

Ενίσχυση Υφιστάμενων Πλαισίων με Εμφάνωση από Ο.Σ.: Αντοχή, Δυσκαμψία και Ικανότητα Παραμόρφωσης

Retrofitting of Existing Frames by Infilling with RC: Strength, Stiffness and Cyclic Deformation Capacity

Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ¹, Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ², Απόστολος ΨΑΡΟΣ-ΑΝΔΡΙΟΠΟΥΛΟΣ³

Λέξεις κλειδιά: τοιχώματα ΟΣ, σεισμική ενίσχυση, διατμητική αντοχή, διατμητική ολίσθηση

Keywords: RC walls, seismic retrofitting, shear resistance, shear sliding

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Κατά την σεισμική ενίσχυση κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ), μπορεί να γίνει μετατροπή υφιστάμενων πλαισίων σε τοίχωμα ΟΣ, γεμίζοντας το χώρο μεταξύ των μελών του πλαισίου με ΟΣ, με πάχος όχι μεγαλύτερο από το πλάτος τους. Η συμπεριφορά του προκύπτοντος τοιχώματος σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση εξαρτάται από τη σύνδεση μεταξύ νέου ΟΣ και παλαιών μελών. Η παρούσα εργασία αξιοποιεί τα αποτελέσματα από 56 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε τέτοιου τύπου σύνθετα τοιχώματα για να εκφράσει τις ιδιότητές τους σε σχέση με τη γεωμετρία, τον οπλισμό και τη σύνδεση. Οι ιδιότητες που εξετάζονται είναι: α) η ροπή διαρροής στη βάση του ορόφου, β) η επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή. γ) η παραμόρφωση καμπτικής αστοχίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, δ) η διατμητική αντοχή σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, συμπεριλαμβανομένης και της αστοχίας σε διατμητική ολίσθηση. Ξεχωριστά προσομοιώματα δίδονται για «κοντά» τοιχώματα με διατμητική αστοχία και για την περίπτωση διατμητικής αστοχίας στην κορυφή των υποστυλωμάτων.

ABSTRACT: In seismic retrofitting of concrete buildings, frame bays are converted into reinforced concrete (RC) walls by infilling the space between the frame members with RC of a thickness of not more than their width. The cyclic behavior of the resulting wall depends on the connection between the RC infill and the surrounding RC members. The paper uses the results from 56 cyclic tests on such composite walls to express their properties in terms of the geometry, the reinforcement and the connection. Properties addressed are: a) the yield moment at the story base; b) the secant-to-yield-point stiffness; c) the deflection at flexural

¹Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Πανεπιστήμιο Πατρών / Ακαδημαϊκός Υπότροφος, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών ΤΕ, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, email: dbisk@tee.gr

²Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Παν/μιο Πατρών, email: fardis@upatras.gr

³Διδακτορικός Φοιτητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Columbia University in the City of New York, email: a.pсарos@columbia.edu

failure under cyclic loading; d) the cyclic shear resistance, including a sliding shear failure mode. Separate models are given for squat walls failing in shear and for those where the top of the column shears-off.

ΣΥΝΔΕΣΗ ΝΕΟΥ ΚΟΡΜΟΥ ΜΕ ΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΜΕΛΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Η βάση πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει 56 δοκίμια τοιχωμάτων που προέκυψαν με εμφάνιση πλαισίου με ΟΣ, τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία ώστε να συνταχθούν κανόνες για τον υπολογισμό βασικών ιδιοτήτων του τοιχώματος. Εξετάζονται επίσης δοκιμές σε 13 μονολιθικά δοκίμια για σύγκριση (δοκίμια αναφοράς). Τα περισσότερα δοκίμια ήταν ενός ορόφου, ορισμένα είχαν δύο ή τρεις ορόφους. Ο χαμηλός λόγος διάτμησης της πλειοψηφίας των δοκιμών ευνοούσε τη διατμητική συμπεριφορά και αστοχία. Με εξαίρεση τα τρία δοκίμια από τους Strepelias et al (2013), σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το φάνωμα με ΟΣ ήταν πιο λεπτό από τα μέλη του πλαισίου, επιβαρύνοντας περαιτέρω τη διατμητική αντοχή. Ο τρόπος και οι λεπτομέρειες σύνδεσης του νέου κορμού με τα μέλη του περιβάλλοντος πλαισίου επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του σύνθετου τοιχώματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ποσοτικοποίηση των ιδιοτήτων του. Όσο πιο κοντινή σε μονολιθική η σύνδεση, τόσο καλύτερος και ευκολότερος είναι ο υπολογισμός αυτών των ιδιοτήτων επεκτείνοντας / τροποποιώντας τους κανόνες που ισχύουν για τα μονολιθικά τοιχώματα ΟΣ. Δέκα διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης εντοπίστηκαν στα 56 πειράματα της βάσης:

#0 Μονολιθικό τοίχωμα (δοκίμιο αναφοράς, για σύγκριση): 13 δοκιμές.

#1: Νέος κορμός συνδεδεμένος μέσω μηχανικών αγκυριών μόνο με τα οριζόντια μέλη: 2 δοκιμές.

#2: Όπως στο #1, αλλά συνδεδεμένος με όλα τα υφιστάμενα μέλη του πλαισίου: 5 δοκιμές.

#3: Όπως στο #1, αλλά με «χημικά» αγκύρια πακτωμένα με εποξειδική ρητίνη: 3 δοκιμές.

#4: Όπως στο #2, αλλά με «χημικά» αγκύρια (η πιο αποτελεσματική σύνδεση): 25 δοκιμές.

#5: Δέσμες ράβδων στον κορμό (διαγώνια ή παράλληλα με τις άκρες) συγκολλημένες με αυτές των μελών του πλαισίου: 6 δοκίμια.

#6: Όπως στο #4, μεγεθύνοντας επίσης τα υποστρώματα του πλαισίου: 3 δοκιμές.

#7: Χωρίς καμία σύνδεση: 4 δοκιμές.

#8: Αυξάνοντας το πάχος υφιστάμενου μονολιθικού κορμού, χωρίς σύνδεση του νέου στοιχείου με τα μέλη του πλαισίου: 1 δοκιμή.

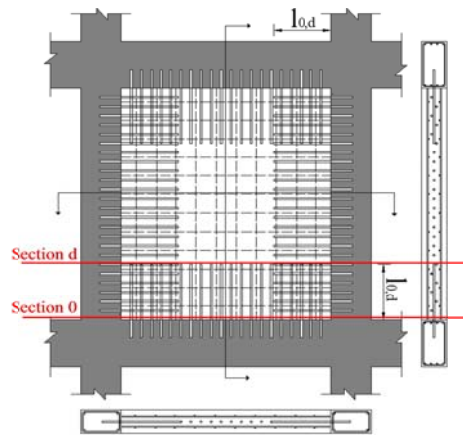
#9: Μέσω διατμητικών συνδέσμων (shear keys): 2 δοκιμές.

#10: Αφήνοντας κενό μεταξύ της κορυφής του νέου κορμού και του κάτω πέλματος της δοκού, ενώ στις τρεις άλλες πλευρές ο τρόπος σύνδεσης είναι οποιοσδήποτε από τους παραπάνω: 5 δοκιμές.

Στο Σχήμα 1 φαίνονται οι Συνδέσεις #2 και #4.

Περισσότερες πληροφορίες για τη βάση δεδομένων είναι διαθέσιμες απ' τους

Biskinis et al 2016.



Σχήμα 1. Σύνδεση του νέου κορμού στο περιβάλλον πλαίσιο με βλήτρα τα οποία δρουν και ως αγκύρια, ματισμένα με τον κατακόρυφο οπλισμό του κορμού. Οι διατομές 0 και d είναι υποψήφιες κρίσιμες διατομές σε κάμψη.

Ο τρόπος σύνδεσης του νέου κορμού με την κορυφή του υποκείμενου οριζόντιου μέλους του πλαισίου (π.χ. πάνω μέρος δοκού θεμελίωσης ή ενδιάμεσης δοκού ορόφου) είναι κρίσιμος για την καμπτική συμπεριφορά του σύνθετου τοιχώματος. Είναι προτιμότερο ο κατακόρυφος οπλισμός του νέου κορμού να είναι αγκυρωμένος εκεί, ώστε να μπορεί να αναπτύξει πλήρως την εφελκυστική αντοχή του. Αυτό είναι εφικτό στις συνδέσεις #1 με #6, όπου κοντά αγκύρια υψηλής εφελκυστικής αντοχής διαπερνούν την οριζόντια διεπιφάνεια, με το ένα άκρο τους πακτωμένο στο υφιστάμενο οριζόντιο μέλος (χημικά ή μηχανικά) και το άλλο να εισέρχεται εντός του νέου κορμού ώστε να παραλαμβάνει τις εφελκυστικές δυνάμεις των κατακόρυφων ράβδων και να τις αγκυρώνει στο οριζόντιο μέλος.

ΡΟΠΗ, ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Υποτίθεται ότι ο τρόπος σύνδεσης του φανώματος ΟΣ με τα μέλη του πλαισίου αποσκοπεί στη μίμηση ενός μονολιθικού τοιχώματος, ώστε να έχει όσο πιο κοντινή συμπεριφορά με αυτό γίνεται υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οπότε οι κανόνες που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του σύνθετου τοιχώματος, είναι παραλλαγές αυτών που ισχύουν για μονολιθικά τοιχώματα και εξαρτώνται από τον τρόπο σύνδεσης. Δύο διατομές λαμβάνονται υπόψη σε κάθε όροφο του σύνθετου τοιχώματος (Σχήμα 1):

- Η διατομή βάσης του ορόφου, για την οποία χρησιμοποιείται ο δείκτης 0. Εάν το φάνωμα ΟΣ συνδέεται με το υποκείμενο μέλος του πλαισίου μέσω βλήτρων που διαπερνούν τη διατομή 0 και είναι πλήρως αγκυρωμένα προς τα κάτω, τότε αυτά τα βλήτρα λειτουργούν ως κατακόρυφος οπλισμός κορμού

στη διατομή.

- Η διατομή όπου σταματούν τα βλήτρα που συνδέουν το φάτνωμα ΟΣ με τη δοκό ή το θεμέλιο από κάτω (δείκτης: d). Η απόσταση αυτής της διατομής από τη διατομή βάσης αποτελεί το μήκος επέκτασης των βλήτρων μέσα στο φάτνωμα, $l_{0,d}$.

Η ροπή που ενεργεί στη διατομή 0 είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτήν που ενεργεί στη διατομή d. Οπότε η διατομή 0 ρηγματώνεται πρώτη και ελέγχει τη ρηγματωμένη δυσκαμψία του τοιχώματος. Τα βλήτρα που διαπερνούν τη διατομή 0 έχουν συνήθως μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή ανά μέτρο μήκους της οριζόντιας διεπιφάνειας απ' ό,τι ο κατακόρυφος οπλισμός του νέου κορμού. Εάν ισχύει αυτό, τότε η διατομή d έχει χαμηλότερη ροπή διαρροής από τη διατομή 0 και, παρά τη χαμηλότερη ροπή που ενεργεί εκεί, ενδέχεται να διαρρεύσει πρώτη, ελέγχοντας τελικά τη ροπή διαρροής του τοιχώματος. Σε ό,τι ακολουθεί, όπου αναφέρονται «ράβδοι κορμού»: α) στη διατομή 0 είναι τα βλήτρα, β) στη διατομή d είναι ο οπλισμός του κορμού. Η τάση διαρροής των ράβδων των κορμού (σημειώνεται ως $f_{yv,0}$ στη διατομή 0 και ως $f_{yv,d}$ στη διατομή d) διαφέρει από την τάση διαρροής των ράβδων στα υποστυλώματα του πλαισίου (σημειώνεται ως f_{y1} για υποστύλωμα σε εφελκυσμό και ως f_{y2} για υποστύλωμα σε θλίψη). Πολύ συχνά οι κατακόρυφες ράβδοι των υποστυλωμάτων είναι ματισμένες, ξεκινώντας από τη διατομή 0. Η «ενεργός τάση» σε εφελκυσμό μιας ματισμένης ράβδου είναι η πραγματική της τάση διαρροής επί $\min(1; l_o/l_{oy,min})$, όπου l_o είναι το μήκος μάτισης της ράβδου και $l_{oy,min}$ το ελάχιστο μήκος ώστε η μάτιση να μην επηρεάζει αρνητικά τη ροπή διαρροής της διατομής (CEN 2005, Biskinis and Fardis 2010a). Η ενεργός τάση χάλυβα της εφελκυσόμενης χορδής είναι η μικρότερη από τις δύο ενεργές τάσεις: στον κορμό, $f_{yv,eff}$, ή στην ίδια την εφελκυσόμενη χορδή, $f_{y1,eff}$:

$$f_{y,eff} = \min(f_{y1,eff}; f_{yv,eff}) = \min[f_{y1} \min(1; l_{o,l}/l_{oy,min,l}); f_{yv} \min(1; l_{o,v}/l_{oy,min,v})] \quad (1)$$

Επιπλέον, εάν οι ράβδοι του παλαιού υποστυλώματος είναι ματισμένες ξεκινώντας από τη διατομή 0, τότε και οι δύο ράβδοι σε ένα ζεύγος ματισμένων ράβδων υποστυλώματος προσμετρούνται ως θλιβόμενος οπλισμός (Biskinis and Fardis 2010a, CEN 2005). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω όσον αφορά τις ματισμένες ράβδους, από την ανάλυση της διατομής προκύπτει η ροπή διαρροής και η καμπυλότητα στη διαρροή των διατομών 0 και d ($M_{y,0}$ και $\varphi_{y,0}$ ή $M_{y,d}$ και $\varphi_{y,d}$ αντίστοιχα). Η ενεργός ροπή διαρροής στη βάση του ορόφου είναι είτε $M_{y,0}$, είτε η ροπή στη βάση όταν η διατομή d διαρρέει (όποια είναι μικρότερη). Εάν $L_{s,0}$ είναι το μήκος διάτμησης (λόγος M/V) στη διατομή 0, εκφράζεται ως:

$$M_y = \min[M_{y,0}; M_{y,d}(1+l_{0,d}/L_{s,0})] \quad (2)$$

Ο μέσος όρος και η διάμεσος τιμή του λόγου πειραματικής προς προβλεπόμενης τιμής της ροπής διαρροής του τοιχώματος (βλ. σειρές 1 και 2 του Πίνακα 1), δείχνουν ότι το αποτέλεσμα της Εξ. (2) δίνει καλή σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών με εμφάτνωση – για την ακρίβεια, καλύτερα απ' ό,τι στα μονολιθικά δοκίμια αναφοράς. Η καλή αυτή συμφωνία δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη βλαβών στο πλαίσιο πριν την κάλυψη του φαντώματος με ΟΣ.

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία λόγου πειραματικής προς προβλεπόμενης τιμής μεγεθών στη διαρροή, γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία και διατμητικής αντοχής.

Λόγος πειραματικής/προβλεπόμενης τιμής	Πλήθος	Στατιστικά στοιχεία †		
		M.O.	Διάμεσος	CoV %
1 $M_{y,exp}/M_{y,Eξ,(2)}$ Σύνθετα τοιχώματα με καμπτική διαρροή ‡	38	1.08	1.05	16.0
1b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		1.12	1.10	17.7
2 $M_{y,exp}/M_{y,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια με καμπτική διαρροή	11	1.10	1.08	9.9
3 $EI_{exp}/EI_{pred,Eξ,(1)-(3)}$ Σύνθετα τοιχώματα με καμπτική διαρροή ‡	35	1.18	1.18	36.6
3b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		1.68	1.70	38
4 $EI_{exp}/EI_{pred,Eξ,(2)}$ Μονολιθικά δοκίμια με καμπτική διαρροή	8	0.99	0.99	41.5
5 $\theta_{y,exp}/\theta_{y,Eξ,(1)-(4)}$ Σύνθετα τοιχώματα με καμπτική διαρροή	35	1.03	0.93	45
5b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		0.80	0.69	41.6
6 $\theta_{v,exp}/\theta_{v,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια με καμπτική διαρροή	8	1.24	1.13	42.6
7 $\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ Σύνθετα τοιχώματα με καμπτική αστοχία, Grammatikou et al (2017a), Εξ.(9)	10	1.00	0.91	39.8
7b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		0.52	0.46	35.9
8 $\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ Σύνθετα τοιχώματα με καμπτική αστοχία, Grammatikou et al (2017a), Εξ.(10)		1.24	1.05	42.5
8b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		0.70	0.55	40.3
9 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Σύνθετα τοιχώματα με διατμητική ολίσθηση, ACI318 mod. ‡	23	1.01	0.93	25.8
9b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		0.94	0.91	27.1
10 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια αναφοράς με διατμητική ολίσθηση, ACI318 mod.	5	1.13	1.12	34.9
11 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Σύνθετα τοιχώματα με διατμητική ολίσθηση, modif. fib MC2010 ‡	23	1.04	0.95	29.9
11b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		0.95	0.93	29.7
12 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια αναφοράς με διατμητική ολίσθηση, modified fib MC2010	5	1.09	1.01	38.8
13 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Σύνθετα τοιχώματα με διατμ. ολίσθ., modif. EC8 ‡	23	1.29	1.24	38.9
13b <i>Ομοίως, με τα δοκίμια θεωρούμενα ως μονολιθικά</i>		1.21	1.12	44.2
14 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια με διατμ. ολίσθ., modif. EC8	5	1.11	1.075	26.3
15 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Κοντά σύνθετα τοιχώματα, φυσικό προσομ.	9	0.97	1.04	25.0
16 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια αναφοράς, φυσικό προσομ.	7	1.19	1.14	22.2
17 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Κοντά σύνθετα τοιχώματα, εμπειρικό προσομ.	9	1.00	1.02	17.1
18 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Μονολιθικά δοκίμια, εμπειρικό προσομοίωμα	7	1.16	1.15	23.7
19 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Αστοχία σε διαγώνιο εφελκυσμό μετά τη διαρροή	2	1.00	1.00	1.3
20 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Διατμητική αστοχία στην κορυφή των υπ/μάτων	12	1.12	1.13	30.7
21 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ Όλα τα δοκίμια, ASCE41-06	56	1.30	1.34	48.5

† Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο (M.O.)

‡ Σε 6 δοκίμια με τύπο σύνδεσης #5 οι δέσμες ράβδων στον κορμό (διαγώνια ή παράλληλα με τις άκρες) είναι άγνωστης ποσότητας και αγνοούνται: οι τιμές των M_y , EI_{eff} και της αντοχής σε διατμητική ολίσθηση υποεκτιμώνται, αυξάνοντας τον αντίστοιχο μέσο όρο και τη διάμεσο τιμή.

Η διατομή 0 ρηγματώνεται πρώτη και ελέγχει τη ρηγματωμένη δυσκαμψία. Οπότε για το τοίχωμα το επιβατικό μέτρο δυσκαμψίας στο σημείο διαρροής κατά τον (CEN 2005) είναι:

$$EI_{\text{eff}} = M_{y,0}L_{s,0}/3\theta_{y,0} \quad (3)$$

όπου $\theta_{y,0}$ είναι η γωνία στροφής χορδής στη βάση του τοιχώματος (δηλ. ο λόγος της παραμόρφωσης του τοιχώματος σε απόσταση από τη διατομή 0 ίση με το μήκος διάτμησης, $L_{s,0}$, προς το $L_{s,0}$) στη διαρροή της διατομής 0. Η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση των Grammatikou et al (2017b), η οποία έχει προσαρμοστεί σε πειραματικά αποτελέσματα 580 μονολιθικών τοιχωμάτων.

Το τοίχωμα διαρρέει όταν η ροπή στη διατομή 0 φτάσει την τιμή από την Εξ. (2), η οποία πιθανόν να είναι μικρότερη από $M_{y,0}$. Κατ' αναλογία, η γωνία στροφής χορδής στη διατομή 0 στη διαρροή του τοιχώματος, θ_y , ενδέχεται να είναι μικρότερη από την $\theta_{y,0}$. Είναι η τιμή που προκύπτει όταν η ροπή στη βάση γίνεται ίση με την M_y από την Εξ. (2). Θεωρώντας ότι ο λόγος M προς θ παραμένει σταθερός έως ότου συμβεί διαρροή σε κάμψη, η θ_y προκύπτει από την ενεργό δυσκαμψία του ορόφου, EI_{eff} , κατά την Εξ. (3). Οπότε:

$$\theta_y = M_y L_{s,0} / 3EI_{\text{eff}} \quad (4)$$

Οι σειρές 3 έως 6 του Πίνακα 1 δείχνουν ότι η παραπάνω διαδικασία κατά μέσο όρο υπερεκτιμά το επιβατικό μέτρο δυσκαμψίας στο σημείο διαρροής του εμφανωμένου με ΟΣ πλαισίου και υποτιμά ελαφρώς τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή. Βλάβες στο πλαίσιο από δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση πριν την εμφάνιση επηρεάζουν σε μικρό μόνο βαθμό την ενεργό δυσκαμψία, καθώς αυτή καθορίζεται κατά κύριο λόγο απ' το νέο κορμό.

ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Δέκα από τα 56 δοκίμια αστόχησαν σε κάμψη. Όλα είχαν χημικά βλήτρα γύρω απ' όλο τον κορμό (οκτώ με σύνδεση τύπου #4 και δύο με #6). Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η καμπτική αστοχία ενός τοιχώματος (η οποία αντιστοιχεί σε πτώση της αντοχής κατά 20%) ελέγχεται από τη διατομή βάσης. Λαμβάνει χώρα σε τιμή της πλαστικής γωνίας στροφής χορδής παρόμοια με την αντίστοιχη τιμή ενός μονολιθικού τοιχώματος που αστοχεί σε ανακυκλιζόμενη κάμψη. Οι Grammatikou et al (2017a) προσάρμοσαν εναλλακτικές εμπειρικές εξισώσεις στη γωνία στροφής χορδής αστοχίας 200 και πλέον μονολιθικών δοκιμίων. Θεωρώντας ότι τα βλήτρα που είναι πακτωμένα με εποξειδική ρητίνη ή αγκυρωμένα μηχανικά μέσα σε οριζόντιο μέλος του πλαισίου δεν ολισθαίνουν από αυτό, και παραβλέποντας τη μάτιση των ράβδων του κορμού, οι Εξ.(9) και (10) των αυτές οι εξισώσεις Grammatikou et al fib (2017a) χρησιμοποιούνται εδώ για τον υπολογισμό του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία. Σύμφωνα με τις σειρές 7 και 8 του Πίνακα 1, η Εξ.

(9) υπολογίζει καλύτερα την πειραματική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία του εμφατνωμένου με ΟΣ δοκιμίου από την Εξ. (10).

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Αστοχία λόγω διατμητικής ολίσθησης στη διατομή καμπτικής διαρροής

Αρκετά δοκίμια (25 από τα 56) αστόχησαν λόγω ολίσθησης στη διατομή που ελέγχει την καμπτική διαρροή κατά την Εξ. (2). Οι Grammatikou et al (2015) προσάρμοσαν τρία εναλλακτικά προσομοιώματα στην αντοχή έναντι διατμητικής ολίσθησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση 55 μονολιθικών τοιχωμάτων μετά από την εμφάνιση καμπτικής διαρροής. Και τα τρία αποτελούν τροποποιήσεις προσομοιωμάτων που περιλαμβάνονται σε κανονισμούς: τα προσομοιώματα στους κανονισμούς ACI318 και *fib* Model Code 2010 (MC2010) για μονοτονική διάτμηση, και το προσομοίωμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης στο Μέρος 1 του Ευρωκώδικα 8 για τοιχώματα ΟΣ Υψηλής Κατηγορίας Πλαστιμότητας. Περισσότερα στοιχεία για τα εν λόγω προσομοιώματα έχουν δημοσιευθεί απ' τους Grammatikou et al (2015). Στις σειρές 9 έως 14 του Πίνακα 1 περιλαμβάνονται στατιστικά μεγέθη της πειραματικής αντοχής έναντι διατμητικής ολίσθησης ως προς τις προβλέψεις των τριών προσομοιωμάτων.

Διατμητική αντοχή κοντών τοιχωμάτων ($L_s/h \leq 1.2$)

Από τα 56 τοιχώματα που προέκυψαν με εμφάνιση από ΟΣ, 13 αστόχησαν σε διάτμηση και είχαν $L_s/h \leq 1.2$, το οποίο αποτελεί το άνω όριο του λόγου διάτμησης για τα κοντά τοιχώματα κατά τους Grammatikou et al (2015). Σε εκείνη την εργασία δύο προσομοιώματα προσαρμόστηκαν στη διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση 320 μονολιθικών κοντών τοιχωμάτων. Το πρώτο αποτελεί ένα φυσικό προσομοίωμα, ισχύει για $0.25 \leq L_s/h \leq 1.2$ και υπολογίζει τη διατμητική αντοχή, $V_{R,squat}$, ως άθροισμα της συμβολής του σκυροδέματος, V_c , και της συμβολής των ράβδων του κορμού, V_s . Το άλλο προσομοίωμα είναι εμπειρικό και αποτελεί τροποποίηση προσομοιώματος που προσαρμόστηκε από τους Gulec and Whittaker (2011) στη μέγιστη αντοχή ενός μικρότερου δείγματος μονολιθικών κοντών τοιχωμάτων, ισχύει δε για $0 < L_s/h \leq 1.2$. Περισσότερες πληροφορίες για τα προσομοιώματα αυτά έχουν δημοσιευθεί απ' τους Grammatikou et al (2015). Όπως φαίνεται στις σειρές από 15 έως 18 του Πίνακα 1, τα δύο εναλλακτικά προσομοιώματα για κοντά τοιχώματα προβλέπουν κατά μέσο όρο ικανοποιητικά τη διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση των κοντών δοκιμίων που εμφατνώθηκαν με ΟΣ. Οι προβλέψεις είναι καλύτερες εν συγκρίσει με τις προβλέψεις για τα μονολιθικά δοκίμια.

Αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση τοιχωμάτων με $L_s/h \geq 1.0$ σε διαγώνιο εφελκυσμό μετά από καμπτική διαρροή

Δύο δοκίμια εμφατνωμένα με ΟΣ αστόχησαν σε διαγώνιο εφελκυσμό μετά από καμπτική διαρροή, μια μορφή αστοχίας για την οποία η διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τους Biskinis et al

(2004), CEN (2005). Έξι δοκίμια είχαν κενό ανάμεσα στην κορυφή του κορμού και στο κάτω πέλαμα της δοκού, με αποτέλεσμα την πρόωρη διατμητική αστοχία στην κορυφή των υποστυλωμάτων. Έξι ακόμα δοκίμια εμφάνισαν αστοχία στα υποστυλώματα σε διαγώνιο εφελκυσμό. Η αντοχή σε τέμνουσα δύναμη αυτών των δώδεκα δοκιμίων υπολογίζεται εδώ ως το άθροισμα της συμβολής τριών ξεχωριστών μηχανισμών διατμητικής αντοχής σε διαγώνιο εφελκυσμό, ενός μηχανισμού στον κορμό και ενός σε κάθε υποστύλωμα:

$$V_{R,tot} = V_{R,web,ST} + V_{R,col1,ST} + V_{R,col2,ST} \quad (5)$$

Οι εξισώσεις των Biskinis et al (2004), CEN (2005) χρησιμοποιούνται και για τους τρεις όρους της Εξ. (5), θεωρώντας ότι το υποστύλωμα υπό εφελκυσμό έχει μηδενική συμβολή σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή (δηλ. λαμβάνεται μόνο ο όρος V_s στο $V_{R,col1,ST}$). Η συμβολή της αξονικής δύναμης, λαμβάνεται όπως στο πλήρες σύνθετο τοίχωμα. Στην 20^η σειρά του Πίνακα 1 δίνονται τα στατιστικά μεγέθη πειραματικής-εκτιμώμενης τιμής κατά την Εξ. (5) για τα 12 πειράματα με τον συγκεκριμένο τρόπο αστοχίας.

Αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση τοιχωμάτων με $2.5 \geq L_s/h \geq 1$ σε λοξή θλίψη πριν ή μετά απ' την καμπτική διαρροή

Παρότι δεν εκδηλώθηκε σε κανένα από τα δοκίμια που δεν ήταν κοντά, μια άλλη πιθανή μορφή αστοχίας είναι η διαγώνια θλίψη του κορμού. Για λόγους πληρότητας, το εμπειρικό προσομοίωμα που προσαρμόστηκε από τους Biskinis et al (2004) σε 62 μονολιθικά τοιχώματα που αστόχησαν σε λοξή θλίψη θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν υπολογίζεται η κρίσιμη μορφή αστοχίας και η διατμητική αντοχή ενός εμφανωμένου με ΟΣ πλαισίου με $2.5 \geq L_s/h \geq 1$. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα εφαρμόζεται και για αστοχία σε ανακυκλιζόμενη τέμνουσα πριν την καμπτική διαρροή (με $m^p = 0$).

ΑΛΛΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΟΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η προσομοίωση και ο έλεγχος του φατνώματος ΟΣ ως λοξού θλιπτήρα κατά τον Mainstone (1971), κάτι που επιτρέπει ο ASCE41-06 (ASCE 2007), δίνει τα στατιστικά μεγέθη του λόγου πειραματικής προς προβλεπόμενη διατμητική αντοχή που φαίνονται στην τελευταία σειρά του Πίνακα 1. Ο μέσος όρος και η διάμεσος του λόγου είναι 1.3 και 1.34 αντίστοιχα, και, πιο σημαντικό, η διασπορά και η αβεβαιότητα της πρόβλεψης αυξάνουν σημαντικά (συντελεστής μεταβλητότητας $CoV=48.5\%$) σε σχέση με τα προτεινόμενα προσομοιώματα. Οι εξεταζόμενες ιδιότητες της μηχανικής συμπεριφοράς του σύνθετου τοιχώματος υπολογίστηκαν επίσης κάνοντας την θεώρηση μονολιθικού τοιχώματος, ανεξάρτητα από τον τρόπο και τις λεπτομέρειες σύνδεσης του νέου κορμού με το πλαίσιο. Ο μέσος όρος, η διάμεσος και ο συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής-εκτιμώμενης τιμής των εξεταζόμενων μεγεθών φαίνεται στον Πίνακα 1 με πλάγια γράμματα, στις σειρές που έχουν το επίθεμα b, ακριβώς κάτω από τους υπολογισμούς των μεγεθών σύμφωνα με την παρούσα εργασία. Οι τιμές

που έχουν υπολογιστεί κατ' αυτόν τον τρόπο εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά και σημαντικό συστηματικό σφάλμα. Συγκρινόμενες με τις τιμές που προέκυψαν από την προτεινόμενη διαδικασία, η ροπή διαρροής είναι, κατά μέσο όρο, περίπου 5% μικρότερη και το επιβατικό μέτρο δυσκαμψίας στο σημείο διαρροής περίπου 40% μικρότερο. Ακόμα πιο σημαντικό, η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία υπερεκτιμάται κατά σχεδόν 50%. Η απόκλιση της διατμητικής αντοχής είναι μικρότερη, ανάλογα με τη μορφή αστοχίας.

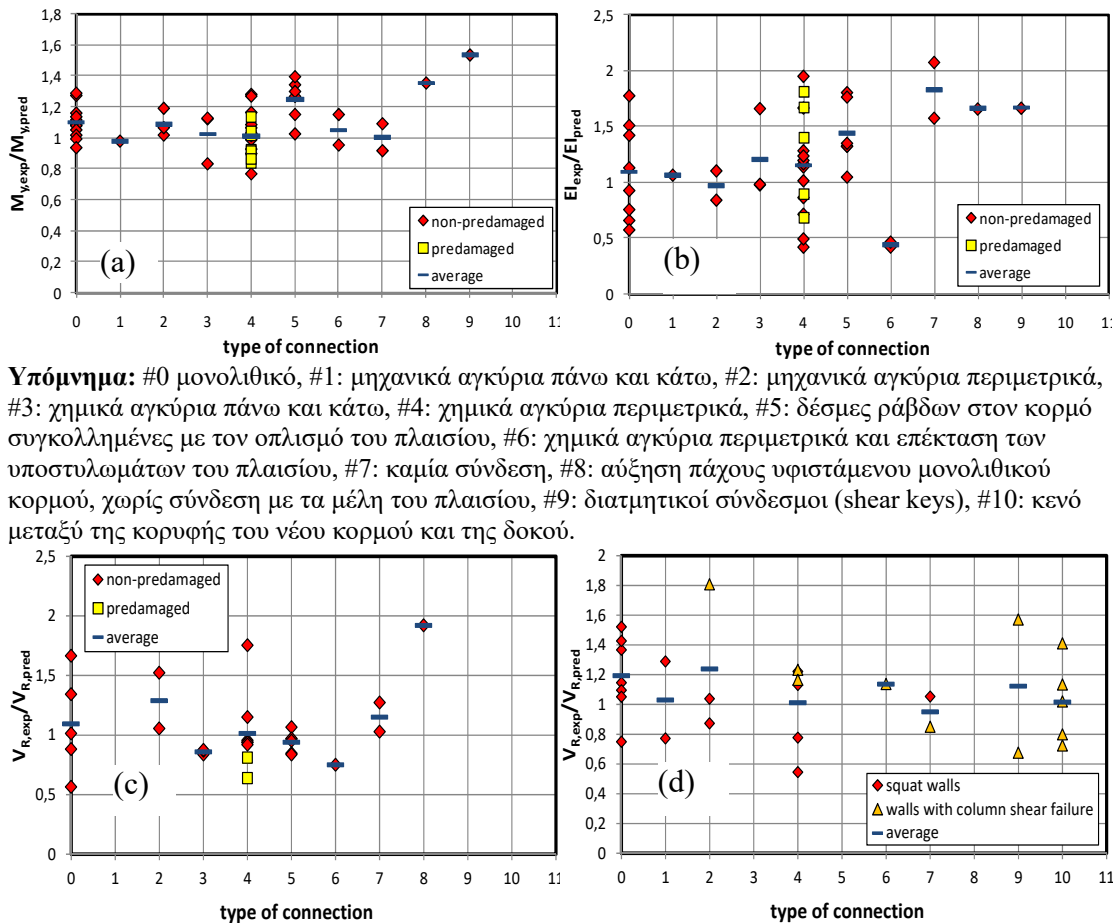
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΕΡΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στα παραπάνω, τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τη μορφή αστοχίας που διαπιστώθηκε κατά την πειραματική δοκιμή. Στην πράξη, όμως, πρέπει να προβλέπεται εξ αρχής η πιθανότερη μορφή αστοχίας ενός τοιχώματος που προκύπτει από την εμφάνιση ενός πλαισίου με ΟΣ, προκειμένου να υπολογιστεί η αντοχή του υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και η ικανότητα παραμόρφωσης του. Κατ' αρχάς, πρέπει να ελέγχεται αν το τοίχωμα εμφανίζει ψαθυρή διατμητική αστοχία πριν διαρρεύσει σε κάμψη.

Ως εκ τούτου:

1. Η ροπή διαρροής στη βάση ορίζεται από την Εξ. (2) και η τέμνουσα δύναμη στην καμπτική διαρροή υπολογίζεται από το μήκος διάτμησης στη διατομή της βάσης ως $V_y = M_y / L_{s,0}$.
2. Εάν $L_s/h \geq 1.0$, η αντοχή σε λοξή θλίψη, $V_{R,SC}$, υπολογίζεται κατά τους Biskinis et al (2004) με $\mu_{\theta}^{pl} = 0$.
3. Εάν $L_s/h \leq 1.2$, η $V_{R,squat}$ υπολογίζεται από ένα εκ των δύο προτεινόμενων προσομοιωμάτων παραπάνω – ανάλογα με το ποιο θα επιλεγεί.
4. Για κάθε τιμή L_s/h , λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα πρόωρης διατμητικής αστοχίας στην κορυφή των υποστυλωμάτων υπολογίζοντας τη διατμητική αντοχή κατά την Εξ. (5), με $\mu_{\theta}^{pl} = 0$ κατά τον υπολογισμό του κάθε όρου.
5. Εάν οποιαδήποτε από τις διατμητικές αντοχές σύμφωνα με τους υπολογισμούς που περιγράφονται στα σημεία 2 έως 4 είναι μικρότερη από την τέμνουσα δύναμη στη διαρροή σύμφωνα με το σημείο 1, V_y , τότε η διατμητική αστοχία είναι ψαθυρή και η μορφή αστοχίας είναι αυτή που δίνει την ελάχιστη διατμητική αντοχή. Η αναζήτηση σταματά εδώ. Διαφορετικά, λαμβάνει χώρα καμπτική διαρροή στην κρίσιμη διατομή (0 ή d), Εξ. (2), και σε τέμνουσα δύναμη, V_y , σύμφωνα με το σημείο 1. Η αναζήτηση συνεχίζει ως εξής:
6. Η γωνία στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή, θ_y , και η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , υπολογίζονται. Η μέγιστη δυνατή τιμή της μ_{θ}^{pl} υπολογίζεται ως: $\mu_{\theta}^{pl} = \theta_u / \theta_y - 1$.
7. Οι ακόλουθες τιμές διατμητικής αντοχής υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την τιμή της μ_{θ}^{pl} που προκύπτει από το σημείο 6:
 - α. εάν $L_s/h \geq 1.0$: αντοχή σε λοξό εφελκυσμό, $V_{R,ST}$, και αντοχή σε λοξή θλίψη, $V_{R,SC}$,
 - β. για κάθε L_s/h : αντοχή σε διατμητική ολίσθηση στη βάση, $V_{R,SLS}$, με χρήση ενός εκ των τριών προτεινόμενων προσομοιωμάτων (όποιο επιλεγεί).
8. Η μορφή αστοχίας καθορίζεται από τη μικρότερη από τις τέμνουσες δυνάμεις σύμφωνα με τα σημεία 1, 7α και 7β. Εάν η τέμνουσα δύναμη από το σημείο 1,

V_y , είναι η μικρότερη, τότε προβλέπεται καμπτική αστοχία σε γωνία στροφής χορδής θ_u . Διαφορετικά, η πιθανότερη μορφή αστοχίας είναι αυτή που δίνει τη μικρότερη διατμητική αντοχή από αυτές που αναφέρονται στο σημείο 7. Η εν λόγω μορφή αστοχίας λαμβάνει χώρα μετά την καμπτική διαρροή, σε τέμνουσα δύναμη ίση με την V_y (από το σημείο 1) και τιμή της μ_{θ}^{pl} μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή (όπως υπολογίστηκε στο σημείο 6). Η πιθανή τιμή της μ_{θ}^{pl} υπολογίζεται ορίζοντας την εξίσωση για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής της πιθανότερης μορφής αστοχίας ίση με V_y και λύνοντάς την για μ_{θ}^{pl} . Η πιθανότερη τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι τότε $\theta = (\mu_{\theta}^{pl} + 1)\theta_y < \theta_u$.



Υπόμνημα: #0 μονολιθικό, #1: μηχανικά αγκύρια πάνω και κάτω, #2: μηχανικά αγκύρια περιμετρικά, #3: χημικά αγκύρια πάνω και κάτω, #4: χημικά αγκύρια περιμετρικά, #5: δέσμες ράβδων στον κορμό συγκολλημένες με τον οπλισμό του πλαισίου, #6: χημικά αγκύρια περιμετρικά και επέκταση των υποστρωμάτων του πλαισίου, #7: καμία σύνδεση, #8: αύξηση πάχους υφιστάμενου μονολιθικού κορμού, χωρίς σύνδεση με τα μέλη του πλαισίου, #9: διατμητικοί σύνδεσμοι (shear keys), #10: κενό μεταξύ της κορυφής του νέου κορμού και της δοκού.

Σχήμα 2. Επιρροή του τρόπου σύνδεσης του νέου κορμού με το περιβάλλον πλαίσιο στο λόγο πειραματικής προς προβλεπόμενη τιμή: (a) ροπή διαρροής απ' τις Εξ. (1), (2), (b) επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή απ' τις Εξ. (1)-(4), (c) αντοχή σε διατμητική ολίσθηση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, (d) διατμητική αντοχή κοντών τοιχωμάτων, ενδεικτικά χρησιμοποιώντας το «εμπειρικό» προσομοίωμα, ή αντοχή για διατμητική αστοχία της κορυφής των παλαιών υποστρωμάτων απ' την Εξ. (5).

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των βημάτων 1 έως 5 που περιγράφηκαν πιο πάνω στα 56 εμφατνωμένα με ΟΣ δοκίμια, ενδεικτικά χρησιμοποιώντας το φυσικό προσομοίωμα για τα κοντά τοιχώματα. Σε 49 από τα 56 δοκίμια (δηλ. στο 88%) η συμπεριφορά (δηλ. καμπτική διαρροή ή ψαθυρή διατμητική αστοχία) προβλέπεται ορθά. Ο μέσος όρος και η διάμεσος τιμή του λόγου της πειραματικής αντοχής προς την προβλεπόμενη τιμή της καθοριστικής τέμνουσας είναι αντίστοιχα 1.09 και 1.07. Ο συντελεστής μεταβλητότητας (CoV) του λόγου είναι 21.2%. Η εφαρμογή των βημάτων 6 έως 8, όπως και του βήματος 3 για τα κοντά υποστρώματα, πραγματοποιήθηκε για τα 56 δοκίμια. Οι εκτιμώμενες διατμητικές αντοχές για τις διάφορες μορφές αστοχίας – χρησιμοποιώντας ενδεικτικά το φυσικό προσομοίωμα για τα κοντά τοιχώματα και το τροποποιημένο προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 8 για τη διατμητική ολίσθηση – συγκρίθηκαν, για να υπολογισθεί η προβλεπόμενη μορφή αστοχίας για κάθε δοκίμιο και να συγκριθεί η εκτιμώμενη διατμητική του αντοχή με την πειραματική τιμή. Η προβλεπόμενη μορφή αστοχίας κάθε δοκιμίου συγκρίνεται επίσης με τα πειραματικά δεδομένα. Σε 43 από τα 56 τοιχώματα (δηλ. στο 77%) υπάρχει σωστή πρόβλεψη της μορφής αστοχίας. Ο μέσος όρος και η διάμεσος τιμή του λόγου της πειραματικής αντοχής προς την προβλεπόμενη κρίσιμη διατμητική αντοχή είναι αντίστοιχα 1.19 και 1.13, με συντελεστή μεταβλητότητας (CoV) του λόγου 29%. Τα δεδομένα που αφορούν το νέο οπλισμό που τοποθετήθηκε κατά την εμφάνιση του πλαισίου με ΟΣ είναι έλλιπη σε 7 δοκίμια, καθιστώντας την πρόβλεψη αβέβαιη. Εάν παραβλεφθούν αυτά τα δοκίμια λόγω έλλειψης στοιχείων, τότε τα στατιστικά μεγέθη του $V_{exp}/\min V_{pred}$ για τα υπόλοιπα 49 δοκίμια είναι: μέσος όρος = 1.12, διάμεσος = 1.095, συντελεστής μεταβλητότητας = 24.3%.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΜΕΛΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Τιμές του λόγου πειραματικής προς εκτιμώμενη τιμή σημαντικών ιδιοτήτων των δοκιμίων με εμφάνιση με ΟΣ φαίνονται στο Σχήμα 2 έναντι του τρόπου σύνδεσης. Η περίπτωση #0 αφορά τα μονολιθικά δοκίμια, για λόγους σύγκρισης. Για τους «ορθόδοξους» τρόπους σύνδεσης, δηλ. από #1 έως #6, οι κανόνες που προτείνονται στην παρούσα εργασία προβλέπουν πολύ ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές. Εξαίρεση αποτελούν η ροπή διαρροής και η δυσκαμψία στην περίπτωση #5, οι οποίες υποεκτιμούνται διότι παραβλέφθηκε η επιρροή του συγκολλημένου οπλισμού του κορμού σε αυτόν των υφιστάμενων μελών, διότι δεν ήταν γνωστή η ποσότητά του. Η υπερεκτίμηση της δυσκαμψίας στις δύο περιπτώσεις #6 δεν μπορεί να εξηγηθεί εύκολα, ενώ η υποεκτίμηση στην περίπτωση #7 (καμία σύνδεση) υπονοεί ότι οι διεπιφάνειες από τις οποίες δεν περνάει οπλισμός ενεργοποιούνται ως ένα βαθμό. Η ίδια αιτιολογία ενδεχομένως εξηγεί την υποεκτίμηση της ροπής διαρροής και της ενεργού δυσκαμψίας στην περίπτωση #8, όπου και πάλι οι συγκεκριμένοι κανόνες δεν λαμβάνουν υπόψη τη θετική επιρροή από την αύξηση του πάχους του κορμού, επειδή δεν είναι συνδεδεμένος άμεσα με τα μέλη του περιβάλλοντος πλαισίου. Στο Σχήμα 2 δεν φαίνεται πώς επηρεάζει ο τρόπος σύνδεσης την ακρίβεια της πρόβλεψης της

γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία στα δέκα δοκίμια που διέρρευσαν σε κάμψη: δύο από αυτά τα δοκίμια είχαν σύνδεση #6 και οκτώ #4. Η συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ καλή και για τα δύο υποσύνολα (βλ. στατιστικά μεγέθη στη σειρά 7 του Πίνακα 1).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και από εθνικούς πόρους, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ERC-12: PRESCIENT “Κατασκευές από σκυρόδεμα ανθεκτικές σε ακραίες φυσικές και ανθρωπογενείς απειλές” στο πλαίσιο της δράσης “Χρηματοδότηση προτάσεων που αξιολογήθηκαν θετικά στην 5η προκήρυξη των “ERC Grant Schemes”.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2007) Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, Reston, VA.
- Biskinis D, Roupakias G, Fardis MN (2004) Degradation of shear strength of RC members with inelastic cyclic displacements. *ACI Struct. J.*, 101(6), 773-783.
- Biskinis D, Fardis MN (2010) Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars. *Structural Concrete*, 11(3), 127-138.
- Biskinis D, Fardis MN, Psaros-Andriopoulos A. (2016) Strength, stiffness and cyclic deformation capacity of RC frames converted into walls by infilling with RC. *Bull Earthquake Eng* 14(3): 769-803.
- CEN (2005). European Standard EN1998-3:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Comite European de Normalisation. Brussels.
- fib* (2012) *Model Code 2010*. Bulletin 65/66, Federation Internationale du Beton, Lausanne
- Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN (2015) Strength, deformation capacity and failure modes of RC walls under cyclic loading. *Bull. Earthq. Eng.*, 13(11), 3277-3300.
- Grammatikou, S., Biskinis, D., Fardis, M.N. (2017a) Flexural rotation capacity models fitted to test results using different statistical approaches *Struct. Concr.* doi:10.1002/suco.201600238
- Grammatikou, S., Biskinis, D. and Fardis M.N. (2017b) Effective stiffness and ultimate deformation of flexure-controlled RC members, including the effects of load cycling, FRP jackets and lap-splicing of longitudinal bars. *ASCE, J. Struct. Eng.* (tentatively accepted).
- Gulec, C.K., Whittaker, A.S. (2011) Empirical equations for peak shear strength of low aspect ratio reinforced concrete walls. *ACI Structural J* 108(1):80-89.
- Mainstone RJ (1971) On the stiffnesses and strengths of infilled frames. *Proceedings of Institution of Civil Engineers v 7360s*
- Strepelias E, Palios X, Bousias SN, Fardis MN (2013) Experimental investigation of concrete frames infilled with RC for seismic rehabilitation. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 139.