

Διατμητική Συμπεριφορά Τοιχωμάτων Ο.Σ. υπό Ανακυκλιζόμενη Ένταση

Shear Behavior of RC Walls under Cyclic Loading

Σοφία ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΥ¹, Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ², Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: πλαστιμότητα, σεισμική αποτίμηση, σεισμικός σχεδιασμός
Keywords: ductility, seismic assessment, seismic design

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων τοιχωμάτων και τη σεισμική αποτίμηση των υφιστάμενων είναι απαραίτητη η εκτίμηση της διατμητικής αντοχής σε ανακυκλιζόμενη ένταση για όλους τους πιθανούς τρόπους αστοχίας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται βάση πειραματικών δεδομένων με περισσότερα από 500 τοιχώματα ορθογωνικής διατομής ή διατομής αποτελούμενης από ορθογωνικά σκέλη (πχ. T-, H-, I-, Γ-) με διατμητική αστοχία για να αξιολογηθούν παλαιά προσομοιώματα και να προταθούν νέα. Οι διατμητικοί τρόποι αστοχίας που εξετάζονται είναι συγκεκριμένα οι εξής: α) σε λοξό εφελκυσμό (που οφείλεται στη μείωση λόγω ανακύκλισης της διατμητικής αντοχής μετά τη διαρροή), β) σε λοξή θλίψη (πριν ή μετά τη διαρροή), γ) σε διατμητική ολίσθηση στη βάση, δ) η ειδική περίπτωση των “κοντών” υποστλωμάτων σε διάτμηση.

ABSTRACT: In seismic design of new walls and seismic assessment of existing ones, it is necessary to estimate the shear strength in cyclic loading for all possible failure modes. In the present work, an experimental database of more than 500 walls of rectangular section or section consisting of rectangular parts (eg T-, H-, I-, C-) with shear failure is utilized, to evaluate old models and propose new. The shear failure modes examined are in particular: a) shear tension (due to shear strength reduction after flexural yielding); b) shear compression (before or after yielding); c) sliding shear at the base; d) the special case of “squat” walls.

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΛΟΞΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΛΟΞΗ ΘΛΙΨΗ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ

Μόλις ένα μέλος διαρρεύσει, η διατμητική του αντοχή μειώνεται με την αύξηση των ανελαστικών μετατοπίσεων: η πλαστική άρθρωση μπορεί να αστοχήσει σε

¹Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: sofgram@upatras.gr

²Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Πανεπιστήμιο Πατρών / Ακαδημαϊκός Υπότροφος, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών ΤΕ, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, email: dbisk@tee.gr

³Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Παν/μιο Πατρών, email: fardis@upatras.gr

λοξό εφελκυσμό πριν σημειωθεί η μέγιστη γωνία στροφής χορδής που σηματοδοτεί την καμπτική αστοχία. Οι Biskinis et al. (2004) χρησιμοποίησαν δύο εναλλακτικά εμπειρικά προσομοιώματα για την μείωση της αντοχής σε λοξό εφελκυσμό λόγω ανακύκλισης, $V_{R,ST}$, ορθογωνικών δοκών, υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων, κυκλικών υποστυλωμάτων, και μελών μη-ορθογωνικής διατομής (συμπεριλαμβανομένων και των κοίλων ορθογωνικών διατομών). Αυτές οι σχέσεις, που έχουν υιοθετηθεί και στον CEN (2005), είναι:

$$V_{R,ST} = \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0.55A_c f_c) + \left(1 - 0.095 \min\left(5; \mu_\theta^{pl}\right)\right) \cdot 0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_s}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} b_w d + V_s \quad (1a)$$

$$V_{R,ST} = \frac{h-x}{2L_s} \min(N; 0.55A_c f_c) + \left(1 - 0.05 \min\left(5; \mu_\theta^{pl}\right)\right) \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_s}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} b_w d + V_s\right] \quad (1b)$$

όπου:

$\mu_\theta^{pl} = \mu_\theta - 1$: το πλαστικό τμήμα του δείκτη πλαστιμότητας της γωνίας στροφής χορδής με $\mu_\theta = \theta / \theta_y$ και θ_y σύμφωνα με τους Grammatikou et al (2017a), (2017b),

x : το ύψος της θλιβόμενης ζώνης – που υπολογίζεται με ανάλυση διατομής,

A_c : η επιφάνεια του σκυροδέματος της διατομής,

ρ_{tot} : το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού,

L_s/h : ο λόγος διάτμησης,

d : το στατικό ύψος της διατομής,

b_w : το πλάτος κορμού,

$V_s = \rho_w b_w z f_{yh}$: η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή με ποσοστό οπλισμού διάτμησης ρ_w και τάση διαρροής f_{yw} ($z=0.8h$ για ορθογωνικά τοιχώματα, $z=d-d_s$ για μη-ορθογωνικά).

Σημειώνεται ότι ο 1^{ος} όρος στις Εξ. (1) είναι θεωρητικός: αντιπροσωπεύει τη διατμητική αντοχή που παρέχεται από την εγκάρσια συνιστώσα ενός διαγώνιου θλιπτήρα που μεταφέρει σε όλο το μήκος διάτμησης τη δύναμη θλίψης ως αποτέλεσμα των δρώντων αξονικών τάσεων σε κάθε διατομή (δηλαδή, τη θλιπτική δύναμη N). Ο V_s όρος είναι επίσης θεωρητικός. Ο εμπειρικός όρος προσαρμόστηκε στη διαφορά μεταξύ της πειραματικής τιμής της $V_{R,ST}$ και του αθροίσματος των δύο θεωρητικών όρων, χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους (ανάλυση συσχέτισης και παλινδρόμησης). Αυτός ο τρόπος αστοχίας αναφέρεται σε μία καμπτική πλαστική άρθρωση στη βάση του τοιχώματος, οπότε, μπορεί να συμβεί αφού διαρρεύσει σε κάμψη η διατομή. Μετά τη διαρροή, η μέγιστη τέμνουσα δεν μπορεί να υπερβεί – τουλάχιστον όχι σημαντικά – την τιμή $V_y = M_y / L_s$. Η πλαστική άρθρωση μπορεί να αστοχήσει σε λοξό εφελκυσμό, μόλις η απαιτούμενη στροφή χορδής, θ , αυξηθεί στο σημείο όπου ο αντίστοιχος δείκτης πλαστιμότητας, $\mu_\theta^{pl} = \theta / \theta_y - 1$, μειώσει την τιμή της διατμητικής αντοχής από τις Εξ. (1) σε τιμή μικρότερη της $V_y = M_y / L_s$. Παρόλο που αρχικά οι Εξ. (1) προσαρμόστηκαν σε μία βάση δεδομένων κυρίως υποστυλωμάτων, με μόνο 25

τοιχώματα, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και για μία μεγαλύτερη ομάδα λυγηρών τοιχωμάτων ($4.1 \geq L_s/h > 1.0$) – ομάδα ST στον Πίνακα 1 – που αστόχησαν σε λοξό εφελκυσμό μετά τη διαρροή. Τα προσομοιώματα των Kowalsky and Priestley (2000) και Moehle et al. (2001), έχουν προσαρμοστεί σε βάση δεδομένων υποστυλωμάτων με διατμητική αστοχία (ορθογωνικά ή κυκλικά, αντίστοιχα), δίνουν διάμεσο των λόγων πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών για τα τοιχώματα της Ομάδας ST 0.8 και 0.89, αντίστοιχα, και συντελεστές μεταβλητότητας 23.6% και 31.6%, που συγκρίνονται με τις τιμές 1.015 και 20.8% ή 1.04 και 20.0% που δίνουν οι Εξ. (1).

Πίνακας 1: Στατιστικά μεγέθη λόγων πειραματικής και εκτιμώμενης διατμητικής αντοχής

Test-to-prediction ratio	Πλήθος	Στατιστικά μεγέθη *			lognormal	
		μ.ο.	διάμεσος	CoV %	m_{ln}	σ_{ln}
1 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(1a)}$ FST-R	39	0.98	1.0	17.2	0.96	0.185
2 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(1a)}$ FST-NR	57	1.12	1.09	19.9	1.05	0.21
3 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(1a)}$ FST-All	96	1.06	1.04	20.0	1.015	0.2
4 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(2)}$ SC-R	7	0.83	0.9	21.4	0.815	0.21
5 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(2)}$ SC-NR	55	1.02	1.01	12.4	1.01	0.115
6 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(2)}$ SC-All	62	1.0	1.0	14.5	0.99	0.15
7 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(3)-(6)}$ SQ-R, “φυσικό” προσομοίωμα	96	1.1	1.08	28.7	1.02	0.245
8 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(3)-(6)}$ SQ-NR, “φυσικό” προσομοίωμα	223	1.03	0.985	29.3	0.99	0.275
9 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(3)-(6)}$ SQ-All, “φυσικό” προσομοίωμα	319	1.05	1.01	29.25	0.995	0.27
10 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(7)}$ SQ-R, “εμπειρικό” προσομοίωμα	96	1.03	1.01	22.7	0.99	0.225
11 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(7)}$ SQ-NR, “εμπειρικό” προσομοίωμα	233	0.99	1.01	21.7	0.96	0.23
12 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(7)}$ SQ-All, “εμπειρικό” προσομοίωμα	329	1.0	1.01	22.1	0.97	0.23
13 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(8)}$ SLS-R, τροποποιημένο ACI model	32	1.05	0.95	35.6	0.99	0.34
14 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(8)}$ SLS-NR, τροποποιημ. ACI model	24	1.065	1.03	24.9	1.05	0.24
15 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(8)}$ SLS-All, τροποποιημένο ACI model	56	1.06	0.99	31.2	1.015	0.305
16 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(9)}$ SLS-R, τροποποιημένο <i>fib</i> model	32	1.1	0.98	38.9	1.02	0.37
17 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(9)}$ SLS-NR, τροποποιημένο <i>fib</i> model	24	1.07	1.025	25.2	1.06	0.25
18 $V_{R,exp}/V_{R,E\acute{\epsilon}(9)}$ SLS-All, τροποποιημένο <i>fib</i> model	56	1.09	0.98	33.6	1.04	0.325
19 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ SLS-R, τροποποιημένο EC8 model	32	1.08	1.07	33.3	1.025	0.305
20 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ SLS-NR, τροποποιημένο EC8 model	24	1.0	0.97	24.8	0.995	0.225
21 $V_{R,exp}/V_{R,pred}$ SLS-All, τροποποιημένο EC8 model	56	1.05	1.01	30.1	1.01	0.275

FST-X: αστοχία σε λοξό εφελκυσμό μετά τη διαρροή	XY-R: rectangular walls
SC-X: αστοχία σε λοξή θλίψη ($1 < L_s/h < 2.5$)	XY-NR: non-rectangular walls
SQ-X: “κοντά” τοιχώματα ($L_s/h < 1.2$)	XY-All: all walls
SLS-X: διατμητική αστοχία ολίσθησης μετά τη διαρροή	

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

Η διατμητική αντοχή των τοιχωμάτων σε λοξή θλίψη μειώνεται σημαντικά με την ανακύκλιση, ειδικά αφού το τοίχωμα διαρρεύσει. Εξαιτίας αυτής της απομείωσης, ο Ευρωκώδικας 8 καθορίζει τη διατμητική αντοχή τοιχωμάτων ΟΣ Υψηλής Κατηγορίας Πλαστιμότητας (Ductility Class High (H)) ως το 40% της τιμής που

δίνεται στον Ευρωκώδικα 2 για μονοτονική φόρτιση. Οι Biskinis et al. (2004) ανέπτυξαν ένα εμπειρικό προσομοίωμα για τη διατμητική αντοχή 45 τοιχωμάτων με $2.5 \geq L_s/h > 1.0$ που αστόχησαν σε λοξή θλίψη:

$$V_{R,SC} = 0.85 \left(1 - 0.06 \min \left(5; \mu_{\theta}^{pl} \right) \right) \left(1 + 1.8 \min \left(0.15; \frac{N}{A_c f_c} \right) \right) \left(1 + 0.25 \max \left(1.75; 100 \rho_{tot} \right) \right) \left(1 - 0.2 \min \left(2; \frac{L_s}{h} \right) \right) \sqrt{f_c} b_w z \quad (2)$$

Η Εξ. (2) προσαρμόζεται επίσης και σε περίπου 10 τοιχώματα διατομής Η- ή Τ-ανακυκλιζόμενης φόρτισης που αστόχησαν σε λοξή θλίψη πριν τη διαρροή, οπότε, μπορεί να θεωρηθεί ότι εφαρμόζεται επίσης (με $\mu_{\theta}^{pl} = 0$) για διατμητική αστοχία πριν τη διαρροή. Παρόλο που στην παρούσα βάση τοιχωμάτων τα πειράματα με αυτόν τον τρόπο αστοχίας είναι 40% περισσότερα από την αντίστοιχη των Biskinis et al. (2004), η Εξ. (2) περιγράφει καλά τη διατμητική τους αντοχή, όπως φαίνεται απ' τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές $V_{R,SC}$ στον Πίνακα 1. Ο ίδιος πίνακας δίδει επίσης τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής (lognormal distribution) που προσαρμόζεται στους λόγους πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών διατμητικής αντοχής, ώστε να μπορεί να οριστεί η πιθανότητα να ξεπεραστεί η εκτιμώμενη τιμή από την πειραματική.

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ “ΚΟΝΤΩΝ” ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Η διατμητική αντοχή των παραπάνω προσομοιωμάτων δείχνει συστηματικό σφάλμα σε σχέση με την πειραματική αντοχή τοιχωμάτων με L_s/h περίπου ίσο με 1.0 ή μικρότερο: οι Εξ. (1) την υποεκτιμούν αξιοσημείωτα, ενώ η Εξ. (2) την υπερεκτιμά. Οπότε, εκτός από λίγα τοιχώματα με τιμές L_s/h ελάχιστα πάνω από 1.0 – των οποίων η διατμητική τους αστοχία εκτιμάται ικανοποιητικά από τις Εξ. (1) ή (2) – τα τοιχώματα της βάσης που έχουν $L_s/h \leq 1.2$ και δεν αστόχησαν λόγω ολίσθησης (βλέπε παρακάτω ομαδοποιούνται ξεχωριστά, ως “κοντά” τοιχώματα σε διάτμηση (squat) (Ομάδα SQ στον Πίνακα 1), από τα οποία τα μισά αστόχησαν διατμητικά μετά τη διαρροή και τα υπόλοιπα διατμητικά πριν διαρρεύσουν. Σημειώνεται ότι στον ASCE (2005) θεωρούνται “κοντά” τα τοιχώματα με $L_s/h < 1.5$. Ένα φυσικό προσομοίωμα διατμητικής αντοχής και ένα πλήρως εμπειρικό προσαρμόζονται στα πειράματα “κοντών” τοιχωμάτων. Η διατμητική αντοχή των “κοντών” τοιχωμάτων σύμφωνα με τα προσομοιώματα αυτής της ενότητας δεν επηρεάζεται από το μέγεθος των ανελαστικών παραμορφώσεων ανακυκλιζόμενης φόρτισης μετά τη διαρροή (μετελαστικές παραμορφώσεις). Πράγματι, αρκετά “κοντά” τοιχώματα στη βάση αστόχησαν πριν τη διαρροή. Τα υπόλοιπα αστόχησαν διατμητικά σε χαμηλούς δείκτες πλαστιμότητας. Οπότε, τα διαθέσιμα δεδομένα δεν υποστηρίζουν μία μείωση της αντοχής με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας.

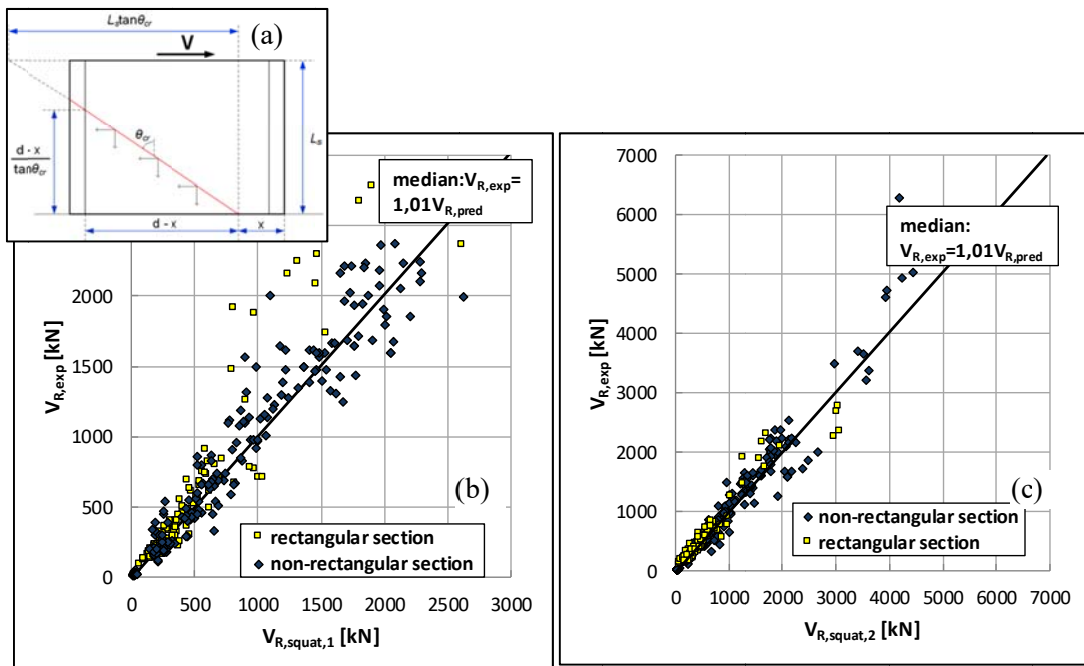
Φυσικό προσομοίωμα

Σύμφωνα με το φυσικό προσομοίωμα, το σκυρόδεμα συνεισφέρει με δύναμη V_c στη διατμητική αντοχή ενός “κοντού” τοιχώματος και ο οπλισμός με δύναμη V_s :

$$V_{R,squat,1} = V_c + V_s \quad (3)$$

Πολύ συχνά η κυρίαρχη διαγώνια ρωγή σε ένα “κοντό” τοίχωμα δεν διαπερνά το πλήρες ύψος της διατομής και είναι χαμηλότερη απ’ ότι σε ένα λυγρό τοίχωμα (δηλαδή, σε μία γωνία μεγαλύτερη από 45° ως προς την κατακόρυφο, βλέπε Σχήμα 1(α)). Οπτική παρατήρηση των ρηγματώσεων σε 72 πειράματα δείχνουν μία μέση τάση αυτής της γωνίας (σε μοίρες) συναρτήσει του λόγου διάτμησης που περιγράφεται από τη σχέση:

$$\theta_{cr} (^\circ) = 60^\circ - 15L_s / h \geq 45^\circ \quad (4)$$



Σχήμα 1: “Κοντά” τοιχώματα (Ομάδα SQ στον Πίνακα 1): (α) Εγκάρσιος και διαμήκης οπλισμός κορμού που διαπερνάται από την κυρίαρχη ρωγή, (β) πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές από τις Εξ. (3)-(6) και (β) αντίστοιχα από τις Εξ. (7)

Το V_s ελέγχεται από τον οπλισμό που διαπερνάται από μία διαγώνια ρωγή που ξεκινά από τον ουδέτερο άξονα (Σχήμα 1(α)). Εάν οι λόγοι εγκάρσιου και διαμήκους οπλισμού κορμού είναι $\rho_w = A_{sw}/b_w s_h$, $\rho_v = A_{sv}/b_w s_v$, τότε:

$$V_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \rho_h b_w \min((d-x)/\tan \theta_{cr}, L_s) f_{yh} \\ (\rho_v b_w \min(L_s \tan \theta_{cr}, d-x) f_{yv} + A_s f_y) / \tan \theta_{cr} \end{array} \right\} \quad (5)$$

όπου η δεύτερη γραμμή περιγράφει ένα άνω όριο στην τιμή λόγω διαρροής των διαμήκων ράβδων που διαπερνώνται από τη ρωγμή. Η συνεισφορά του σκυροδέματος, V_c , βασίζεται στην τιμή της διατμητικής τάσης στο κέντρο βάρους της αρηγμάτωτης διατομής, η οποία, δρώντας μαζί με το αξονικό φορτίο, N , εξαντλεί την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, f_{ct} , στην κύρια διεύθυνση τάσεων. Αυτό δίνει τον τελευταίο όρο στην Εξ. (6), όπου ο συντελεστής $2/3$ μετατρέπει τη μέγιστη διατμητική τάση στο κέντρο βάρους της διατομής σε μία μέση τιμή της επιφάνειας της αρηγμάτωτης διατομής, A_c . Οι δύο πρώτοι όροι είναι εμπειρικοί διορθωτικοί συντελεστές που προέκυψαν με στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να λάβουν υπόψη την επιρροή του ποσοστού εφελκυσμένου οπλισμού, ρ , και του λόγου διάτμησης. Για την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος έχει ληφθεί $f_{ct}=0.3f_c^{2/3}$ (fib 2012).

$$V_c = (1+150\rho) \left(1 - 0.725 \frac{L_s}{h} \right) \left(\frac{2}{3} A_c f_{ct} \sqrt{1 + \frac{N}{A_c f_{ct}}} \right) \quad (6)$$

Το προσομοίωμα των Εξ. (3)-(6) εφαρμόζεται για $0.25 \leq L_s/h \leq 1.2$.

Εμπειρικό προσομοίωμα

Ένα εμπειρικό προσομοίωμα προσαρμόστηκε από τους Gulec and Whittaker [2011] στη μέγιστη διατμητική αντοχή 227 “κοντών” τοιχωμάτων (μερικά από τα οποία δοκιμάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση). Χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους, ο ίδιος τύπος προσομοιώματος προσαρμόζεται εδώ στη δύναμη στη γωνία μιας διγραμμικής εξιδανίκευσης της περιβάλλουσας των διαγραμμάτων υστέρησης σε μία μεγαλύτερη βάση δεδομένων, αποκλειστικά πειραμάτων ανακυκλιζόμενης φόρτισης, που περιέχει τοιχώματα με $L_s/h \leq 1.2$:

– Ορθογωνικά τοιχώματα:

$$V_{R,squat,2} = \frac{0.035 A_{c,eff} f_c + 0.32 A_{sv} f_{yv} + 0.18 A_{sh} f_{yh} + 0.17 A_{sy} f_y + 0.2N}{\sqrt{L_s/h}} \leq 1.3 \sqrt{f_c} A_{c,eff} \quad (7a)$$

– Τοιχώματα διατομής H- ή T-:

$$V_{R,squat,2} = \frac{0.04 A_{c,eff} f_c + 0.225 A_{sv} f_{yv} + 0.1 A_{sh} f_{yh} + 0.3 A_{sy} f_y + 0.25N}{\sqrt{L_s/h}} \leq 1.3 \sqrt{f_c} A_{c,eff} \quad (7b)$$

(με το A_s να δηλώνει την επιφάνεια του εφελκυσμένου οπλισμού). Όπως στους Gulec and Whittaker [2011], το $A_{c,eff}$ είναι η επιφάνεια του κορμού, αυξημένη κατά την επιφάνεια των πελμάτων που ορίζεται από μια απόσταση ίση με το μισό του μήκους διάτμησης L_s από τον κεντροβαρικό άξονα του κορμού, αλλά όχι μεγαλύτερη από το ύψος της διατομής h . Σε ορθογωνικά ή τοιχώματα με πέλματα μικρού πλάτους (barbelled) ισχύει $A_{c,eff}=A_c$. Αντίθετα με τις Εξ. (3)-(6), οι Εξ. (7) εφαρμόζονται και για τιμές του L_s/h μικρότερες του 0.25.

Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

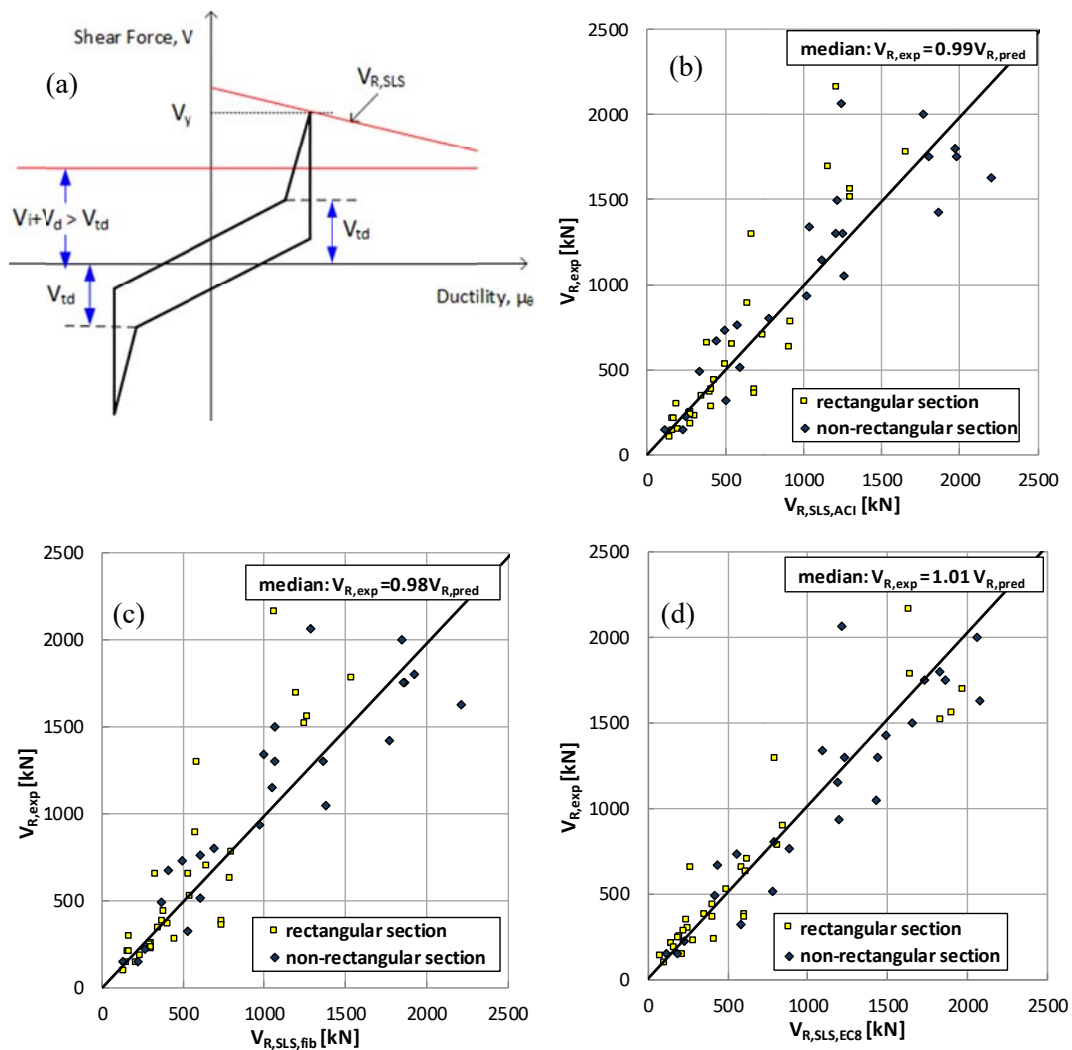
Το Σχήμα 1 συγκρίνει τις πειραματικές τιμές της διατμητικής αντοχής των “κοντών” τοιχωμάτων με τις εκτιμώμενες των παραπάνω δύο προσομοιώματων. Ο Πίνακας 1 δίνει τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές και τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής που προσαρμόζεται στους λόγους πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών διατμητικής αντοχής. Το εμπειρικό προσομοίωμα επιτυγχάνει καλύτερη σύγκλιση με τις πειραματικές τιμές. Για σύγκριση, τα προσομοιώματα ASCE (2005) και Barda et al. (1977) δίνουν διάμεσο των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές ίση με 0.7 και 0.77, αντίστοιχα και συντελεστή μεταβλητότητας (CoV) 39.5% και 37.5%. Αντίθετα, το προσομοίωμα των Gulec and Whittaker (2011) δίνει διάμεσο 0.875 και CoV 29%.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Αφού το τοίχωμα διαρρέυσει σε θετική και αρνητική κάμψη, η διατομή βάσης του ρηγματώνεται σε όλο το μήκος της. Με τη συνέχιση της ανακύκλισης, οι εφελκυστικές πλαστικές παραμορφώσεις συσσωρεύονται στις διαμήκεις ράβδους που έχουν διαρρέυσει, αναγκάζοντας τη ρωγμή να παραμείνει ανοιχτή καθ’ όλη την έκταση της διατομής βάσης, μέχρι η δρώσα ροπή να γίνει αρκετά μεγάλη για να προκαλέσει διαρροή των εξωτερικών θλιβόμενων ράβδων και να αντιστρέψει τις πλαστικές εφελκυστικές παραμορφώσεις ώστε η ρωγμή να κλείσει. Με το κλείσιμο της ρωγμής, η επαναφόρτιση γίνεται με μεγαλύτερη δυσκαμψία. Αυτό απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2(a) στην ενδιάμεση γωνία ενός διαγράμματος υστέρησης με βρόχους που παρουσιάζουν στένωση (pinching) όπου ο κλάδος επαναφόρτισης έχει μεγαλύτερη κλίση. Η δρώσα ροπή σ’ αυτό το σημείο ορίζεται ως M_{id} , η αντίστοιχη τέμνουσα ως $V_{id}=M_{id}/L_s$. Εάν η αντοχή σε ολίσθηση χωρίς τριβή, $V_{R,SLS,pred}$, είναι μικρότερη από την V_{id} , το τοίχωμα μπορεί να ολισθήσει κατά μήκος της ακόμα ανοιχτής διατομής βάσης κατά τη διάρκεια ενός μεταελαστικού κύκλου πριν σημειωθεί το μέγιστο φορτίο. Αυτό ορίζεται ως “πρώιμη ολίσθηση” και αναπτύσσεται αναλυτικότερα απ’ τους Grammatikou et al 2015. Εάν το τοίχωμα ξεπεράσει το σημείο όπου μπορεί να συμβεί “πρώιμη ολίσθηση”, αναπτύσσεται τριβή στην θλιβόμενη ζώνη. Το τοίχωμα μπορεί να αστοχήσει διατμητικά λόγω ολίσθησης στη βάση αργότερα, εάν η συνολική διατμητική αντοχή σε ολίσθηση, $V_{R,SLS(\mu\theta)}$, λάβει τιμή μικρότερη της $V_y=M_y/L_s$ (Σχήμα 2(a)). Αυτή η πλήρης και τελική διατμητική αντοχή σε ολίσθηση αντιμετωπίζεται παρακάτω. Η διατμητική αστοχία λόγω ολίσθησης είναι πιθανή μόνον αφού η βάση διαρρέυσει, μπορεί, επίσης, να συμβεί σε “κοντά” τοιχώματα που έχουν διαρρέυσει πριν φτάσουν τη διατμητική τους αντοχή $V_{R,squat}$. Πράγματι, κάποια από τα τοιχώματα με αστοχία λόγω ολίσθησης έχουν $L_s/h < 1.2$.

Τροποποίηση προσομοιώματος διατμητικής αντοχής σε τριβή του ACI-318

Το προσομοίωμα διατμητικής αντοχής σε τριβή (shear friction) του ACI-318 (ACI 2008) τροποποιείται εδώ ως εξής:



Σχήμα 2: Διατμητική ολίσθηση: (α) γραφική αναπαράσταση “πρώιμης” και πλήρους ολίσθησης, (β) πειραματικές και εκτιμώμενες από την Εξ. (8) – τροποποιημένη ACI-318; (c) αντίστοιχα από την Εξ. (9) – τροποποιημένη *fib* MC2010, και (d) αντίστοιχα απ’ της Εξ. (10)-(13) – τροποποιημένο EC8 model.

$$V_{R,SLS,ACI} = (1 - 0.02\mu_{\theta}^{pl}) \min(\sum [A_s f_y (\mu \sin \phi + \cos \phi)] + \mu N; \beta f_c A_c), \quad \beta = 0.1, \quad \mu = 0.625 \quad (8)$$

όπου οι συντελεστές β και μ λαμβάνονται ίσοι με: $\beta = 0.1$ και $\mu = 0.625$. Το άθροισμα επεκτείνεται σε όλες τις ράβδους οπλισμού που διαπερνούν τη διατομή βάσης υπό γωνία ϕ ως προς το επίπεδό της: διαδιαγώνιος οπλισμός με επιφάνεια A_{si} και διαμήκης με επιφάνεια A_s, A_s', A_{sv} και $\phi=90^\circ$. Ο 1^ο όρος της Εξ. (8) εκφράζει τη μείωση λόγω ανελαστικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης, με $\mu_{\theta}^{pl} = \mu_{\theta} - 1$. Το προσομοίωμα ACI-318 για μονοτονική φόρτιση δεν έχει τον 1^ο όρο,

χρησιμοποιεί $\beta=0.2$ και προσδιορίζει το συντελεστή τριβής μ από 0.6 (για διεπιφάνειες που δεν έχουν εκτραχυνθεί σκοπίμως) μέχρι 1.4 (για μονολιθικό σκυρόδεμα). Η χαμηλότερη τιμή $\mu=0.6$ δίνει διάμεσο 0.83 για τους λόγους πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών των 56 τοιχωμάτων που αστόχησαν διατμητικά λόγω ολίσθησης και συντελεστή μεταβλητότητας 39.6%. Η προτεινόμενη τροποποίηση, Εξ. (8), βελτιώνει αισθητά τη συμφωνία με τις πειραματικές τιμές (βλέπε τα σχετικά στατιστικά μεγέθη στον Πίνακα 1 και τη σύγκριση στο Σχήμα 2(b)).

Τροποποίηση προσομοιώματος του fib MC2010

Το προσομοίωμα για την τριβή μεταξύ διεπιφανειών υπό μονοτονική φόρτιση στον *fib* (2012) επεκτείνεται εδώ για μετελαστική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η διατμητική αντοχή λαμβάνεται να μειώνεται με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας, μ_{θ}^{pl} , σύμφωνα με τον 1^ο όρο της Εξ. (9). Το υπόλοιπο δεξιό μέλος της Εξ. (9) είναι το μονοτονικό προσομοίωμα στον *fib* (2012) όπου c_r είναι ο συντελεστής για την αλληλοεμπλοκή των αδρανών, μ ο συντελεστής τριβής, β_c ο συντελεστής για τη μείωση του διαγώνιου θλιπτήρα, με τιμές από 0 έως 0.2, από 0.5 έως 1.0 και από 0.3 έως 0.5, αντίστοιχα, για λείες έως πολύ τραχείς διεπιφάνειες. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης κ_1 and κ_2 αφορούν τη λειτουργία σφικτήρα και τη δράση βλήτρου του οπλισμού και είναι ίσες με $\kappa_1=0$, $\kappa_2=1.5$ για πολύ λείες διεπιφάνειες, $\kappa_1=0.5$, $\kappa_2=1.1$ για λείες, $\kappa_1=0.5$, $\kappa_2=0.9$ για τραχείες ή πολύ τραχείες. Σύμφωνα με τον *fib* (2012), αυτές οι τιμές μειώνονται κατά 40% για δυναμικά φορτία (συμπεριλαμβανομένου και το σεισμού).

$$V_{R,SLS, fib} = (1 - 0.025 \mu_{\theta}^{pl}) \cdot \min \left(c_r f_c^{\frac{1}{3}} A_c + \kappa_1 \sum A_s f_y (\mu \sin \varphi + \cos \varphi) + \mu N + \kappa_2 \sum A_s \sqrt{f_c f_y} \sin \varphi; 0.5 \beta_c \min \left(0.55; 0.55 \left(\frac{30}{f_c} \right)^{\frac{1}{3}} \right) f_c A_c \right) \quad (9)$$

(με f_c στον πρώτο και τελευταίο όρο σε MPa). Το προσομοίωμα *fib* (2012) για μονοτονική φόρτιση και με τιμές συντελεστών για λείες διεπιφάνειες (αντιπροσωπευτικό της συνολικής ρηγματωμένης διατομής βάσης μετά από λίγους κύκλους φόρτισης) δίνει διάμεσο πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών 0.84 και συντελεστή μεταβλητότητας 41%. Η 40% μείωση για δυναμικά φορτία δίνει διάμεσο 1.4. Με τις τιμές των συντελεστών για λείες διεπιφάνειες του *fib* [2012] που αφορούν μονοτονική φόρτιση (δηλαδή, $c_r=0$, $\mu=0.6$, $\beta_c=0.4$, $\kappa_1=0.5$, $\kappa_2=1.1$) και το μειωτικό συντελεστή λόγω μ_{θ}^{pl} στον 1^ο όρο, η συμφωνία είναι ικανοποιητική (βλέπε τα σχετικά στατιστικά μεγέθη του Πίνακα 1 και τη σύγκριση στο Σχήμα 2(c)).

Προσομοίωμα βασιζόμενο στον Ευρωκώδικα 8-Μέρος 1

Στον CEN (2004) η διατμητική αντοχή σε ολίσθηση είναι το άθροισμα της συνεισφοράς του διςδιαγώνιου οπλισμού, V_i , της τριβής, V_f , και της δράσης βλήτρου, V_d :

$$V_{R,SIS,EC8} = V_i + V_f + V_d \quad (10)$$

$$V_i = \sum A_{si} f_{yi} \cos \varphi \quad (11)$$

όπου $\sum A_{si}$ η συνολική επιφάνεια του δισδιαγώνιου οπλισμού που διαπερνά τη διατομή βάσης με γωνία $\pm \varphi < 90^\circ$. Τα μεγέθη V_i και V_f εμφανίζονται και στις Εξ. (8) και (9), το V_d εμφανίζεται στην Εξ. (9) αλλά όχι στην Εξ. (8). Στο προτεινόμενο τροποποιημένο προσομοίωμα του CEN (2004) διατηρούνται οι Εξ.(10) και (11) και τροποποιείται ο όρος που αφορά της τριβή ως εξής:

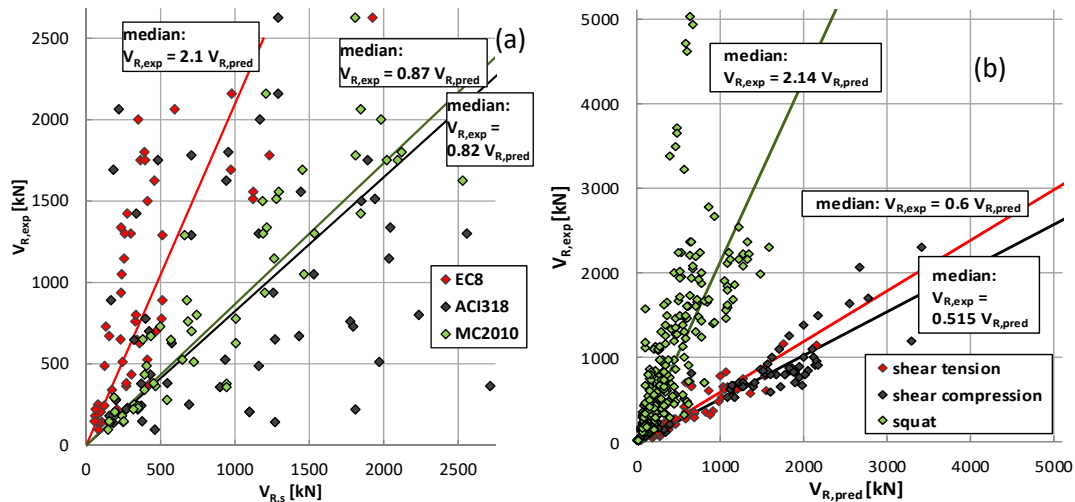
$$V_f = \min\left(\mu\left[\left(\sum A_{sv} f_{yv} + N\right)\xi + M_y / z\right]; 0.3 f_c A_{compr}\right) \quad (12)$$

με το μ να αυξάνεται στο 0.8, καθ' όλον το μήκος της θλιβόμενης ζώνης επειδή η ρωγή έχει κλείσει και βρίσκεται υπό υψηλά ποσοστά θλίψης. Το A_{compr} στον τελευταίο όρο λαμβάνεται τώρα ως η συνολική επιφάνεια της θλιβόμενης ζώνης, ορθογωνική ή μη. Η τιμή της A_{compr} και το $\xi = x/d$, στον πρώτο όρο, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν ότι το ύψος του ουδέτερου άξονα μειώνεται καθώς η διατομή προχωρά από τη διαρροή στην καμπτική οριακή του κατάσταση. Οι τιμές του ξ στα δύο στάδια, ξ_y , ξ_u , υπολογίζονται από ανάλυση της διατομής, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα τις εξισώσεις των Panagiotakos and Fardis (2001), Biskinis and Fardis (2010), σε συνδυασμό με τις οριακές παραμορφώσεις υλικών των Grammatikou et al (2016). Οι γωνίες στροφής χορδής σ αυτά τα δύο στάδια, θ_y , θ_u , μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τους Grammatikou et al (2017a), (2017b). Η τιμή του ξ που χρησιμοποιείται στην Εξ. (12) για μία δεδομένη απαιτούμενη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, $\theta = \mu_\theta \theta_y$, υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ξ_y , ξ_u , και θ_y , θ_u . Η ίδια τιμή του ξ χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το A_{compr} . Οπότε στην Εξ. (12) μειώνεται τελικά το V_f με την αύξηση του μ_θ . Καλύτερη συμφωνία με τις πειραματικές τιμές επιτυγχάνεται λαμβάνοντας τη συνεισφορά της δράσης βλήτρου, V_d , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, όπου συμμετέχει μόνο ο οπλισμού κορμού, με εμβαδόν, A_{sv} :

$$V_d = 1.6 A_{sv} \sqrt{f_c f_{yv}} \leq A_{sv} f_{yv} / \sqrt{3} \quad (13)$$

Τα αποτελέσματα του ως άνω προσομοιώματος, συγκρίνονται στο Σχήμα 2(d) με την πειραματική διατμητική αντοχή σε ολίσθηση των τοιχωμάτων που εμφάνισαν τον συγκεκριμένο τρόπο αστοχίας. Ο Πίνακας 1 δίνει τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών και εκτιμώμενων $V_{R,SLS}$. Τα Σχήματα 2(b)-(d) και οι σχετικές γραμμές στον Πίνακα 1 δείχνουν ότι το τροποποιημένο προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 8 προσαρμόζονται καλύτερα στα πειραματικά αποτελέσματα, είναι, όμως, το πολυπλοκότερο από τα τρία. Το τροποποιημένο ACI 318 είναι το απλούστερο και σχεδόν το ίδιο ακριβές. Το Σχήμα 3 συγκρίνει τα ίδια πειραματικά δεδομένα με τις εκτιμώμενες τιμές των πρωτότυπων

προσομοιωμάτων. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε με τις τροποποιήσεις είναι εμφανής.



Σχήμα 3: Πειραματική διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και εκτιμώμενες τιμές άλλων προσομοιωμάτων: (α) πρωτότυπων προσομοιωμάτων από τους ACI 3-18-05, *fib* MC2010 ή EC8 για τα τοιχώματα με διατμητική αστοχία λόγω ολίσθησης, (β) προσομοιώματα EC8 για “κοντά” τοιχώματα ή για λυγηρά για Κατηγορία Πλαστιμότητας M ή L για αστοχία σε λοξό εφελκυσμό ή λοξή θλίψη.

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”. Τα δεδομένα για περίπου 200 “κοντά” τοιχώματα παρασχέθησαν απ’ τον καθ. A. Whittaker, SUNY Buffalo.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ACI Committee 318 (2008) *Building code requirements for structural concrete and commentary* (ACI 318-08). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- American Society of Civil Engineers (2005) *Seismic design Criteria for Structures, Systems and Components in Nuclear Facilities* (ASCE/SEI 43-05), ASCE, Reston, VA.
- Barda F, Hanson JM, Corley WG (1977) Shear strength of low rise walls with boundary elements. Reinforced Concrete in Seismic Zones, SP-53, *ACI*

- Special Publication*, 149-202.
- 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, Roupakias G, Fardis MN (2004) Degradation of shear strength of RC members with inelastic cyclic displacements. *ACI Struct. J*; 101(6):773-783.
- CEN (2004). *European Standard EN1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- CEN (2005). *European Standard EN1998-3:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- fib (2012) *Model Code 2010*, Final draft. Bull. 65/66, Federation Internationale du Beton, Lausanne.
- Grammatikou, S., Biskinis, D., and Fardis, M.N. (2015). Strength, deformation capacity and failure modes of RC walls under cyclic loading. *Bull. Earthq. Eng.*, Volume 13, Issue 11, Page 3277-3300.
- Grammatikou, S., Biskinis, D. and Fardis M.N. (2016) Ultimate strain criteria for RC members in monotonic or cyclic flexure. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 142(9).
- 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.
- Kowalsky MJ, Priestley MJN (2000) Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions. *ACI Structural J*. 97(3):388-396
- Moehle J, Lynn A, Elwood K, Sezen H (2001) Gravity load collapse of building frames during earthquakes. PEER Report: 2nd US-Japan Workshop on Performance-based Design Methodology for Reinforced Concrete Building Structures. PEER Center, Richmond, CA.
- Panagiotakos TB, Fardis MN (2001) Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate, *ACI Structural J* 98(2):135-148.