

Οριακές Ανηγμένες Παραμορφώσεις Μελών Ο.Σ. σε Μονοτονική ή Ανακυκλιζόμενη Κάμψη

Ultimate Strain Criteria for RC Members in Monotonic or Cyclic Flexure

Σοφία ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΥ¹, Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ², Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: περίσφιξη, καμπυλότητα, σχέση ροπών-καμπυλοτήτων, πειράματα
keywords: confinement, curvature, moment-curvature relations, tests

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών μετρήσεων καμπυλοτήτων σε πλαστικές αρθρώσεις μελών οπλισμένου σκυροδέματος με καταπόνηση σε κάμψη υπό αξονική δύναμη χρησιμοποιούνται παράλληλα με αναλυτικές σχέσεις ροπής-καμπυλότητας ώστε να εξαχθούν κριτήρια οριακής ανηγμένης παραμόρφωσης για τις εφελκόμενες ράβδους χάλυβα και για τις ακραίες θλιβόμενες ίνες σκυροδέματος, τόσο για το απερίσφικτο σκυρόδεμα της επικάλυψης όσο και για το περισφιγμένο πυρήνα. Τα όρια παραμόρφωσης που προτείνονται μπορούν να υποστηρίξουν προσομοιώματα ινών για πρισματικά μέλη ή προσομοιώματα με πλαστικές αρθρώσεις πεπερασμένου μήκους στα άκρα. Οι πειραματικές μετρήσεις καμπυλοτήτων προέρχονται από υποστυλώματα κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής (μερικά με το φορτίο στη διαγώνιο), τοιχώματα ή δοκούς. Οι οριακές ανηγμένες παραμορφώσεις που προτείνονται για τις ράβδους χάλυβα και το σκυρόδεμα δεν εξαρτώνται μόνο απ' το υλικό (ειδικά για ανακυκλιζόμενη φόρτιση). Εξαρτώνται επίσης από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής στο σύνολό της και από το άμεσο περιβάλλον του πιο κρίσιμου σημείου του μέλους.

ABSTRACT: A large number of experimental curvatures in plastic hinges of concrete members are used alongside analytical moment-curvature relations to back-estimate strains in the bars, the extreme concrete fibers of a section or its confined core at ultimate conditions of concrete sections in flexure with axial load. Strain limits derived from these “ultimate” strains can support Fiber models for prismatic members, or models with finite length plastic hinges at the ends. The measurements come from circular or rectangular columns (some tested diagonally), walls or beams. The ultimate strains derived for steel bars and concrete are not local material properties (especially for cyclic loading): they depend on geometric features of the section as a whole and of the immediate

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

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

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

vicinity of the most critical point in the section.

ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ σ - ε ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μέγιστη καμψυλότητα και παραμορφώσεις ακραίων ινών από ανάλυση διατομής

Η οριακή καμψυλότητα μιας διατομής ΟΣ υπό μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση συμβατικά ταυτοποιείται με το σημείο μετά από τη μέγιστη αντοχή της απόκρισης ροπής-καμψυλότητας όπου η απομένουσα αντοχή (εδώ ροπή, M) δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από το 80% της μέγιστης με την αύξηση της καμψυλότητας, φ . Η έτσι ορισμένη οριακή καμψυλότητα, φ_u , είναι η μικρότερη από τις τιμές που υπολογίζονται όταν:

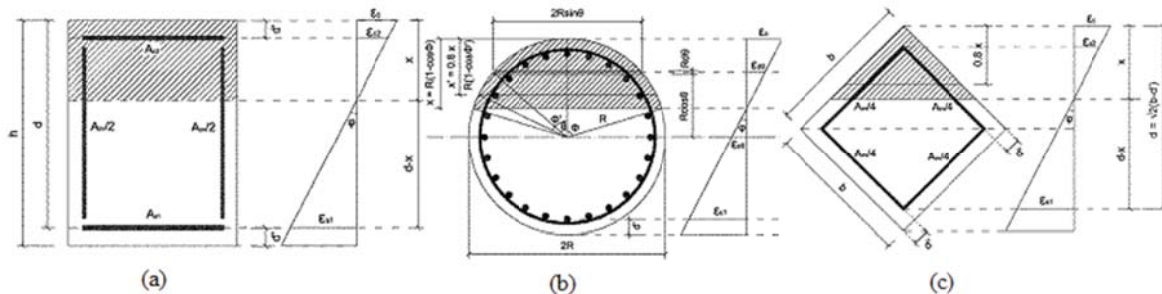
1. Συμβαίνει θραύση του χάλυβα σε οριακή επιμήκυνση ε_{su} , η οριακή καμψυλότητα, φ_u , είναι τότε:

$$\varphi_{su} = \varepsilon_{su} / (d - x_s) \quad (1)$$

όπου x_s είναι το ύψος του ουδέτερου άξονα γι' αυτόν τον τύπο αστοχίας και d είναι το στατικό ύψος.

2. Οι ακραίες θλιβόμενες ίνες φτάνουν την οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος, ε_{cu} , όταν το ύψος του ουδέτερου άξονα είναι x_c , τότε η φ_u ισούται με:

$$\varphi_{cu} = \varepsilon_{cu} / x_c \quad (2)$$



Σχήμα 1. Διατομές που εξετάζονται (α) ορθογωνική με ασύμμετρο και οπλισμό κορμού, (β) κυκλική, (γ) τετραγωνική, με φόρτιση στη διαγώνιο

Εάν το αποτέλεσμα της Εξ.(1) είναι μικρότερο της Εξ.(2), λαμβάνεται ως η οριακή καμψυλότητα. Εάν όχι, εξετάζεται τι συμβαίνει αφού οι ακραίες θλιβόμενες ίνες φτάνουν την ε_{cu} και έχουμε αποφλοιώση του σκυροδέματος της επικάλυψης. Τότε, μόνο ο περισφιγμένος πυρήνας σκυροδέματος εσωτερικά της περιμέτρου των συνδετήρων θεωρείται ως ενεργός διατομή. Οι Εξ.(1) και (2) εφαρμόζονται εκ νέου, χρησιμοποιώντας τις τιμές των d , x_{su} , x_{cu} του περισφιγμένου πυρήνα και την οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu,c}$, αντί

της ε_{cu} . Εάν η ροπή αντοχής που αντιστοιχεί στον περισφιγμένο πυρήνα, M_{Ro} , υπερβαίνει το 80% της ροπής αντοχής της συνολικής, μη αποφλοιωμένης διατομής αγνοώντας την επιρροή της περίσφιγξης, M_{Rc} , τότε η μικρότερη τιμή εκ των αποτελεσμάτων των Εξ.(1) και (2) λαμβάνεται ως μέγιστη καμπυλότητα. Εάν $M_{Ro} < 0.8M_{Rc}$, το αποτέλεσμα της Εξ.(2) κατά την αποφλοιώση λαμβάνεται ως φ_u .

Οι τιμές των φ_{cu} , φ_{su} και η αντίστοιχη ροπή αντοχής, M_R , υπολογίζεται εδώ από ανάλυση της διατομής (Σχήμα 1), ως συνάρτηση των ε_{cu} (ή $\varepsilon_{cu,c}$) and ε_{su} , αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μία αντιστοιχία μεταξύ καμπυλότητας και των παραμορφώσεων των ακραίων ινών, που μετά αντιστρέφεται για να καθορίσει τις παραμορφώσεις αυτές όταν επιτυγχάνεται η πειραματική μέγιστη καμπυλότητα (το σημείο της καμπύλης $M-\varphi$ όπου η M_R μειώνεται στο 80% της μέγιστης). Αυτή η ανάλυση ακολουθεί τη συνολική απόκριση $M-\varphi$ από το σημείο της διαρροής μέχρι την αστοχία – περιγράφεται αναλυτικά στους Panagiotakos and Fardis (2001) και Biskinis and Fardis (2010a, 2013). Συνεπώς είναι ισοδύναμη μιας $M-\varphi$ ανάλυσης, με τον οπλισμό ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος των ακραίων ινών και με νόμους $\sigma-\varepsilon$ που περιγράφονται στη συνέχεια.

Νόμοι $\sigma-\varepsilon$ των υλικών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση διατομής

Για διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη, οι νόμοι $\sigma-\varepsilon$ των υλικών λαμβάνονται ως εξής:

- Χάλυβας: Στις χαμηλές παραμορφώσεις χάλυβα που συνοδεύουν τις οριακές καταστάσεις λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος, ο χάλυβας των διαμήκων ράβδων λαμβάνεται ελαστικός-τέλεια-πλαστικός, με τάση διαρροής f_y και παραμόρφωση διαρροής $\varepsilon_y = f_y / E_s$. Σε μεγάλες παραμορφώσεις, που συνοδεύονται με αστοχία λόγω θραύσης του χάλυβα, ο χάλυβας λαμβάνεται με πλατό διαρροής με τάση f_y μέχρι παραμόρφωση ίση με $\varepsilon_{sh} > \varepsilon_y$. Μετά παρουσιάζει κράτυνση γραμμικά μέχρι το σημείο της μέγιστης αντοχής με τάση $f_t > f_y$ και επιμήκυνση $\varepsilon_{su} > \varepsilon_{sh}$.
- Απερίσφιγκτο σκυρόδεμα: η καμπύλη $\sigma-\varepsilon$ είναι παραβολική μέχρι η τάση να φτάσει την αντοχή σκυροδέματος f_c σε παραμόρφωση $\varepsilon_{co} = 0.002$, μετά παραμένει οριζόντια μέχρι τη “μέγιστη παραμόρφωση” ε_{cu} .
- Το σκυρόδεμα που περισφίγγεται από συνδετήρες με τάση διαρροής f_{yw} και γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού ρ_s (το ελάχιστο των δύο διευθύνσεων), αφού οι ακραίες θλιβόμενες ίνες φτάνουν την ε_{cu} και το σκυρόδεμα αποφλοιωθεί, ακολουθεί νόμο $\sigma-\varepsilon$ ξανά παραβολικό-ορθογωνικό, αλλά με τις ακόλουθες παραμέτρους:
 - Αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος, f_{cc} , σύμφωνα με το απλό προσομοίωμα του *fib* (2012), που συνολικά προσαρμόζεται στα πειραματικά αποτελέσματα καλύτερα από οποιοδήποτε άλλο προσομοίωμα περίσφιγξης (Fardis 2013):

$$f_{cc} = f_c' (1 + K), \quad K = 3.5 \left(a \rho_s f_{yw} / f_c' \right)^{3/4} \quad (3)$$

όπου α είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης (Sheikh and Uzumeri 1982, Mander et al 1988):

$$a = (1 - 0.5s_h / b_o)(1 - 0.5s_h / h_o)(1 - \sum b_i^2 / (6b_o h_o)) \quad (4)$$

Στην Εξ.(4) s_h είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των συνδετήρων, b_o , h_o είναι οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα που ορίζονται από τον άξονα του περιμετρικού συνδετήρα, και b_i η απόσταση κατά μήκος του συνδετήρα που ορίζεται από το κέντρο των ράβδων που βρίσκονται σε επαφή με τον εξωτερικό συνδετήρα και συγκρατούνται στη γωνία του συνδετήρα ή από ενδιάμεσα σκέλη.

- Παραμόρφωση σε τάση f_{cc} σύμφωνα με τους Richart et al (1928) (έχει υιοθετηθεί και από τον *fib* (2012)), με K από την Εξ.(3):

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}(1 + 5K) \quad (5)$$

- Μέγιστη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu,c}$: καθορίζεται παρακάτω από τις πειραματικές τιμές των φ_u (βλέπε Εξ.(10)). Για $\rho_s f_{yw} = 0$, η $\varepsilon_{cu,c}$ ισούται με την ε_{cu} .

Στη θλιβόμενη ζώνη μιας κυκλικής διατομής, χρησιμοποιούνται απλούστεροι σ - ε νόμοι για απλοποίηση της ανάλυσης:

- Χάλυβας: Ελαστικός-τέλεια-πλαστικός, με παραμέτρους f_y και ε_{su} .
- Σκυρόδεμα: θεώρηση ομοιόμορφης πλαστικοποίησης, όπως γίνεται με τη θεώρηση ισοδύναμης ορθογωνικής κατανομής τάσεων στο άνω 80% της θλιβόμενης ζώνης, $x' = 0.8x$, που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό με βάση την οριακή κατάσταση αντοχής σε κάμψη των διατομών των οποίων το πλάτος μειώνεται από τον ουδέτερο άξονα μέχρι τις ακραίες θλιβόμενες ίνες (*fib* 2012). Αφού οι ακραίες θλιβόμενες ίνες φτάνουν τη μέγιστη παραμόρφωση του απερίσφιγτου σκυροδέματος, ε_{cu} , η τάση του ισοδύναμου ορθογωνίου ισούται με $0.9f_c$. Μετά την αποφλοιώση, αυτός ο νόμος σ - ε εφαρμόζεται εσωτερικά του κυκλικού συνδετήρα, με σταθερή τάση ίση με $0.9f_{cc}$ να διατηρείται μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu,c}$. Για το περισφιγμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται ότι έχει επιωθεί παραπάνω για τις ορθογωνικές θλιβόμενες ζώνες, χρησιμοποιώντας στην Εξ.(3) $\rho_s = 2A_{sw} / (D_o s_h)$, όπου A_{sw} είναι η επιφάνεια ενός κυκλικού συνδετήρα με διάμετρο D_o . Η Εξ.(4) για τον υπολογισμό του συντελεστή περίσφιγξης αντικαθίσταται από την:

$$a = (1 - 0.5s_h / D_o)^n \quad (6)$$

Όπου $n = 2$ για μεμονωμένους κυκλικούς συνδετήρες ή $n = 1$ για σπειροειδή οπλισμό.

Για τετραγωνικές διατομές που φορτίζονται κατά μήκος της διαγωνίου:

- Χάλυβας: Το ίδιο με τις διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη.
- Σκυρόδεμα: Το ίδιο με τις κυκλικές διατομές, αλλά με συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης όπως στις διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη, δηλαδή, χρησιμοποιώντας την Εξ.(4).

Εάν η f_{cc} και η ε_{cc} λαμβάνονται σύμφωνα με τα παραπάνω προσομοιώματα, οι παράμετροι που είναι διαθέσιμες να προσαρμοστούν στις πειραματικές τιμές της φ_u είναι οι οριακές παραμορφώσεις του χάλυβα, ε_{su} , και του περισφιγμένου σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu,c}$, οι οποίες εξετάζονται ξεχωριστά για μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση και για τα διαφορετικά σχήματα των θλιβόμενων ζωνών. Αναλυτικές σχέσεις μεταξύ μέγιστης καμπυλότητας και παραμορφώσεων υλικών από ανάλυση διατομής, για τους τρεις τύπους διατομών που εξετάζονται (Σχήμα 1), δίδονται απ' τους Grammatikou et al 2016.

Επιρροή της ολίσθησης των εφελκόμενων ράβδων από την αγκύρωση πέραν από τη διατομή της μέγιστης ροπής

Οι καμπυλότητες κοντά στην κρίσιμη διατομή βάσης συνήθως εξάγονται από την σχετική στροφή της ως προς μία άλλη διατομή, αφού διαιρεθεί με την απόσταση των δύο αυτών διατομών. Εάν η στροφή της πακτωμένης βάσης έχει μετρηθεί από την επιφάνεια του κυβόλιθου αγκύρωσης (π.χ. αυτού της βάσης του δοκιμίου), περιλαμβάνει και τη στροφή της διατομής βάσης λόγω ολίσθησης των διαμήκων ράβδων από την αγκύρωση. Αυτό το μέρος της στροφής πρέπει να αφαιρεθεί από τη συνολική μετρηθείσα στροφή. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και τη θεωρία, στη διαρροή της διατομής βάσης η στροφή στην πακτωμένη αυτή διατομή είναι $\theta_{y,slip} = d_{bL} f_{y1} \varphi_y / (8\sqrt{f_c})$, όπου d_{bL} είναι η μέση διάμετρος των εφελκόμενων ράβδων, f_{y1} η τάση διαρροής τους, φ_y η καμπυλότητα της διατομής βάσης στη διαρροή και f_c , f_{y1} είναι σε MPa (Biskinis and Fardis 2010a). Αφού συμβεί η διαρροή της διατομής βάσης και μέχρις ότου επιτευχθεί η μέγιστη καμπυλότητα εκεί, ανελαστικές παραμορφώσεις διεισδύουν στην ζώνη αγκύρωσης των εφελκόμενων ράβδων πέραν της διατομής βάσης, αυξάνοντας επιπλέον τη στροφή της πακτωμένης αυτής διατομής λόγω ολίσθησης των ράβδων. Σε 168 περιπτώσεις από αυτές που χρησιμοποιούνται εδώ για την εξαγωγή των οριακών παραμορφώσεων από τις καμπυλότητες, οι σχετικές στροφές που μετρήθηκαν σε διαφορετική μήκη μέτρησης περιλαμβάνουν αυτή τη στροφή της πακτωμένης διατομής βάσης. Βάσει αυτών των δεδομένων, η επιπρόσθετη στροφή της πακτωμένης διατομής βάσης μεταξύ διαρροής και μέγιστης καμπυλότητας ισούται με:

$$\text{- Υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση: } \Delta\theta_{u,slip} = 4.5d_{bL}\varphi_u \quad (7a)$$

$$\text{- Υπό μονοτονική φόρτιση: } \Delta\theta_{u,slip} = 10d_{bL}\varphi_u \quad (7b)$$

Οι Εξ.(7a) και (7b) συνεπάγονται ότι οι ράβδοι είναι τέλεια-πλαστικές σε όλο το μήκος διείσδυσης της διαρροής το οποίο είναι ανάλογο του d_{bL} σε αυτές τις σχέσεις. Μια καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα επιτυγχάνεται εάν οι ράβδοι λαμβάνονται να εμφανίζουν κράτυνση γραμμικά σ' αυτό το μήκος και

χρησιμοποιείται το $(\varphi_y + \varphi_u)/2$ στη θέση της φ_u :

$$- \text{Υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση: } \Delta\theta_{u,slip} = 4.25d_{bL}(\varphi_u + \varphi_y) \quad (8a)$$

$$- \text{Υπό μονοτονική φόρτιση: } \Delta\theta_{u,slip} = 9d_{bL}(\varphi_u + \varphi_y) \quad (8b)$$

Οι Εξ. (7a) και (8a) ή οι Εξ. (7b) και (8b) είναι σχεδόν ισοδύναμες σε ακρίβεια.

Για διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη και για κυκλικές διατομές, εξισώσεις για τον υπολογισμό της φ_y για χρήση στις Εξ. (8a), (8b) και στην $\theta_{y,slip} = d_{bL}f_{y1}\varphi_y/(8\sqrt{f_c})$ έχουν δοθεί απ' τους Biskinis and Fardis (2010a) και (2013), αντίστοιχα. Για τετραγωνική διατομή η οποία φορτίζεται κατά μήκος της διαγωνίου, η φ_y δίνεται από εξισώσεις ανάλογες των Εξ. (1) και (2). Η παραμόρφωση διαρροής του οπλισμού, ε_{y1} , χρησιμοποιείται στην Εξ. (1) αντί για την ε_{su} , και μία “φαινόμενη παραμόρφωση διαρροής” του σκυροδέματος, $\varepsilon_c = 1.8f_c/E_c$, στην Εξ. (2) αντί για την ε_{cu} . Το ύψος του ουδέτερου άξονα που χρησιμοποιείται στην Εξ.(1) είναι η θετική ρίζα της:

$$E_c x^3 + 3E_s(A_s + P/f_y)x - 3\sqrt{2}E_s b(1 - \delta')(A_s/2 + P/f_y) = 0 \quad (9a)$$

Η τιμή του x_c στην Εξ. (9a) είναι η θετική ρίζα της:

$$E_c x^3 + 3(E_s A_s - P/\varepsilon_c)x - (3/\sqrt{2})b(1 - \delta')E_s A_s = 0 \quad (9b)$$

Στα παρακάτω, οι 168 πειραματικές καμπυλότητες διορθώθηκαν για την επιρροή της στροφής στο πακτωμένο άκρο, πριν συγκριθούν με τις εκτιμώμενες τιμές.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Παραμορφώσεις ακραίων ινών εκτιμώμενες από πειραματικές μέγιστες καμπυλότητες

Η αντιστοιχία μεταξύ φ_u και ε_{su} ή $\varepsilon_{cu,c}$, όπως περιγράφεται παραπάνω, αντιστράφηκε για να εκτιμηθούν οι παραμορφώσεις των υλικών από τις “πειραματικές” τιμές στην καμπτική αστοχία του άκρου του μέλους. Για κάθε πιθανό τρόπο αστοχίας (δηλαδή, θράυση των εφελκόμενων ράβδων, σύνθλιψη του σκυροδέματος του πυρήνα, αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης) διαγράμματα αυτών των “πειραματικών” παραμορφώσεων σε συσχέτιση με σχετικές ανεξάρτητες μεταβλητές (γεωμετρικές ή των ιδιοτήτων των υλικών) ανέδειξαν οποιαδήποτε σημαντική στατιστική εξάρτηση. Επίσης, υπέδειξαν την κατάλληλη μορφή μαθηματικής σχέσης για να την εκφράσουν. Οι συντελεστές αυτών των σχέσεων υπολογίστηκαν μέσω μη γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης πολλών μεταβλητών και τροποποιήθηκαν για να προκύψουν τιμές χωρίς στατιστικό λάθος με τη μικρότερη διασπορά.

Για το σκυρόδεμα, οι παραμορφώσεις των ακραίων ινών που υπολογίστηκαν από τις μέγιστες καμπυλότητες εξαρτώνται από: α) το σχήμα και το μέγεθος της θλιβόμενης ζώνης (τουλάχιστον για μικρά μεγέθη) και β) από την περίσφιγξη – εκφραζόμενη ως το γινόμενο του συντελεστή περίσφιγξης, a , από τις Εξ. (4) και (6), το ογκομετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού, ρ_w , και του λόγου της τάσης διαρροής του, f_{yw} , ως προς την f_c ($\omega_w = \rho_w f_{yw} / f_c$). Η πιο πολυπληθής ομάδα δεδομένων για διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη (Σχήμα 2(α)) υποδεικνύουν μία εξάρτηση ως προς τη ρίζα του $a\omega_w = a\rho_w f_{yw} / f_c$. Ο ίδιος τύπος εξάρτησης υιοθετείται για τα πολύ λιγότερα κυκλικά η διαγώνια φορτιζόμενα μέλη ανακυκλιζόμενης φόρτισης (Σχήμα 2(β) και (γ)). Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων γι' αυτήν τη μορφή της εξίσωσης έδωσε τις ακόλουθες εξισώσεις για την οριακή παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu,c}$.

- Ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη:

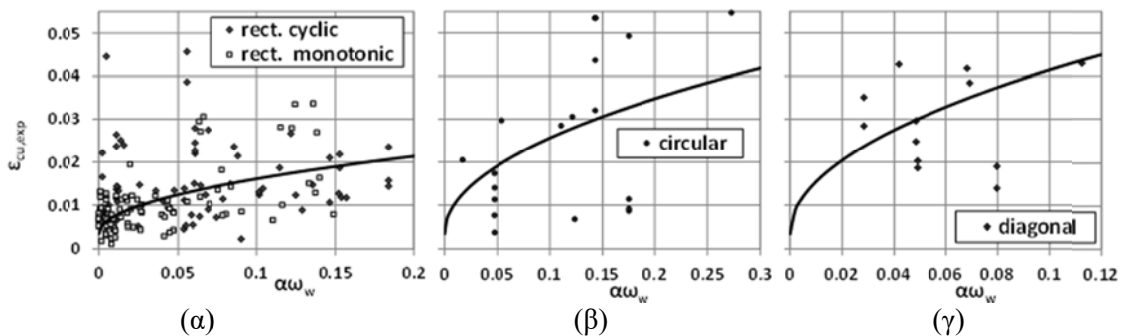
$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cu} + 0.04\sqrt{a\rho_w f_{yw} / f_c'} \quad (10a)$$

- Κυκλική διατομή (ανακυκλιζόμενη φόρτιση):

$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cu} + 0.07\sqrt{a\rho_w f_{yw} / f_c'} \quad (10b)$$

- Τριγωνική θλιβόμενη ζώνη (ανακυκλιζόμενη φόρτιση):

$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cu} + 0.12\sqrt{a\rho_w f_{yw} / f_c'} \quad (10c)$$



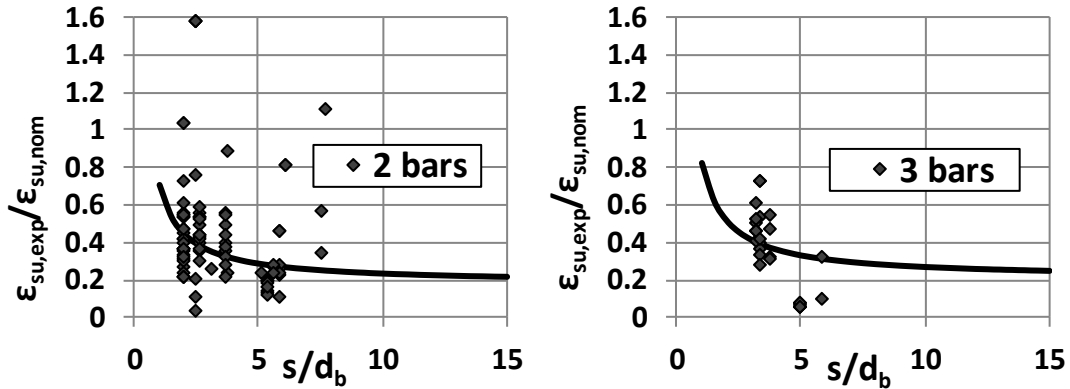
Σχήμα 2. Παραμορφώσεις των ακραίων ινών υπολογιζόμενες από τις πειραματικές μέγιστες καμπυλότητες για σύνθλιψη του σκυροδέματος του περισφιγμένου πυρήνα ως συνάρτηση του ενεργού ογκομετρικού μηχανικού ποσοστού περίσφιγξης και προσαρμοσμένες καμπύλες, Εξ. (10a) έως (10c).

Παρατηρήθηκε ότι η οριακή παραμόρφωση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, ε_{cu} , υπολογιζόμενη από τη μέγιστη καμπυλότητα, αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους της διατομής. Εάν h_o , d_o , x_o δηλώνουν το ύψος, το στατικό ύψος και το ύψος του ουδέτερου άξονα, αντίστοιχα, του περισφιγμένου πυρήνα (ή αυτά της συνολικής διατομής στην αποφλοίωση του σκυροδέματος των ακραίων θλιβόμενων ινών), αυτή η επιρροή του μεγέθους μπορεί να περιγραφεί από μία από τις ακόλουθες εξισώσεις. Η επιρροή του μεγέθους της διατομής εξαφανίζεται

για μεγέθη που συνηθίζονται στην πράξη. Γι' αυτά το ε_{cu} γίνεται ίσο με 0.0035.

$$0.0035 \leq \varepsilon_{cu} = (18.5 / h_o (mm))^2 \leq 0.01, \quad (11a)$$

$$\text{ή } \varepsilon_{cu} = 0.0035 + (3.5 / x_o (mm))^2 \leq 0.01 \quad (11b)$$



Σχήμα 3. Παραμορφώσεις των ακραίων εφελκόμενων ράβδων εκτιμώμενες από τις πειραματικές μέγιστες καμπυλότητες πειραμάτων ανακυκλιζόμενης φόρτισης που αστόχησαν λόγω θραύσης του χάλυβα, ως συνάρτηση του λόγου της κατακόρυφης απόστασης των συνδετήρων προς την διάμετρο των ράβδων και προσαρμοσμένη καμπύλη, Εξ. (14), ενδεικτικά για δοκίμια με 2 και 3 εφελκόμενες ράβδους.

Όσον αφορά τις εφελκόμενες ράβδους, οι παραμορφώσεις που υπολογίζονται με αντίστροφη διαδικασία από τις μέγιστες καμπυλότητες εξαρτώνται από: α) τον τύπο φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη), β) τον αριθμό των ράβδων σε μία συγκεκριμένη ζώνη της διατομής και γ) (σε μερικές περιπτώσεις) το λόγο διαμέτρου της ράβδου ως προς την κατακόρυφη απόσταση των συνδετήρων (Σχήμα 3). Η καλύτερη προσαρμογή επιτεύχθηκε με τις ακόλουθες σχέσεις για την οριακή παραμόρφωση των εφελκόμενων ράβδων, ε_{su} :

– για μονοτονική φόρτιση: $\varepsilon_{su,mon} = (1 - 0.3\sqrt{\ln N_{b,tens}}) \varepsilon_{su,nom}$ (12)

– για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, πριν την αποφλοίωση: $\varepsilon_{su,cy} = 0.4\varepsilon_{su,nom}$ (13)

– για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, μετά την αποφλοίωση (Σχήμα 3):

$$\varepsilon_{su,cy} = (4/15)\varepsilon_{su,nom} (1 + 3d_{bL} / s_h) (1 - 0.75e^{-0.4N_{b,compr}}) \quad (14)$$

όπου $\varepsilon_{su,nom}$ είναι η ονομαστική μήκυνση του χάλυβα στην εφελκυστική του αντοχή σε δοκιμή εφελκυσμού και $N_{b,tens}$ ή $N_{b,compr}$ δηλώνουν τον αριθμό των εφελκόμενων ράβδων ή αυτών στις ακραίες θλιβόμενες ίνες, αντίστοιχα. Σε ορθογωνικές διατομές υπό μονοαξονική κάμψη το $N_{b,tens}$ αντιστοιχεί στον οπλισμό με επιφάνεια $A_{s,1}$. Σε κυκλικές διατομές σε αυτές που βρίσκονται στη

συνολική εφελκόμενη ζώνη. Σε ορθογωνικές διατομές και μονοαξονική κάμψη το $N_{b,compr}$ αντιστοιχεί στον οπλισμό με επιφάνεια $A_{s,2}$. Στις διαγώνια φορτιζόμενες διατομές είναι ίσο με 1 (μία γωνιακή ράβδος), και με 2 στις κυκλικές διατομές.

Ο λόγος για τη σημαντική διαφορά του $\varepsilon_{su,mon}$ από το $\varepsilon_{su,nom}$ είναι στατιστικός, όπως στην επιρροή του μεγέθους της διατομής σε ψαθυρά υλικά (βλέπε Εξ. (11a) και (11b) στην παρούσα περίπτωση). Τα πειράματα μονοτονικής φόρτισης της βάσης που αστόχησαν λόγω θραύσης του εφελκόμενου χάλυβα είχαν από 1 έως 9 ράβδους στην εφελκόμενη ζώνη. Παρουσίασαν μία στατιστικά σημαντική μείωση του ε_{su} με την αύξηση του $N_{b,tens}$, διότι η μικρότερη τιμή της ε_{su} μεταξύ αυτών των ράβδων ελέγχει την αστοχία. Η μορφή της Εξ. (12) (γραμμική ως προς $\sqrt{\ln N}$) δεν είναι αυτή που προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα. Έχει ληφθεί από τους Benjamin and Cornell (1970) ως η πιο πιθανή τιμή σε μία Τύπου-I πιθανοτικής κατανομής ακραίας τιμής από τις μικρότερες τιμές ε_{su} για N ράβδους, οι οποίες όλες έχουν μία μέση τιμή ίση με $\varepsilon_{su,nom}$. Οι παράμετροι της γραμμικής εξάρτησης προσαρμόζονται μετά στα δεδομένα (Εξ.(12)).

Υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μία ράβδος θραύεται σε εφελκυσμό αφού έχει λυγίσει σε προηγούμενο ημικύκλο: ο λυγισμός προκαλεί μικρορωγμές στις ρίζες των νευρώσεων του χάλυβα, που εξαπλώνονται και επιταχύνουν τη θραύση όταν η ράβδος εφελκύεται σε επόμενο ημικύκλο. Πυκνοί συνδετήρες μειώνουν τη λυγηρότητα του χάλυβα και καθυστερούν το λυγισμό. Η λυγηρότητα εκφράζεται στην Εξ. (14) από το λόγο της κατακόρυφης απόστασης των συνδετήρων προς τη διάμετρο της ράβδου, s_h/d_{bL} : μία τιμή του s_h/d_{bL} ίση με 5 αυξάνει το ε_{su} κατά 28%, συγκριτικά με την τιμή για $s_h/d_{bL}=12$. Η καθυστέρηση του λυγισμού είναι, επίσης, η αιτία για τη βελτίωση του ε_{su} με τον αυξανόμενο αριθμό ράβδων στις ακραίες θλιβόμενες ίνες. Πριν λυγίσουν, αυτές οι ράβδοι έχουν την ίδια καμπύλωση με το μέλος στη διαμήκη διεύθυνση, οπότε η κυρτή πλευρά τους στρέφεται προς τα μέσα. Για να λυγίσουν αυτές, αυτή η καμπύλωση πρέπει να αντιστραφεί. Αυτό το φαινόμενο καθυστερεί το λυγισμό των ενδιάμεσων ράβδων αλλά αφήνει τις γωνιακές να λυγίσουν εγκαίρως στη διεύθυνση της φόρτισης. Οπότε, το ε_{su} αυξάνεται με τον αυξανόμενο αριθμό θλιβόμενων ράβδων. Οι ενδιάμεσες ράβδοι βελτιώνουν την περίσφιγξη του σκυροδέματος του πυρήνα και καθυστερούν την σύνθλιψη που επιτρέπει στις ελεύθερες ράβδους να λυγίσουν προς τα μέσα.

Η αξιοσημείωτη διασπορά των παραμορφώσεων των ακραίων θλιβόμενων ιών που υπολογίζονται με αντίστροφη διαδικασία από τις μέγιστες πειραματικές καμπυλότητες σε σύγκριση με τις προσαρμοσμένες καμπύλες αντικατοπτρίζει κυρίως τη σημαντική εγγενή διασπορά στην μέτρηση των καμπυλοτήτων.

Σημειώνεται ότι εκτός απ' την αξιοποίηση όλων των πειραματικών μετρήσεων καμπυλότητας σε ένα πείραμα (σε διάφορα ύψη από τη διατομή βάσης) δίδοντας το ίδιο βάρος σε κάθε μέτρηση, εξετάστηκαν και άλλες δύο εκδοχές: (α) Για κάθε πείραμα θεωρήθηκε ο μέσος όρος των μετρούμενων καμπυλοτήτων, με βάρος τη μονάδα για κάθε πείραμα, (β) Μόνο μία τιμή καμπυλότητας χρησιμοποιήθηκε, αυτής πιο κοντά στη βάση. Η περίπτωση (α) δίνει κατ' ουσίαν τις ίδιες εκτιμήσεις

των ε_{su} , $\varepsilon_{cu,c}$, όπως περιγράφονται παραπάνω. Για την περίπτωση (β), οι διαφορές δεν ήταν τόσο μεγάλες ώστε να δικαιολογούν σημαντικές αλλαγές στις οριακές παραμορφώσεις. Η μόνη απαιτούμενη αλλαγή είναι η χρήση $N_{b,compr} = 4$ για κυκλικές διατομές στην Εξ. (14).

Πίνακας 1. Στατιστικά μεγέθη λόγων πειραματικών και εκτιμώμενων καμπυλοτήτων.

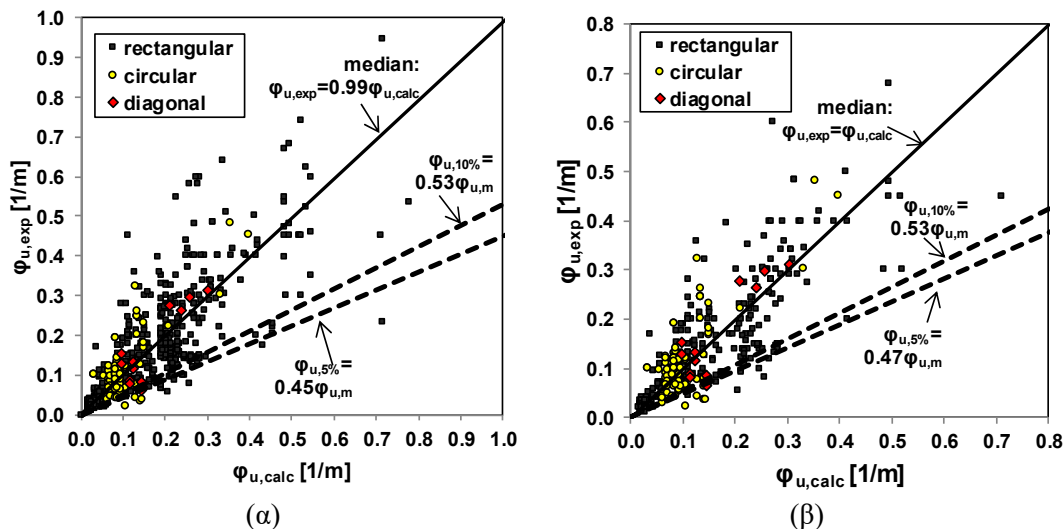
	$\varphi_{u,exp}/\varphi_{u,pred}$ για διαφορετικές συνθήκες δοκιμής ή τύπο αστοχίας	# πειρ.	Μέση τιμή*	Διάμεσος*	CoV [%]
1	Όλα τα πειράματα, προτεινόμενες εξισώσεις	645	1.06	0.99	45.8
2	Μονοτονική φόρτιση, ορθογωνικές ή κυκλικές διατομές	271	1.05	0.975	46.3
3	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ορθογωνική, κυκλική διατομή και φόρτιση κατά τη διαγώνιο	374	1.07	1.00	45.5
4	Χωρίς ολίσθηση των ράβδων από την αγκύρωση	477	1.07	1.00	47.7
5	Με ολίσθηση των ράβδων από την αγκύρωση	168	0.995	0.96	46.3
6	Ορθογωνικά, όλες οι αστοχίες, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	272	1.08	1.01	44.8
7	Αποφλοιώση σκυροδέματος επικάλυψης	65	1.06	1.03	38.8
8	Σύνθλιψη περισφιγμένου πυρήνα, μονοτονική φόρτιση	107	1.04	0.92	48.9
9	Σύνθλιψη περισφιγμένου πυρήνα, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	121	1.085	0.99	47.0
10	Θραύση εφελκόμενων ράβδων, μονοτονική φόρτιση	97	1.05	1.00	48.8
11	Θραύση εφελκόμενων ράβδων πριν την αποφλοιώση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	40	1.07	1.01	30.8
12	Θραύση εφελκόμενων ράβδων μετά την αποφλοιώση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	110	1.04	1.03	36.8
13	Κυκλικές διατομές, σύνθλιψη σκυροδέματος, μονοτονική/ανακυκλιζόμενη	20	1.09	1.07	47.2
14	Κυκλικές διατομές, θραύση γάλυβα, ανακυκλιζόμενη	72	1.05	0.98	49.7
15	Τετραγωνική διατομή, σύνθλιψη σκυρ/τος, ανακυκλιζόμενη φόρτιση παράλληλα στη διαγώνιο	12	0.99	1.05	33.3
16	CEN (2005a) επιλογή 1, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	374	1.36	1.15	59.7
17	CEN (2005a) επιλογή 2, ανακυκλιζόμενη φόρτιση	374	0.93	0.80	54.5
18	Caltrans (2006), ανακυκλιζόμενη φόρτιση	374	0.93	0.73	71.9
19	CEN (2005b), ανακυκλιζόμενη φόρτιση	374	1.07	0.88	64.2

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

Σύγκριση πειραματικών μέγιστων καμπυλοτήτων με τις εκτιμώμενες τιμές

Ο Πίνακας 1 δίδει τα στατιστικά μεγέθη του λόγου των πειραματικών με τις εκτιμώμενες τιμές καμπυλότητας ανά τρόπο αστοχίας και ανά τύπο διατομής. Τα στατιστικά μεγέθη δίνονται επίσης ξεχωριστά για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση και για περιπτώσεις με ή χωρίς ολίσθηση των ράβδων από την αγκύρωση. Σε όλες τις επιμέρους κατηγορίες, όπως και για το σύνολο των πειραμάτων (γραμμή 1 του Πίνακα 1), η διάμεσος είναι ίση ή πολύ κοντά στη μονάδα. Οι συντελεστές μεταβλητότητας, για το σύνολο των πειραμάτων (στη γραμμή 1) και κάθε επιμέρους κατηγορία, είναι μικρότεροι από τα μέλη με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη στους Biskinis and Fardis (2010b) – βλέπε Πίνακα 2 της αντίστοιχης δημοσίευσης. Σημειώνεται ότι οι Biskinis and Fardis (2010b)

πρότειναν σταθερές τιμές του λόγου $\varepsilon_{su}/\varepsilon_{su,nom}$, ίσους με 3/8 ή 7/12 για ανακυκλιζόμενη και μονοτονική φόρτιση, αντίστοιχα, $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ για το απερίσφιγτο σκυρόδεμα και μεγαλύτερη επιρροή της περίσφιγξης. Στο Σχήμα 4 συγκρίνονται οι πειραματικές μέγιστες καμπυλότητες με αυτές που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την παρούσα εργασία. Απεικονίζονται επίσης τα χαμηλότερα 10%- και 5%-κλάσματα (fractiles) των πειραματικών τιμών για δεδομένη εκτιμώμενη καμπυλότητα.



Σχήμα 4. Πειραματικές μέγιστες καμπυλότητες και εκτιμώμενες με χρήση των προτεινόμενων οριακών παραμορφώσεων υλικών για: (α) μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση και (β) για ανακυκλιζόμενη φόρτιση (ξεχωριστά)

Σύγκριση των πειραματικών τιμών μέγιστης καμπυλότητας έγινε επίσης και με τις τιμές που υπολογίστηκαν με χρήση των οριακών παραμορφώσεων για τους εξής τρεις κανονισμούς: CEN (2005a) ή (2005b) και Caltrans (2006). Στον CEN (2005a) υπάρχουν δύο επιλογές για το προσομοίωμα περίσφιγξης, μία με χρήση του προσομοιώματος του CEN (2004) (επιλογή 1) και μία δεύτερη με εξισώσεις που ομοιάζουν με τις Εξ. (3)-(5) της παρούσας εργασίας με αρκετές όμως διαφορές σε επιμέρους συντελεστές. Οι τελευταίες 4 γραμμές του Πίνακα 1 δίνουν τα στατιστικά μεγέθη του λόγου των πειραματικών τιμών με αυτές των εκτιμώμενων σύμφωνα με τους παραπάνω κανονισμούς. Η διασπορά είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα προσομοιώματα της παρούσας εργασίας και υπάρχει αξιοσημείωτο συστηματικό σφάλμα.

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

- Benjamin, J.R. and Cornell, C.A. (1970) *Probability, statistics and decision for Civil Engineers* McGraw Hill, New York, N.Y.
- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2010a) Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concrete*, 11(3), 127-138.
- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2010b) Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concrete*, 11(2), 93-108.
- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2013) Stiffness and cyclic deformation capacity of circular RC columns with or without lap-splices and FRP wrapping *Bull. Earthq Eng.* 11(5) 1447-1466
- CALTRANS (2006) *Seismic Design Criteria, Version 1.4* Sacramento, CA.
- CEN (2004) *European Standard EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.* Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- CEN (2005a) *European Standard EN 1998-3:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings.* Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- CEN (2005b) *European Standard EN 1998-2:2005 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges.* Comite Europeen de Normalisation. Brussels.
- Fardis, M.N. (2013) Performance- and displacement-based seismic design and assessment of concrete structures in the Model Code 2010. *Struct. Concrete*, 14(3), 215-229
- fib (2012) *Model Code 2010, Final draft.* Bulletin 65/66, Federation Internationale du Beton, Lausanne
- Grammatikou, S., Biskinis, D., and Fardis, M.N. (2016). Ultimate Strain Criteria for RC Members in Monotonic or Cyclic Flexure, *ASCE Journal of Structural Engineering* 142(9).
- Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N. (2001) Deformations of RC members at yielding and ultimate. *ACI Struct. J.* 98(2): 135-148
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. (1928) A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, Bull. 185, Un. Illinois Eng Exp Station, Champaign, ILL
- Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M. (1982) Analytical model for concrete confinement in tied columns. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 108(ST12), 2703-2722.