

Καμπτική Συμπεριφορά Μελών Ο.Σ. με Λείες Ράβδους Διαμήκους Οπλισμού

Flexural Behavior of RC Members with Smooth Bars as Longitudinal Reinforcement

Σοφία ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΥ¹, Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ², Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ικανότητα παραμόρφωσης, μάτιση
Keywords: cyclic loading, deformation capacity, lap-splice

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι λείες ράβδοι είναι πολύ συνηθισμένες σε παλαιά κτίρια ΟΣ τόσο στον Ελλαδικό χώρο όσο και σε άλλες χώρες της Ευρώπης και της Ασίας. Παρά όλα αυτά, μέχρι σχετικά πρόσφατα δεν είχε μελετηθεί η επιρροή τους στη συμπεριφορά μελών ΟΣ υπό σεισμική φόρτιση. Ακόμα και τώρα ο Αμερικάνικος Κανονισμός για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς παλαιών κατασκευών, ASCE41-06, δεν περιλαμβάνει ειδικές διατάξεις για λείες ράβδους, ενώ οι κανόνες του Ευρωκώδικα 8 – μέρος 3 βασίζονταν σε λίγα πειράματα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται “φυσικά” και ημι-εμπειρικά προσομοιώματα υπολογισμού της: (α) επιβατικής (“ενεργού”) δυσκαμψίας, από τη ροπή διαρροής και τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή και (β) της μέγιστης γωνίας στροφής χορδής για 20% πτώση της αντοχής. Τα προσομοιώματα αξιολογούνται και βαθμονομούνται με τη χρήση 152 πειραματικών αποτελεσμάτων από δοκιμές μελών Ο.Σ. με λείες ράβδους διαμήκους οπλισμού, με ή χωρίς μάτιση. Εξετάζεται επίσης η επιρροή της περίσφιγξης με μανδύα Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ), όπου αξιοποιούνται 42 πειράματα αυτού του τύπου.

ABSTRACT: Smooth (plain) bars are very common in old RC buildings in Greece and in other countries in Europe and Asia. Nevertheless, until recently, their influence on the seismic behavior of RC members was not studied. Even now, the American Standard for the assessment of the seismic behavior of old structures, ASCE41-06, does not include any special provision for smooth bars, while the rules in Eurocode 8 - Part 3 are based on few experiments. In the present study "physical" and semi-empirical models are presented for the estimation of: (a) secant stiffness to the yield point and (b) ultimate chord rotation for 20% strength degradation. The proposed models are evaluated and calibrated using 152 tests of RC members with smooth bars, with or without lap-splices. The influence of FRP wrapping is also examined, utilizing 42 experiments of this type.

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

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

³Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Πανεπιστήμιο Πατρών / Ακαδημαϊκός Υπότροφος, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών ΤΕ, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, email: dbisk@tee.gr

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕΛΩΝ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΡΑΒΔΟΥΣ

Ροπή διαρροής και γωνία στροφής χορδής στη διαρροή δοκιμίων απλού προβόλου ή διπλού προβόλου

Η ροπή διαρροής, M_y , δοκιμίων τύπου απλού ή διπλού προβόλου (Σχήμα 1(α) και (β)) με συνεχείς λείες ράβδους υπολογίζεται από ανάλυση διατομής με ελαστικούς νόμους των υλικών και διαρροή των εφελκόμενων ράβδων ως κριτήριο διαρροής. Οι εξισώσεις των Panagiotakos and Fardis (2001), Biskinis and Fardis (2010a) έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για δοκίμια τύπου προβόλου με συνεχείς ράβδους και μανδύες Ινοπλισμένων Πολυμερών ΙΟΠ, όπου ελήφθη επιρροή του μανδύα ΙΟΠ στη M_y μέσω του μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος, η τιμή του οποίου προκύπτει από την αυξημένη αντοχή σκυροδέματος λόγω του μανδύα ΙΟΠ (Biskinis and Fardis 2013).

Τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές ροπής διαρροής για τις δύο παραπάνω ομάδες δεδομένων παρατίθενται στις γραμμές 1 και 2 του Πίνακα 1 και υποδεικνύουν ότι η ανάλυση διατομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ροπή διαρροής μελών με συνεχείς λείες ράβδους, παράλληλη την ανεπαρκή συνάφεια των λείων ράβδων με το περιβάλλον σκυροδέμα, η οποία θέτει υπό αμφισβήτηση την υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών στη διατομή της μέγιστης ροπής. Στον ίδιο Πίνακα δίδονται τα αντίστοιχα στατιστικά μεγέθη για τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή και την επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναπτύσσονται παρακάτω. Η συμφωνία με τις πειραματικές τιμές κρίνεται ικανοποιητική, επιβεβαιώνοντας το προτεινόμενο προσομοίωμα ως ένα απλό εργαλείο για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων στη διαρροή.

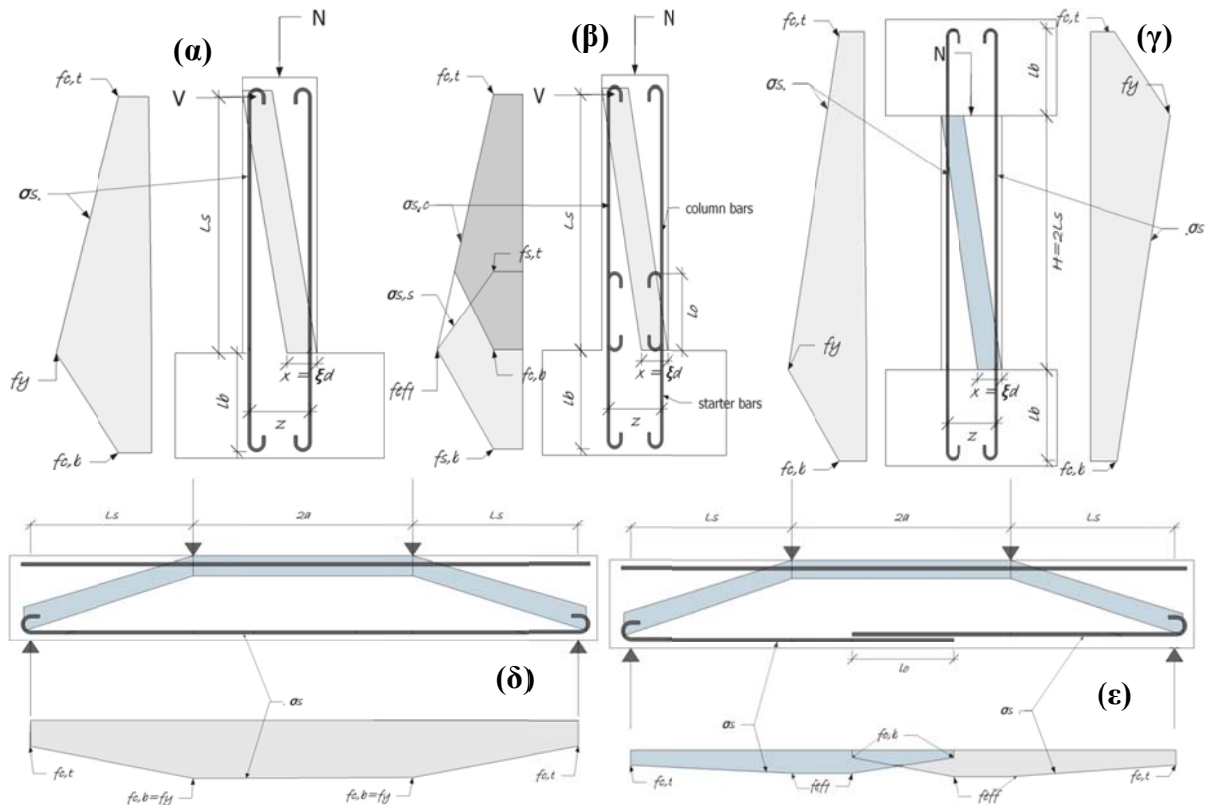
Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή στη διατομή της μέγιστης ροπής ενός προβόλου είναι η μετακίνηση στο ελεύθερο άκρο διαιρεμένη με το μήκος του προβόλου. Η τιμή στη διαρροή υπολογίζεται από το προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα του Σχήματος 1(α) ή Σχήματος 1(β), η οποία διέπεται από την αγκύρωση των άκρων των λείων ράβδων και την ανεπαρκή συνάφεια κατά μήκος της ράβδου. Σύμφωνα με τον *fib Model Code 2010 (fib 2012)*, η δύναμη που αγκυρώνεται από πρότυπο άγκιστρο στο άκρο ράβδου είναι ισοδύναμη με τάση ίση με 60 φορές την αντοχή σε συνάφεια, η οποία, για κατακόρυφες και οριζόντιες ράβδους, σύμφωνα με τον CEN (1994) ισούται με $0.36\sqrt{f_c}$ (σε MPa εάν η αντοχή του σκυροδέματος, f_c , είναι επίσης σε MPa). Η τάση στη ράβδο, η οποία αφού πολλαπλασιαστεί με τη διατομή της ράβδου δίνει τη δύναμη που αγκυρώνεται στο άγκιστρο, συμβολίζεται με f_o και ισούται με:

$$f_o(\text{MPa}) = 60 \times 0.36 \sqrt{f_c(\text{MPa})} = 22 \sqrt{f_c(\text{MPa})} \quad (1)$$

Στη διαρροή του προβόλου η τάση στις εφελκόμενες ράβδους στην περιοχή της μέγιστης ροπής ισούται με την τάση διαρροής, f_y . Θεωρείται γραμμική μεταβολή της τάσης της ράβδου μεταξύ της f_y στη διατομή ή στο μήκος του δοκιμίου όπου η ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της και $f_{c,t}$ (όπου c:column και t: top) στο

ελεύθερο άκρο του προβόλου. Η τάση στις εφελκόμενες ράβδους στο σημείο του μήκους τους όπου δεν επιτρέπεται η μετακίνησή τους (π.χ., στον άξονα συμμετρίας του διπλού προβόλου του Σχήματος 1(δ), ή στο άκρο της ράβδου στο θεμέλιο στο Σχήμα 1(α)) συμβολίζεται με $f_{c,b}$ (όπου b: bottom). Στα άγκιστρα η $f_{c,t}$ και η $f_{c,b}$ δίνονται από την Εξ. (1), ενώ σε ευθύγραμμα άκρα είναι ίσες με μηδέν. Η επιμήκυνση των εφελκόμενων ράβδων μέχρι να διαρρεύσουν στη διατομή της μέγιστης ροπής στο Σχήμα 1(α) ή Σχήμα 1(δ) προκαλεί μία στροφή χορδής στο πακτωμένο άκρο ίση με:

$$\theta_{y,\text{continuous,cantilever}} = \frac{f_y(L_s + l_b) + f_{c,b}l_b + f_{c,t}L_s}{2E_s z} \quad (2)$$



Σχήμα 1. Δοκίμια με λείες ράβδους: κατανομή τάσης χάλυβα στη διαρροή της κρίσιμης διατομής και προσομοιώματα θλιπτήρα-ελκυστήρα για (α) υποστύλωμα τύπου προβόλου με συνεχείς ράβδους, (β) υποστύλωμα τύπου προβόλου με ράβδους ενωμένες με παράθεση και άγκιστρα, (γ) αμφίπακτο υποστύλωμα με συνεχείς ράβδους, (δ) δοκό τύπου διπλού προβόλου με συνεχείς ράβδους, (ε) δοκό τύπου διπλού προβόλου με ράβδους ενωμένες με παράθεση και ευθύγραμμα άκρα.

όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και z η απόσταση εφελκόμενου – θλιβόμενου οπλισμού, l_b είναι το μήκος των εφελκόμενων

ράβδων μεταξύ του σημείου του μήκους τους όπου δεν επιτρέπεται η μετακίνηση τους (π.χ., στον άξονα συμμετρίας του διπλού προβόλου του Σχήματος 1(δ), η στο άκρο της ράβδου στο θεμέλιο στο Σχήμα 1(α)) και του σημείου όπου η ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (οπότε, το δοκίμιο τύπου διπλού προβόλου στο Σχήμα 1(δ) έχει $l_b=a$ και $f_{c,b}=f_y$). Θεωρώντας το σκυρόδεμα άκαμπτο, δηλαδή αγνοώντας την επιρροή της βράχυνσης του θλιπτήρα, η Εξ. (2) δίνει την γωνία στροφής χορδής στη διαρροή των δοκιμίων τύπου μονού ή διπλού προβόλου στα Σχήματα 1(α) και 1(δ).

Πίνακας 1 Στατιστικά μεγέθη πειραματικών προς εκτιμώμενων τιμών στη διαρροή

	Τύπος μέλους	# πειρ.	Μέση τιμή*	Διάμεσος*	CoV %
$M_{y,exp}/M_{y,pred}$	1 απλοί/διπλοί πρόβολοι με συνεχείς ράβδους	104	1.00	0.99*	14.7
	2 απλοί πρόβολοι, συνεχείς ράβδοι, μανδύες ΙΟΠ	18	0.95*	0.92	14.1
	3 αμφίπακτα υποστυλώματα, συνεχείς ράβδοι	10	(0.74)	(0.72)	10.7
	4 αμφίπακτα υποστυλώματα, συνεχείς ράβδοι, Εξ.(4),(5)	10	1.07*	1.06	14.5
	5 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα	28	1.00	0.99*	14.9
	6 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα και μανδύες ΙΟΠ	10	1.02*	0.95	18.2
	7 απλοί /διπλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα	20	0.98	0.97*	16.6
	8 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα, ΙΟΠ	4	0.99*	0.92	31.4
$\theta_{y,exp}/\theta_{y,pred}$	1 απλοί/διπλοί πρόβολοι με συνεχείς ράβδους	86	0.97	0.97*	29.1
	2 απλοί πρόβολοι, συνεχείς ράβδοι, μανδύες ΙΟΠ	18	1.01*	0.98	29.7
	3 αμφίπακτα υποστυλώματα με συνεχείς ράβδους	10	1.10*	1.02	16.2
	4 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα	28	0.86	0.82*	35.1
	5 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα και μανδύες ΙΟΠ	10	0.99*	0.93	17.9
	6 απλοί /διπλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα	20	1.03	0.98*	40.9
	7 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα, ΙΟΠ	4	1.00*	0.97	12.9
EI_{exp}/EI_{pred}	1 απλοί/διπλοί πρόβολοι με συνεχείς ράβδους	86	1.13	1.08*	35.6
	2 απλοί πρόβολοι, συνεχείς ράβδοι, μανδύες ΙΟΠ	18	1.00*	0.99	26.5
	3 αμφίπακτα υποστυλώματα με συνεχείς ράβδους	10	1.01*	0.98	29.1
	4 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα	28	1.23	1.20*	25.4
	5 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα και μανδύες ΙΟΠ	10	1.04*	1.04	15.5
	6 απλοί /διπλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα	20	1.10	0.98*	46.6
	7 απλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμο άκρα, ΙΟΠ	4	0.97*	0.95	18.2

* Οι τιμές με έντονα γράμματα αντιπροσωπεύουν τη μέση τάση: ο μέσος όρος για μικρά δείγματα, ο διάμεσος για μεγαλύτερους δείκτες.

Ροπή και γωνία στροφής χορδής στη διαρροή αμφίπακτων υποστυλωμάτων

Τα υποστυλώματα τύπου μονού προβόλου του Σχήματος 1(α) και συμμετρικές δοκοί (ή διπλοί πρόβολοι) όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 1(δ), επιλέγονται χάριν ευκολίας σε πειραματικές δοκιμές, αλλά δεν αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων ορόφων κτιρίου. Ο άξονας του θλιπτήρα σε ένα απλό προσομοίωμα ενός αμφίπακτου υποστυλώματος ορόφου κτιρίου διαπερνά τη διατομή της περίπτωση μηδενικής ροπής στο μέσον του ύψους του

(Σχήμα 1(γ)) και όχι στο κέντρο του εφελκόμενου οπλισμού. Επίσης, λόγω συμμετρίας (skew-symmetry) της γεωμετρίας και της φόρτισης, οι τάσεις στον οπλισμό των δύο αντίθετων πλευρών είναι αντιμετρικές ως προς το κέντρο της διατομής του υποστρώματος στο μέσο του ύψους του. Εάν η βράχυνση του θλιπτήρα αγνοηθεί, η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή του συμμετρικού αμφίπακτου υποστρώματος του Σχήματος 1(γ) ισούται με τη στροφή των δύο άκρων λόγω της μήκυνσης των κατακόρυφων ράβδων:

$$\theta_{y,\text{continuous,double fixity}} = \left(\frac{f_y + f_o}{2E_s} \right) \frac{H + 2l_b}{z} \quad (3)$$

Το αποτέλεσμα της Εξ. (3) είναι διπλάσιο από αυτό της Εξ. (2) για πρόβολο όπως αυτόν του Σχήματος 1(α), ο οποίος αντιπροσωπεύει το άνω ή κάτω μισό μήκος του αμφίπακτου. Αντιθέτως, εάν οι ράβδοι είχαν νευρώσεις, η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή του αμφίπακτου υποστρώματος, στο άνω και κάτω άκρο, θα ήταν ίσες με αυτές του άνω ή κάτω μισού μήκους. Οι ροπές διαρροής και αντοχής της μη αποφλοιωμένης διατομής είναι περίπου ίσες και δίνονται από την σχέση:

$$\frac{M_y}{bd^2 f_c} = \frac{M_R}{bd^2 f_c} = \omega_{tot} \left(1 - \frac{f_{c,b} + f_{c,t}}{2f_y} \right) \frac{H}{H + l_b} \frac{z}{4d} + \frac{(1 - \xi)\xi}{2(1 + (z/H)^2)} \quad (4)$$

όπου $\omega_{tot} = \rho_{tot} f_y / f_c = A_{s,tot} f_y / (bdf_c)$ και το ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης, $\xi = x/d$, υπολογίζεται από ισοροπία δυνάμεων στην κατακόρυφη διεύθυνση, υποθέτοντας ότι στο θλιπτήρα αναπτύσσεται θλιπτική τάση ίση με την αντοχή σκυροδέματος:

$$\xi = \left(\nu + \omega_{tot} \frac{H(1 + (f_{c,b} + f_{c,t})/2f_y)/2 + l_b}{H + l_b} \right) \left(1 + \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) \quad (5)$$

Τα στατιστικά μεγέθη του Πίνακα 1 επιβεβαιώνουν τις Εξ. (4) και (5), οι οποίες υπερτερούν της εφαρμογής της ανάλυσης διατομής για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής αμφίπακτων υποστρωμάτων με συνεχείς λείες ράβδους. Η ανάλυση διατομής υπερεκτιμά σημαντικά τη ροπή διαρροής.

Επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή

Μία πρωταρχική χρήση της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή είναι για τον υπολογισμό της ενεργού ελαστικής δυσκαμψίας του μήκους διάτμησης, $L_s = M/V$ (Panagiotakos and Fardis 2001, Biskinis and Fardis 2010, CEN 2005):

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{\theta_y} \frac{1}{3} \quad (6a)$$

Η Εξ. (6a) εφαρμόζεται σε μήκος διάτμησης L_s σταθερής τέμνουσας από το σημείο όπου η ροπή και η γωνία στροφής χορδής που σχετίζονται μέσω της ενεργού δυσκαμψίας σημειώνονται μέχρι το σημείο καμψής (μηδενικής ροπής). Εάν, μεταξύ του σημείου καμψής και της διατομής όπου ορίζονται η ροπή και γωνία στροφής χορδής που σχετίζονται μέσω της ενεργού δυσκαμψίας, υπάρχει

ένα μήκος L_s σταθερής τέμνουσας και ακολουθεί ένα μήκος a μηδενικής τέμνουσας (στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μισό του κεντρικού τμήματος του διπλού προβόλου του Σχήματος 1(δ) μέχρι τον άξονα συμμετρίας), τότε η γωνία στροφής χορδής στο πέρας αυτού του μήκους σχετίζεται με τη ροπή στο ίδιο σημείο μέσω της ακόλουθης ενεργού δυσκαμψίας:

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_s + 3a / 4}{\theta_y} \quad (6b)$$

Η ενεργός δυσκαμψία από την Εξ. (6b) συσχετίζει τη ροπή με τη γωνία στροφής χορδής στο ίδιο σημείο, θεωρώντας ότι η τέμνουσα είναι σταθερή σε μήκος ίσο με L_s+a . Χρησιμοποιώντας στην Εξ. (6) τις τιμές της ροπής διαρροής από ανάλυση διατομής και τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή από την Εξ. (2) υπολογίζεται η ενεργός δυσκαμψία των δοκιμών τύπου μονού ή διπλού προβόλου με συνεχείς ράβδους, με ή χωρίς μανδύες ΙΟΠ στην περιοχή της μέγιστης ροπής. Η ίδια προσέγγιση ακολουθείται και για τα αμφίπακτα υποστυλώματα με ροπή διαρροής από τις Εξ. (4) και (5) και γωνία στροφής χορδής από την Εξ. (2).

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΕΙΕΣ ΡΑΒΔΟΥΣ ΜΕ ΜΑΤΙΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ

Η συνήθης πρακτική μάτισης των ράβδων στο ύψος των ορόφων πολυώροφων κτιρίων έχει υιοθετηθεί στο παρελθόν και σε περιπτώσεις κατασκευών με λείες ράβδους οπλισμού. Η παρούσα παράγραφος εξετάζει αυτή την κρίσιμη περίπτωση της ένωσης με παράθεση ράβδων σε μήκος του μέλους όπου οι σεισμικές ροπές λαμβάνουν υψηλές τιμές και ξεκινούν από τη διατομή όπου η ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η μάτιση των άκρων με άγκιστρα λείων ράβδων σε μήκος παράθεσης $l_o > 10d_{bL}$ (το ελάχιστο που υπήρχε στα πειράματα) φαίνεται επαρκής για τη μεταφορά της δύναμης διαρροής σε εφελκυσμό. Οπότε, η ροπή διαρροής και η καμπυλότητα, M_y , και ϕ_y , ενός προβόλου με ράβδους ενωμένες με παράθεση (Σχήμα 1(β)) υπολογίζεται όπως και για συνεχείς λείες ράβδους, με τη διαφορά ότι και οι δύο ράβδοι σε ένα ζεύγος ενωμένων με παράθεση συνυπολογίζονται στο θλιβόμενο οπλισμό (Biskinis and Fardis 2010a).

Σε κάποιες χώρες οι κανονισμοί απαιτούν άγκιστρα στην αγκύρωση των λείων ράβδων αλλά επιτρέπουν τη μάτιση τους με ευθύγραμμα άκρα, χωρίς άγκιστρα. Κατά συνέπεια, οι λείες ράβδοι ενώνονταν συστηματικά με ευθύγραμμα άκρα στη βάση των ορόφων. Η ροπή διαρροής μελών με τέτοιου τύπου λεπτομέρεια όπλισης υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια κατά μέσο όρο εάν και οι δύο ράβδοι σε ένα ζεύγος ενωμένων με παράθεση αθροιστούν στο θλιβόμενο οπλισμό και η τάση διαρροής των εφελκυσόμενων ράβδων ισούται με:

$$f_{eff} = \min(1; l_o/l_{oy,min})f_y \quad (7)$$

$$\text{όπου: } l_{oy,min} = 0.5d_b f_y(\text{MPa}) / \sqrt{f_c(\text{MPa})} \quad (8)$$

Το αποτέλεσμα της Εξ. (8) είναι περίπου 40% μεγαλύτερο από το μήκος αγκύρωσης των λείων ράβδων με ευθύγραμμα άκρα που εξάγεται από την αντοχή τους σε συνάφεια σύμφωνα με τον (CEN 1994). Οι λίγες διαθέσιμες δοκιμές με μανδύες ΙΟΠ στην περιοχή της μάτισης των λείων ράβδων με ευθύγραμμα άκρα δείχνουν ελάχιστη επιρροή του μανδύα στις ιδιότητες διαρροής του μέλους. Όταν η διατομή της μέγιστης ροπής του δοκιμίου τύπου μονού προβόλου στο Σχήμα 1(β) διαρρέει, οι εφελκόμενες ράβδοι που τη διαπερνούν αναπτύσσουν τάση η οποία συμβολίζεται με f_{eff} και ισούται με f_y εάν αυτές οι ράβδοι έχουν άγκιστρα και στα δύο άκρα, ή δίνεται από τις Εξ. (7), (8) εάν τουλάχιστον ένα από αυτά τα άκρα είναι ευθύγραμμα. Οι τάσεις στα δύο άκρα μίας ράβδου που ξεκινά από τη βάση του δοκιμίου και ενώνεται με παράθεση με μία άλλη ράβδο συμβολίζονται με $f_{s,b}$ στη βάση και $f_{s,t}$ στο άλλο άκρο. Αυτές οι τάσεις είναι ίσες με μηδέν για ευθύγραμμα άκρα ή δίνονται από την Εξ. (1) για άκρα με άγκιστρα. Το μήκος παράθεσης των ράβδων εντός του δοκιμίου συμβολίζεται με l_o και το μήκος αγκύρωσης στη βάση με l_b . Η επιμήκυνση της ράβδου που ξεκινά από τη βάση στη διαρροή της μέγιστης ροπής ισούται με $[(f_{eff}+f_{s,t})l_o+(f_{eff}+f_{s,b})l_b]/(2E_s)$ και διαιρεμένη με z δίνει τη στροφή του πακτωμένου άκρου στη διατομή της μέγιστης ροπής. Το δοκίμιο παραμένει αρηγμάτωτο στη διατομή πέραν της μάτισης εάν η μέγιστη εφελκυστική τάση δεν υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, f_{ct} :

$$\left(1 - \frac{l_o}{L_s}\right) M_y < \left(f_{ct} + \frac{N}{bh} + \frac{A_{s1}}{bh} \left(1 + 3 \frac{z}{h}\right) \left(f_{eff} \left(1 - \frac{l_o}{L_s}\right) + f_{c,t} \frac{l_o}{L_s} \right) \right) \frac{bh^2}{6} \quad (9)$$

Ο τελευταίος όρος στην παρένθεση του δεξιού μέλους, με $\rho_1 = A_{s1}/bh$ να είναι το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού, είναι η θλιπτική ορθή τάση στις ακραίες ίνες της διατομής λόγω της εκκεντρότητας της δύναμης αντίδρασης στον ελκυστήρα σ' αυτό το επίπεδο. Εάν η Εξ. **Error! Reference source not found.α** επαληθεύεται, τότε η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή είναι:

$$\theta_{y,lap, single cantilever} = \frac{f_{eff}(l_o + l_b) + f_{s,b}l_b + f_{s,t}l_o}{2E_s z} \quad (10a)$$

Αντιθέτως, εάν η Εξ. (9α) δεν επαληθεύεται, εμφανίζεται ρωγμή στη διατομή του πέρατος της μάτισης. Η επιμήκυνση των κύριων ράβδων του δοκιμίου δημιουργεί στροφή ίση με $[(f_{eff}+f_{c,t})L_s - (f_{eff}-f_{c,b})l_o]/(2zE_s)$, η οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με $(1-l_o/L_s)$ για να μετατραπεί στη γωνία στροφής χορδής της διατομής της μέγιστης ροπής. Προσθέτοντας στη γωνία από την Εξ. (10a) τη στροφή του πακτωμένου άκρου στην δεύτερη αυτή διατομή από την Εξ. (2), προκύπτει η τελική γωνία στροφής χορδής στη διαρροή:

$$\theta_{y,lap, single cantilever} = \frac{f_{eff} \left(l_o + l_b + \left(1 - \frac{l_o}{L_s}\right) (L_s - l_o) \right) + (f_{c,b}l_o + f_{c,t}L_s) \left(1 - \frac{l_o}{L_s}\right) + f_{s,b}l_b + f_{s,t}l_o}{2E_s z} \quad (10b)$$

Σε δοκίμια τύπου διπλού προβόλου του Σχήματος 1(ε), η τάση στη ράβδο στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου συμβολίζεται με $f_{c,t}$, και αυτή στο πέρας της μάτισης με $f_{c,b}$. Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή στη μεσαία διατομή είναι:

$$\theta_{y,\text{lap,double cantilever}} = \frac{f_{\text{eff}}(L_s + 2a + l_o/2) + f_{c,b}l_o/2 + f_{c,t}L_s}{2E_s z} \quad (11)$$

Τα στατιστικά μεγέθη του Πίνακα 1 επιβεβαιώνουν την προτεινόμενη προσέγγιση υπολογισμού. Τα λίγα πειράματα με μανδύες ΙΟΠ καθ' όλο το μήκος παράθεσης με ράβδους με ευθύγραμμο άκρα στο πέρας της μάτισης επιβεβαιώνουν ότι η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τα παραπάνω αγνοώντας την επιρροή του μανδύα ΙΟΠ.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΜΟΝΟΡΟΦΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Μονόροφα υποστυλώματα με συνεχείς λείες ράβδους

Η ανάλυση διατομής εκτιμά ικανοποιητικά κατά μέσο όρο τη ροπή διαρροής στη βάση προβόλου (Πίνακας 1). Οπότε, θεωρείται ότι εφαρμόζεται επίσης και στην εκτίμηση της μέγιστης καμπυλότητας, ϕ_u , στην αστοχία και στο αντίστοιχο – ανηγμένο στο d – ύψος θλιβόμενης ζώνης, ξ_u της απερίσφιγκτης διατομής (δηλαδή, αγνοώντας την περίσφιγξη μετά την αποφλοιώση). Ως αστοχία θεωρείται το σημείο που αντιστοιχεί σε 20% πτώση της αντοχής. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας στη μέγιστη καμπυλότητα υπολογίζεται τότε ως $\phi_u \xi_u d$. Η παραμόρφωση στο μέσο της θλιβόμενης ζώνης είναι $\phi_u \xi_u d/2$. Το πλάτος του θλιπτήρα και η μέση τάση και παραμόρφωση σκυροδέματος θεωρείται ότι παραμένουν σταθερές κατά μήκος του θλιπτήρα μέχρι το άκρο του ελκυστήρα που προσομοιώνει τις εφελκυόμενες ράβδους. Η βράχυνση του θλιπτήρα δίνει τον τρίτο όρο στην ακόλουθη σχέση για τη μέγιστη γωνία στροφής χορδής του υποστυλώματος τύπου μονού προβόλου (Σχήμα 1(α)):

$$\theta_{u,\text{continuous,single cantilever}} = \theta_{y,\text{continuous,cantilever}} + (\phi_u - \phi_y) (a_{\max} \max(L_s; l_b) + a_{\min} \min(L_s; l_b)) + \frac{\phi_u \xi_u d}{2} \left(\frac{L_s}{z} + \frac{z}{L_s} \right) \quad (12)$$

όπου ο πρώτος όρος δίνεται από την Εξ. (2). Η καμπυλότητα στη διαρροή, ϕ_y , η μέγιστη καμπυλότητα, ϕ_u , και το ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης στη μέγιστη καμπυλότητα, ξ_u , υπολογίζονται σύμφωνα με τους Grammatikou et al (2016), με τη μέγιστη καμπυλότητα, ϕ_u , της πλαστικής άρθρωσης χωρίς μανδύα ΙΟΠ να υπολογίζεται για τη μη αποφλοιωμένη διατομή. Ο δεύτερος όρος στην Εξ. (12) είναι ένα μήκος πλαστικής άρθρωσης όπου συμβαίνουν οι ανελαστικές παραμορφώσεις. Θεωρώντας ότι τα δύο άκρα ενός αμφίπακτου υποστυλώματος (Σχήμα 1(γ)), έχουν πανομοιότυπο οπλισμό και αξονικό φορτίο, η μέγιστη γωνία στροφής χορδής στα δύο άκρα είναι ίδια και ισούται με:

$$\theta_{u,\text{continuous,double fixity}} = \theta_{y,\text{continuous,double fixity}} + (\phi_u - \phi_y) \left(a_{\max} \max\left(\frac{H}{2}; l_b\right) + a_{\min}\left(\frac{H}{2}; l_b\right) \right) + \frac{\phi_u \xi_u d}{2} \left(\frac{H}{z} + \frac{z}{H} \right) \quad (13)$$

Οι ακόλουθες τιμές των παραμέτρων για το μήκος πλαστικής άρθρωσης προσαρμόστηκαν στις πειραματικές τιμές της μέγιστης γωνίας στροφής χορδής υποστυλωμάτων τύπου μονού προβόλου και αμφίπακτων με συνεχείς ράβδους:

$$a_{\max} = 0.08, \quad a_{\min} = 0.6 \quad (14)$$

Οι γραμμές 1 και 2 του Πίνακα 2 παραθέτουν τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές για τη μέγιστη γωνία στροφής χορδής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση των παραπάνω περιπτώσεων.

Δεν υπάρχουν διαθέσιμες δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρι την αστοχία δοκιμών τύπου διπλού προβόλου όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 1(δ), με βάση τα οποία θα μπορούσε να αξιολογηθεί ή να βαθμονομηθεί ένα προσομοίωμα. Παρ' όλα αυτά, μία φυσική τροποποίηση της Εξ. (12) γι' αυτήν την περίπτωση είναι:

$$\theta_{u,\text{continuous,double cantilever}} = \theta_{y,\text{continuous,cantilever}} + (\phi_u - \phi_y) (a_{\max} L_s + a) + \frac{\phi_u \xi_u d}{2} \left(\frac{L_s}{z} + \frac{z}{L_s} \right) \quad (15)$$

Μονόροφα υποστυλώματα με λείες ράβδους ενωμένες με παράθεση

Εάν τα άκρα με άγκιστρα των λείων ράβδων είναι ενωμένα με παράθεση στη βάση του υποστυλώματος όπως στο Σχήμα 9.1(γ) σε μήκος $l_o \geq 10d_{bL}$, η Εξ. (9.12) τροποποιείται σε:

$$\theta_{u,\text{lap,cantilever}} = \theta_{y,\text{lap,cantilever}} + a_{\text{lap}} \left((\phi_u - \phi_y) (a_{\max} \max(L_s; l_b) + a_{\min} \min(L_s; l_b)) + \frac{\phi_u \xi_u d}{2} \left(\frac{L_s}{z} + \frac{z}{L_s} \right) \right) \quad (16)$$

$$\text{όπου: } a_{\text{lap}} = a_{\text{lap,hooked}} = \min\left(1; \frac{l_o}{50d_b}\right) \quad (17)$$

Στην Εξ. (16) οι καμπυλότητες στη διαρροή και στην αστοχία, ϕ_y , ϕ_u , και το ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης υπολογίζονται όπως παραπάνω, με τη διαφορά ότι και οι δύο ράβδοι σε ένα ζεύγος ενωμένων με παράθεση αθροίζονται στο θλιβόμενο σπλισμό (Biskinis and Fardis 2010, Grammatikou et al 2016). Εάν τα ευθύγραμμα άκρα των εφελκόμενων ράβδων έχουν ενωθεί με παράθεση χωρίς άγκιστρα, τα μέλη με μήκη μάτισης μικρότερα από περίπου $25d_{bL}$ χάνουν την αντοχή τους απότομα, αμέσως μετά την επίτευξη εφελκυστική τάσης ίσης με την τιμή από τις Εξ. (7),(8). Όμως, μέλη με μεγαλύτερα μήκη μάτισης είναι σχεδόν όσο αποτελεσματικά όσο αυτά με άγκιστρα στα άκρα των ράβδων. Τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η Εξ. (16) ισχύει, αλλά με:

$$a_{\text{lap}} = a_{\text{lap,straight}} = \max\left(0; \min\left(1; \frac{l_o}{25d_b} - 1\right)\right) \quad (18)$$

Πίνακας 2 Στατιστικά μεγέθη λόγων πειραματικής και εκτιμώμενης μέγιστης γωνίας στροφής χορδής των δοκιμίων

	Τύπος μέλους	# πειρ.	Μέση τιμή*	Διάμεσος*	CoV %
1	Απλοί πρόβολοι με συνεχείς ράβδους	56	1.01	1.00*	45.8
2	Αμφίπακτα υποστυλώματα με συνεχείς ράβδου	10	0.98*	0.99	13.9
3	Απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα	21	1.16	1.04*	42.9
4	Απλοί πρόβολοι, συνεχείς ράβδοι και μανδύες ΙΟΠ	14	0.97*	1.03	45.0
5	Απλοί πρόβολοι, ματίσεις με άγκιστρα και μανδύες ΙΟΠ	9	1.00*	0.95	22.2
6	Απλοί/διπλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμα άκρα	19	1.00	1.05*	44.6
7	Απλοί πρόβολοι, ματίσεις με ευθύγραμμα άκρα, ΙΟΠ	4	0.93*	0.93	24.1

* Οι τιμές με έντονα γράμματα αντιπροσωπεύουν τη μέση τάση: ο μέσος όρος για μικρά δείγματα, ο διάμεσος για μεγαλύτερους δείκτες.

Η Εξ. (18) δείχνει ότι οι ματίσεις με ευθύγραμμα άκρα αποκτούν την αποτελεσματικότητα μίας συνεχούς ράβδου για μήκος μάτισης $\geq 50d_{bL}$, δηλαδή στο ίδιο όριο με τις ματίσεις με άγκιστρα στα άκρα των ράβδων. Όμως, στο μισό αυτής της τιμής το μέλος χάνει ολοκληρωτικά την ικανότητα ανάπτυξης πλαστικής παραμόρφωσης. Οι γραμμές 3 και 6 στον Πίνακα 2 παραθέτουν τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της μέγιστης γωνίας στροφής χορδής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υποστυλωμάτων τύπου προβόλου με ματίσεις ράβδων με άγκιστρα στα άκρα ή ευθύγραμμα άκρα.

Μανδύας ΙΟΠ σε υποστυλώματα με λείες ράβδους, συνεχείς ή με ματίσεις

Η Εξ. (13) για τη μέγιστη γωνία στροφής χορδής υποστυλώματος τύπου προβόλου τροποποιείται για να εκφράσει τη μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση των ακραίων θλιβόμενων ινών εντός του μήκους, L_f , όπου εφαρμόζεται ο μανδύας ΙΟΠ:

$$\theta_{u,\text{continuous,cantilever,FRP}} = \theta_{y,\text{continuous,cantilever}} + (\varphi_u - \varphi_y) (a_{\max} \max(L_s; l_b) + a_{\min} \min(L_s; l_b)) + \frac{1}{2} \left(\varphi_u \xi_u d \left(1 - \frac{L_f}{L_s} \right) + \varphi_{u,c} \xi_{u,c} d \frac{L_f}{L_s} \right) \left(\frac{L_s}{z} + \frac{z}{L_s} \right) \quad (19)$$

Στην Εξ. (19) τα $\phi_{u,c}$ και $\xi_{u,c}$ είναι η μέγιστη καμπυλότητα και το αντίστοιχο ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης της διατομής, η οποία έχει ενισχυθεί με μανδύα ΙΟΠ (Grammatikou et al 2017b) και ισχύουν για μήκος L_f . Εκτός του μήκους L_f , χρησιμοποιούνται οι τιμές ϕ_u και ξ_u για διατομές χωρίς μανδύα ΙΟΠ (Grammatikou et al 2017b).

Εάν το υποστυλώμα είναι αμφίπακτο (Σχήμα 1(γ)) και έχει τον ίδιο οπλισμό, αξονικό φορτίο και μανδύα ΙΟΠ στα δύο άκρα του, ισχύει η Εξ. (19) με $L_s = H/2$. Η επιρροή του μανδύα ΙΟΠ σε μήκος L_f του υποστυλώματος μεγαλύτερο του μήκους μάτισης, l_o , ράβδων με άγκιστρα στα άκρα τους στη βάση υποστυλώματος τύπου προβόλου λαμβάνεται με αντικατάσταση της $\theta_{y,\text{continuous,cantilever}}$ με $\theta_{y,\text{lap,cantilever}}$, Εξ.(10), και πολλαπλασιασμό των δύο τελευταίων όρων της Εξ. (19) επί $\alpha_{\text{lap,FRP}}$, όπου:

$$a_{lap,FRP} = a_{hooked\ lap,FRP} = \min\left(1; \frac{l_o}{50d_b} (1 + 300 \min(0.05; \rho_f E_f / E_c) (0.1 - \min(0.05; \rho_f E_f / E_c)))\right) \quad (20)$$

με E_f το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ και ρ_f το γεωμετρικό ποσοστό του ΙΟΠ παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης. Οι γραμμές 4 και 5 του Πίνακα 2 παραθέτουν τα στατιστικά μεγέθη των λόγων πειραματικών προς εκτιμώμενες τιμές υποστυλωμάτων με μανδύες ΙΟΠ. Εάν οι λείες ράβδοι ενώνονται με παράθεση στη βάση του υποστυλώματος με ευθύγραμμο άκρα, τα πειραματικά αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμών υποστυλωμάτων με τέτοιου τύπου μάτιση και μανδύες ΙΟΠ δείχνουν ότι η ενίσχυση με μανδύες ΙΟΠ στη μάτιση δεν έχει θετική επιρροή στη ικανότητα παραμόρφωσης του υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οπότε, η Εξ. (19), με τις τροποποιήσεις που αναφέρονται πάνω απ' την Εξ. (20), ισχύει και σ' αυτήν την περίπτωση, με την Εξ. (20) να αντικαθίσταται από την Εξ. (18).

ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΥΩΡΟΦΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

Οι κατακόρυφες λείες ράβδοι υποστυλωμάτων των πολυώροφων κτιρίων ενώνονται με παράθεση και άγκιστρο με την κορυφή των ράβδων του από κάτω ορόφου. Ο εφελκυσμός κυριαρχεί σε όλο το μήκος κάθε ράβδου, με κατανομή των τάσεων των ράβδων, τη στιγμή που τα υποστυλώματα φθάνουν την ροπή διαρροής τους στην κορυφή και στο κάτω μέρος δύο διαδοχικών ορόφων, παρόμοια με εκείνη που λαμβάνεται για αμφίπακτο υποστυλώμα (βλ. Σχήμα 1(γ)). Οι Grammatikou et al (2017a) επέκτειναν το μοντέλο θλιπτήρα-ελκυστήρα που παρουσιάζεται εδώ σε ένα πλήρες πολυώροφο υποστυλώμα. Εξισώσεις για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή και στην αστοχία είναι διαθέσιμες εκεί. Η επίδραση του μανδύα ΙΟΠ λαμβάνεται επίσης υπόψη. Εκτός από το φυσικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται εδώ, οι Grammatikou et al (2017a) τροποποίησαν τα εμπειρικά προσομοιώματα γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία των Grammatikou et al (2017c), για να καλύψουν και την περίπτωση μελών ΟΣ με λείες ράβδους, με ή χωρίς μάτιση. Τα εμπειρικά προσομοιώματα έχουν αρκετά καλή προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα των μονώροφων δοκιμών, παρόμοια ή ελαφρώς καλύτερη σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνει το φυσικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται εδώ. Η εφαρμογή σε ένα τριώροφο κτίριο που υποβλήθηκε σε πολλαπλές ψευδοδυναμικές δοκιμές (κτίριο SPEAR, Fardis και Negro 2005) έδειξε σημαντικές διαφορές στις προβλέψεις των δύο διαφορετικών τύπων προσομοιωμάτων Grammatikou et al (2017c). Το φυσικό συλλαμβάνει καλύτερα την πειραματική εκδήλωση βλάβης, ενώ τα εμπειρικά εμφανίζονται να σφάλλουν από την πλευρά της ασφάλειας. Οι κυματομορφές και οι κυρίαρχες περίοδοι της πειραματικής απόκρισης βρέθηκαν να είναι σε καλή συμφωνία με την υπολογιζόμενη απόκριση, επιβεβαιώνοντας τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της ενεργού δυσκαμψίας μελών με λείες ράβδους.

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

- ASCE (2007) *Seismic rehabilitation of existing buildings* ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, American Soc. Civil Eng., Reston, VA.
- Biskinis D, Fardis MN (2010a) Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concr*, 11(3): 127-138.
- Biskinis D, Fardis MN (2010b) Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concr*. 11(2): 93-108.
- Biskinis D, Fardis MN (2013) Models for FRP-wrapped rectangular RC columns with continuous or lap-spliced bars under cyclic lateral loading *Eng Struct* 57: 199–212.
- CEN (1994) *European prestandard ENV 1992-1-1:1994: Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General and buildings*. Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- CEN (2005) *European Standard EN 1998-3:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Assessment and retrofitting of buildings*. Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- Fardis MN, Negro P (2005) SPEAR: Seismic Performance Assessment and Rehabilitation. International Workshop, Ispra(IT), ISBN 92-894-9923-0, Office of Official Publications of the European Unions, Luxembourg, 304p.
- fib* (2012) *Model Code 2010*. Bull. 65/66, Federation Internationale du Beton, Lausanne
- Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN (2016) Ultimate strain criteria for RC Members in monotonic or cyclic flexure. *ASCE J. Struct. Eng.* 142(9)
- Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN (2017a) Models for the flexure-controlled strength, stiffness and cyclic deformation capacity of concrete columns with smooth bars, including lap-splicing and FRP jackets *Bull. Earthq. Eng.* DOI:0.1007/s10518-017-0202-y (online, Aug. 4, 2017)
- Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN (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)
- Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN (2017c) Flexural rotation capacity models fitted to test results using different statistical approaches. *Struct. Concrete*. DOI: 10.1002/suco.201600238 (online, Aug. 29, 2017)
- Panagiotakos TB, Fardis MN (2001) Deformations of RC members at yielding and ultimate *ACI Struct. J* 98(2): 135-148