχή σε έκκεντρη διάτρηση συναρτήσει της επιβαλλόμενης στην πλάκα γωνίας στροφής χορδής και διάμεσος των

τιμών.



Σχήμα 4. Σύγκριση πειραματικής αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση με τιμή που προτείνεται συναρτήσει (α) γωνίας στροφής χορδής (β) δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής

Απομείωση της αντοχής συναρτήσει της πλαστιμότητας

Ο λόγος της πειραματικής αντοχής προς την αντοχή σε έκκεντρη διάτρηση κατά Ευρωκώδικα 2 απεικονίζεται στο Σχήμα 5 συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής των δοκιμίων της βάσης δεδομένων. Ο δείκτης πλαστιμότητας γωνιών στροφής ορίζεται ως ο λόγος της επιβαλλόμενης γωνίας στροφής χορδής στην πλάκα προς την αντίστοιχη γωνία στη διαρροή της πλάκας, όπως αυτή υπολογίζεται με βάση το προσομοίωμα (Μπισκίνης & Φαρδής 2006, Μπισκίνης 2007, ΚΑΝΕΠΕ).

Για να ποσοτικοποιηθεί η απομείωση της αντοχής διάτρησης συναρτήσει της πλαστιμότητας δίνεται η Εξ. (3) ως η διάμεσος των τιμών του λόγου πειραματικής προς θεωρητική αντοχή σε έκκεντρη διάτρηση.

$$\frac{V_{exp}}{V_{EC2}} = 1 - 0.135\mu_g \quad (3)$$

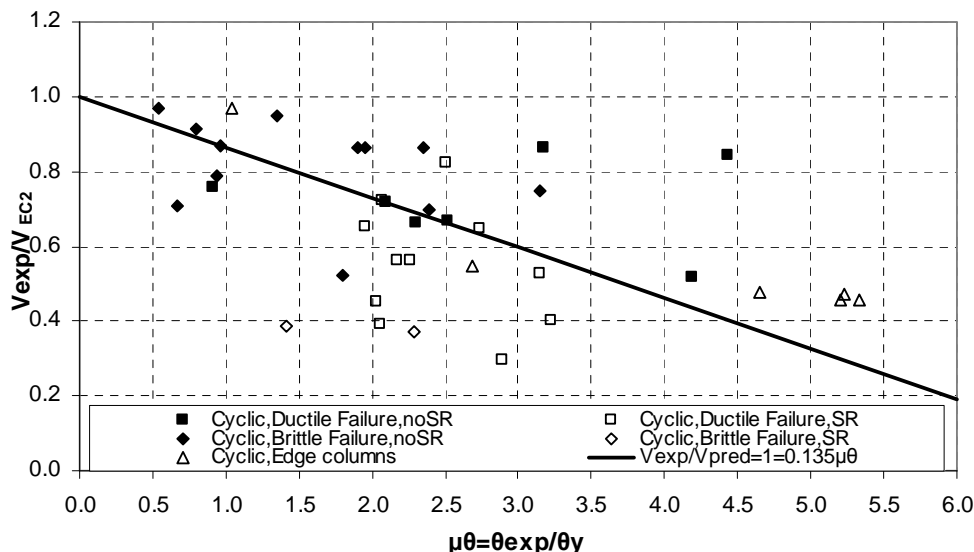
Η Εξ. (4) αποτελεί το προτεινόμενο προσομοίωμα.

$$V_{pred} = (1 - 0.135\mu_g)V_{EC2} \quad (4)$$

Η διάμεσος του λόγου πειραματικής προς θεωρητική αντοχή είναι 1.005, με

συντελεστή μεταβλητότητας 34.4%, για το σύνολο των 38 δοκιμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Ο λόγος πειραματικής προς προτεινόμενη θεωρητική αντοχή παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά συναρτήσει της πλαστιμότητας παρά συναρτήσει της γωνίας στροφής χορδής. Συνεπώς, το προσομοίωμα συναρτήσει της γωνίας στροφής χορδής κρίνεται πιο αξιόπιστο.



Σχήμα 5. Λόγος πειραματικής προς θεωρητική αντοχή σε έκκεντρη διάτρηση κατά EC2 συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής στην πλάκα και διάμεσος των τιμών.

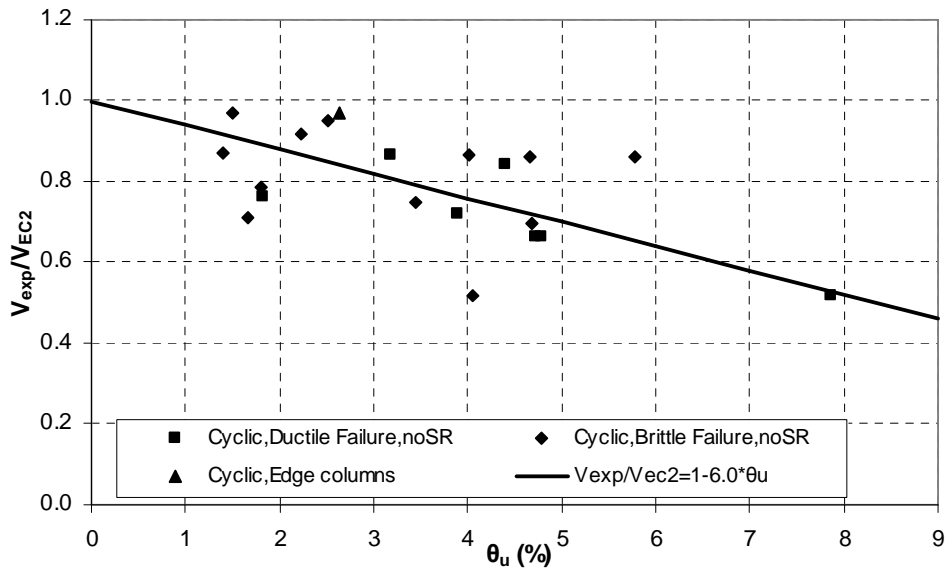
ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΧΩΡΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Η συστηματική διαφοροποίηση των δοκιμών με οπλισμό διάτρησης από αυτά χωρίς οπλισμό στα Σχήματα 3 και 5 υποδεικνύει την ανάγκη διαφορετικών προσομοιωμάτων για τους δύο αυτούς τύπους δοκιμών. Η βάση πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει 20 δοκίμια πλακών χωρίς οπλισμό διάτρησης. Λόγω του μικρού πλήθους του δείγματος ο μέσος όρος είναι πιο αντιπροσωπευτικός της διαμέσου. Η στατιστική επεξεργασία οδηγεί στην Εξ. (5), η οποία αποτελεί το προτεινόμενο προσομοίωμα (με θ_u σε rad).

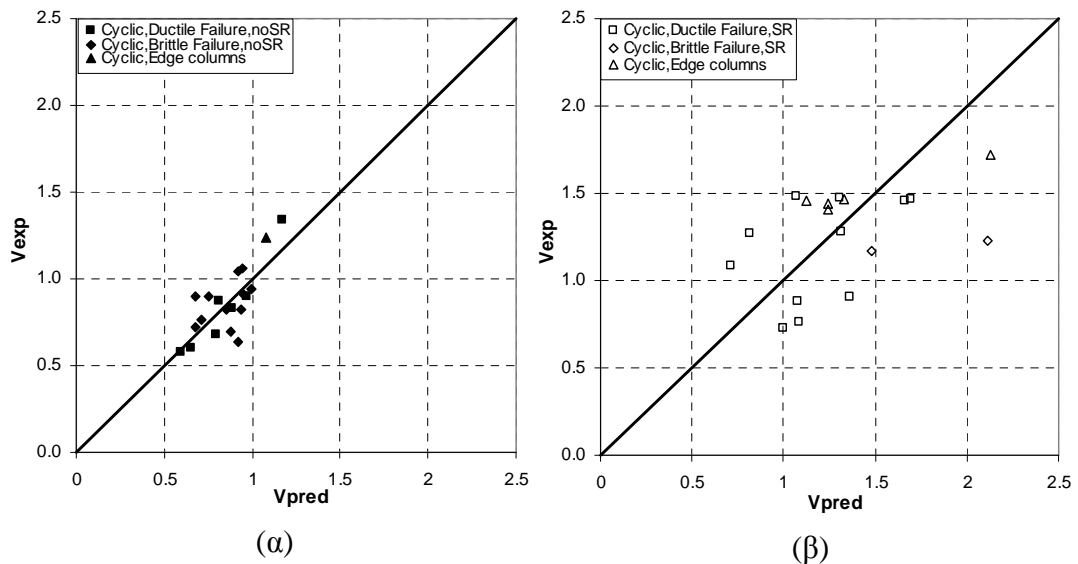
$$V_{pred} = (1 - 6.0\theta_u) V_{EC2} \quad (5)$$

Ο μέσος όρος του λόγου πειραματικής προς προτεινόμενη αντοχή για το σύνολο των 20 δοκιμών χωρίς οπλισμό διάτρησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι

1.00, με συντελεστή μεταβλητότητας 15.5%, πολύ μικρότερο απ' ό τι της Εξ. (2). Στο Σχήμα 7(α) συγκρίνεται η πειραματική με την προτεινόμενη θεωρητική τιμή.



Σχήμα 6. Λόγος πειραματικής προς θεωρητική αντοχή σε έκκεντρα διάτρηση συναρτήσει της επιβαλλόμενης γωνίας στροφής χορδής γωνιών στροφής χορδής στην πλάκα και μέσος όρος των τιμών για δοκίμια χωρίς οπλισμό διάτρησης.



Σχήμα 7. Σύγκριση πειραματικής με την προτεινόμενη τιμή αντοχής σε έκκεντρα

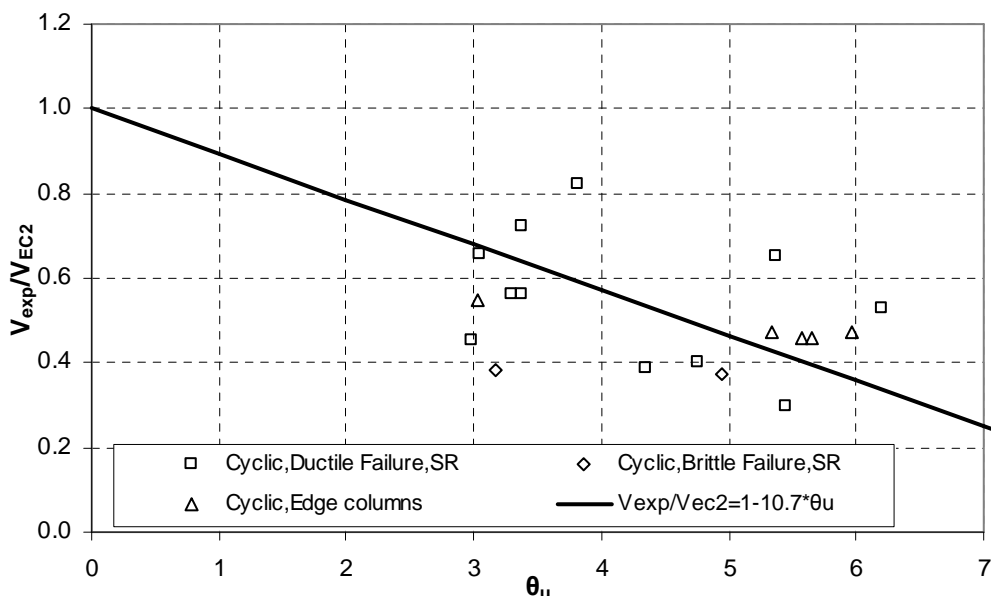
διάτρηση για πειράματα (α) χωρίς οπλισμό διάτρησης (β) με οπλισμό διάτρησης

ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Η βάση πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει 18 πειράματα με οπλισμό διάτρησης στην πλάκα. Η στατιστική επεξεργασία οδηγεί στην Εξ. (6), η οποία αποτελεί το προτεινόμενο προσομοίωμα (με θ_u σε rad).

$$V_{pred} = (1 - 10.7\theta_u)V_{EC2} \quad (6)$$

Για το σύνολο των 18 δοκιμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση χωρίς οπλισμό διάτρησης ο μέσος όρος του λόγου πειραματικής προς προτεινόμενη θεωρητική αντοχή είναι 1.005, με συντελεστή μεταβλητότητας 29.7%. Στο Σχήμα 7(β) συγκρίνεται η πειραματική με την προτεινόμενη θεωρητική τιμή.



Σχήμα 8. Λόγος πειραματικής προς θεωρητική αντοχή σε έκκεντρη διάτρηση συναρτήσει της επιβαλλόμενης γωνίας στρώσης χορδής στην πλάκα και μέσος όρος των τιμών, για δοκίμια με οπλισμό διάτρησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση πειραματικά αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία αναπτύχθηκαν προσομοιώματα για τη μείωση της αντοχής σε έκκεντρη διάτρηση λόγω

ανακύκλισης, σε σύγκριση με αυτήν που προβλέπει ο EC2 λαμβάνοντας υπόψη την εκκεντρότητα της τέμνουσας που προκαλεί η ροπή που επιβάλλεται από την πλάκα στο υποστύλωμα. Η ανακύκλιση φαίνεται ότι προκαλεί σημαντικά μεγαλύτερη μείωση της αντοχής σε διάτρηση σε πλάκες με οπλισμό διάτρησης απ'ότι σε πλάκες χωρίς τέτοιο οπλισμό. Έτσι αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά προσομοιώματα, που δίνονται από τις Εξ. (5) και (6), αντίστοιχα, με την επιφύλαξη των πολύ λίγων πειραματικών δεδομένων που υποστηρίζουν κάθε μία από τις σχέσεις αυτές.

Επισημαίνεται ότι η ανηγμένη στο ύψος ορόφου σχετική μετακίνηση ορόφων είναι ίση με το άθροισμα της γωνίας στροφής χορδής της πλάκας και αυτής του υποστυλώματος (ή των κατακόρυφων στοιχείων γενικότερα). Στο άθροισμα αυτό κυριαρχεί η γωνία στροφής χορδής της πλάκας, που είναι πολύ πιο εύκαμπτη. Τα Σχήματα 3, 6 και 8 υποδεικνύουν ότι για τις τιμές σχετικής μετακίνησης ορόφων που είναι ανεκτές σε κτίρια κατά το σεισμικό σχεδιασμό, δεν αναμένεται πολύ μεγάλη μείωση της αντοχής σε διάτρηση της πλάκας λόγω ανακύκλισης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παραπάνω έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το 7^ο Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Κοινότητας [FP7/2007-2013], σύμβαση υπ. αριθμ. 227887.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Broms C.E., "Flat plates in seismic areas: comparison of shear reinforcement systems", ACI Structural Journal , V.104, No6 (2007), pp: 712-721

CEN (2004) European Standard EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels

Emam M, Marzouk H. And Hilal M. S., "Seismic response of slab-column connections constructed with high-strength concrete", ACI Structural Journal; Vol.94, No.2 (1997), pp:197-205

Farhey D.N., Adin M.A., Yankelevsky D.Z., "RC flat slab-column subassemblages under lateral loading", ASCE Journal of Structural Engineering, V.119, No.6 .(1993), pp:1903-1916

Gayed R.B., Ghali A., "Seismic resistant joints of interior columns with prestressed slabs", ACI Structural Journal, V.103, No.5 (2006), pp:710-719

Hawkins W.A., Mitchell D., and Hanna S.N., "The effects of shear reinforcement on the reversed cyclic loading behavior of flat plate structures",

Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.2 (1975), pp:572-582

Hwang S. J., Moehle J. P., “Vertical and lateral load tests of nine-panel flat-plate frame”. ACI Structural Journal; Vol.97, No.1 (2000), pp: 193-203

Islam S., Park R., “Tests on slab-column connections with shear and unbalanced flexure”. ASCE Journal of Structural Division; Vol.102, No.3 (1976), pp: 549-568

Morrison D.G., Hirasawa I., and Sozen M.A., “Lateral-load tests of R/C slab-column connections”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.109, No.11 (1984), pp:2698-2713

Ritchie M., Ghali A., “Seismic resistant connections of edge columns with prestressed slabs”, ACI Structural Journal, Vol.102, No.2 (2005), pp:314-323

Ritchie M., Ghali A., Dilger W., Gayed R.B., “Unbalanced moment resistance by shear in slab-column connections: Experimental assessment”, ACI Structural Journal, Vol.103, No.1 (2006), pp:74-83

Robertson I. N., Kawai T., Lee J., Enomoto B., “Cyclic testing of slab-column connections with shear reinforcement”. ACI Structural Journal; Vol.99, No.5 (2002), pp: 605-613

Robertson I., Johnson G., “Cyclic lateral loading of Nonductile slab-column connections”, ACI Structural Journal, Vol.103, No.3 (2006), pp:356-364

Stein T., Ghali A., Dilger W., “Distinction between punching and flexural failure modes of flat plates”, ACI Structural Journal, Vol.104, No.3 (2007), pp:357-369

Tian Y., Jirsa J., Bayrak O., Widiyanto and Argudo J., “Behavior of slab-column connections of existing flat-plate structures”, ACI Structural Journal, Vol.105, No.5 (2008), pp:561-569

Wey E., Durrani A., “Seismic response of interior slab-column connections with shear capitals”, ACI Structural Journal, Vol.89, No.6 (1992), pp:682-691

ΚΑΝΕΠΕ, Κανονισμός Επεμβάσεων, ΟΑΣΠ, 2006.

Μπισκίνης Δ.Ε., Φαρδής Μ.Ν., “Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών ΟΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, συμπεριλαμβανομένων ενισχυμένων μελών”, 15^ο συνέδριο σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 2006.

Μπισκίνης Δ.Ε., “Αντοχή και Ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος, με ή χωρίς ενίσχυση”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, Πάτρα, 2007.