

Μ.Ν. Φαρδής, Π.Α. Χριστόπουλος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διάφοροι δείκτες έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για τη βλάβη που προκαλείται σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος από ανακυκλιζόμενη ένταση. Αυτοί οι δείκτες ανήκουν σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη περιλαμβάνει αυτούς που εκφράζουν τη μέγιστη παραμόρφωση του μέλους, ενώ η δεύτερη αυτούς που μετρούν την ενέργεια που απορροφάται από το μέλος κατά την ανελαστική του απόκριση ή τον αριθμό κύκλων ανελαστικής παραμόρφωσης. Κάθε δείκτης βλάβης πρέπει να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια: 1) Πρέπει να είναι σχετικά ευχερής ο υπολογισμός, με τα διαθέσιμα υπολογιστικά μέσα, της "Απαιτούμενης" τιμής του δείκτη, που αναπτύσσεται στα μέλη της κατασκευής από μία γνωστή ιστορία φόρτισης ή επιβεβλημένης παραμόρφωσης. Η τιμή αυτή παίζει το ρόλο του λόγω των εξωτερικών δράσεων εντατικού μεγέθους. 2) Πρέπει να είναι σχετικά εύκολο να εκτιμηθεί η τιμή του δείκτη βλάβης (ή ο συνδυασμός των τιμών διαφόρων δεικτών που μπορεί να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα), που αντιστοιχεί σε αστοχία του μέλους. Η τιμή αυτή (ή ο συνδυασμός τιμών) καλείται "Διαθέσιμη" τιμή του δείκτη και παίζει το ρόλο της αντοχής του μέλους. Κατωτέρω περιγράφονται οι κυριότεροι δείκτες βλάβης που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, αρχίζοντας από εκείνους που εκφράζουν τη μέγιστη παραμόρφωση του μέλους.

ΔΕΙΚΤΕΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων αναφέρεται σε μία (συνήθως ακραία) διατομή ενός μέλους, και ορίζεται σαν ο λόγος της μέγιστης καμπυλότητας που αναπτύσσεται στη διατομή, Φ_{max} , προς αυτήν στη διαρροή, Φ_y :

$$\mu_\Phi = \Phi_{max} / \Phi_y \quad (1)$$

Η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων είναι ο λόγος:

$$\mu_{\Phi,u} = \Phi_u / \Phi_y \quad (2)$$

της οριακής τιμής της καμπυλότητας στην αστοχία, Φ_u , προς την Φ_y . Ένα πλεονέκτημα της μ_Φ σαν μέτρο βλάβης είναι ο σχετικά εύκολος υπολογισμός της διαθέσιμης τιμής της από το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων, $M-\Phi$, που κατασκευάζεται με βάση την υπόθεση της επιπεδότητας των διατομών και τους νόμους σ-ε των υλικών. Ένα τέτοιο διάγραμμα η διαρροή της διατομής συνήθως θεωρείται ότι ταυτίζεται με τη διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού, και η Φ_y υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi_y = \epsilon_y / (1 - \xi_y - d_1/h)h \quad (3)$$

όπου ξ_y : ύψος θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή ανηγμένο στο συνολικό ύψος h της διατομής, ϵ_y : μήκυνση διαρροής κάλυθα, και d_1 : απόσταση οπλισμού από την πλησιέστερη ακραία ίνα. Υποθέτοντας παραβολικό διάγραμμα σ-ε για το σκυρόδεμα σε θλίψη με τιμές f_c , ϵ_c στην κορυφή, προκύπτει η εξίσωση για το ξ_y :

$$\epsilon_y / \epsilon_c (1 + \epsilon_y / 3 \epsilon_c) \xi_y^3 + (v + \omega_1 + \omega_2 - \epsilon_y / \epsilon_c (1 - d_1/h)) \xi_y^2 - (\omega_2 + 2(1 - d_1/h)(v + \omega_1)) \xi_y + (1 - d_1/h)((v + \omega_1)(1 - d_1/h) + \omega_2 d_1/h) = 0 \quad (4)$$

όπου ω_1 , ω_2 τα μηχανικά ποσοστά εφελκυσμένου και θλιβόμενου κάλυθα, αντίστοιχα, και v η ανηγμένη αξονική δύναμη στη διατομή, με τη θλίψη θετική. Για σχετικά μικρές τιμές του v (π.χ. μέχρι 0.3) το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται περίπου ελαστικά μέχρι και τη διαρροή του εφελκυσμένου κάλυθα, με Μέτρο Ελαστικότητας E_c . Προκύπτει έτσι μία δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς ξ_y με λύση:

$$\xi_y = f_c / E_c \epsilon_y [-(\omega_1 + \omega_2 + v) + / (\omega_1 + \omega_2 + v)^2 + 2 \epsilon_y E_c / f_c [(1 - d_1/h)(v + \omega_1) + \omega_2 d_1/h]] \quad (4a)$$

Για τον καθορισμό της Φ_u χρειάζεται να ορισθεί το τι θεωρούμε αστοχία (δείκτης: u). Ένας τρόπος είναι να θεωρήσουμε ότι αυτή ταυτίζεται με την

κορυφή του διαγράμματος $M-\Phi$, όπου η τιμή του M είναι μέγιστη. Εναλλακτικά, η αστοχία μπορεί να ταυτισθεί συμβατικά με το σημείο του φθιτού κλάδου του διαγράμματος $M-\Phi$ που αντιστοιχεί σε 90% ή 85% (Tassios, 1988) της μέγιστης ροπής. Αυτός ο τρόπος ορισμού της αστοχίας δίνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές της $\mu_{\phi,u}$ σε σύγκριση με τον προηγούμενο. Ενδιάμεσες τιμές, αλλά πλησιέστερες σ' αυτές που δίνει ο πρώτος τρόπος, προκύπτουν αν σαν αστοχία θεωρηθεί η υπέρβαση μιάς οριακής τιμής της δλιπτικής παραμόρφωσης ε_{su} στην ακραία δλιθόμενη ίνα. Αυτή η τιμή του ε_{su} λαμβάνεται συνήθως ίση με την παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε $\sigma = 0.85f_c$ στο φθιτό κλάδο του διαγράμματος $\sigma-\varepsilon$. Για ορθογωνικές διατομές με διαστάσεις πλευρών b και h και με κλειστούς συνδετήρες με μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό ω_w και απόσταση s , οι οποίοι συγκρατούν στις γωνίες τους η συνολικά ράβδους κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής, ο Tassios (1988a) προτείνει τη σχέση:

$$\varepsilon_{su} = 0.0035 + 0.1a_n a_m \omega_w \quad (5)$$

όπου $a_n = 1 - 1/3n$, και $a_m = (1 - s/2b)(1 - s/2h)$.

Από την τιμή της ε_{su} η καμπυλότητα αστοχίας υπολογίζεται απευθείας:

$$\Phi_u = \varepsilon_{su} / \xi_u h \quad (6)$$

αρκεί να είναι γνωστή η τιμή του ανηγμένου ύψους της δλιθόμενης ζώνης στην αστοχία, ξ_u . Από παραμετρικές μελέτες (Tassios 1988) έχει προκύψει ότι η τιμή του ξ_u μπορεί να υπολογισθεί κατά προσέγγιση με βάση τη συνθήκη ισορροπίας, θεωρώντας ότι στην αστοχία η μέση τάση σκυροδέματος στη δλιθόμενη ζώνη ισούται με $0.74f_c$. Προκύπτει έτσι $\xi_u \approx 1.35(v + \omega_1 - \omega_2)$. Για συμμετρικά οπλισμένες διατομές ($\omega_1 = \omega_2$) και για $v > 0$, ο Tassios (1988a) προτείνει επίσης την εξής προσέγγιση:

$$\xi_y - d_1 / h \approx 0.4 + 0.5v \quad (7)$$

οπότε η διαδέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ισούται περίπου με:

$$\mu_{\phi,u} \approx (0.0035 + 0.1a_n a_m \omega_w)(0.6 - 0.5v) / 1.35 \varepsilon_y (v + \omega_1 - \omega_2) \quad (8a)$$

Ο Tassios (1988a) προτείνει και μία ακριβέστερη σχέση για το $\mu_{\phi,u}$ που λαμβάνει υπόψη α) την αποφλοίωση της διατομής πριν την αστοχία, με αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας της διατομής από bh σε $A_o = b_o h_o$, όπου b_o , h_o οι διαστάσεις του πυρήνα της διατομής που περικλείεται από συνδετήρες, και β) την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος λόγω της περίσφυξης κατά: $f^*_c / f_c = \min(1 + 2.5a_n a_m \omega_w, 1.125 + 1.25a_n a_m \omega_w)$:

$$\mu_{\phi,u} = \varepsilon_{su}(1 + b_h / A_o(1 - 2.5v)) b h f^*_c / 2 A_o f_c (v \varepsilon_y + 0.3 \omega_1) \quad (8b)$$

όπου η ε_{su} δίνεται από την εξ. (5).

Οι εξ. (8a), (8b) έχουν αναπτυχθεί για διατομές υπό αξονική δλίψη, $v > 0$. Για $v = 0$ η εξ. (8a) προβλέπει άπειρη διαδέσιμη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων, ενώ η εξ. (8b) υπερβολικά μεγάλες τιμές. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί η ημι-εμπειρική σχέση που προτάθηκε για δοκούς (Tassios, 1988b):

$$\mu_{\phi,u} = 1.2 \varepsilon_{su} [0.6 / (v + \omega_1 - 0.5 \omega_2) - 1] \varepsilon_y \quad (8c)$$

Λόγω της ευκολίας υπολογισμού της, η $\mu_{\phi,u}$ προσφέρεται για παραμετρικές αναλύσεις της επιρροής διαφόρων γεωμετρικών και μηχανικών παραμέτρων. Με βάση τέτοιες αναλύσεις έχουν προταθεί απλές προσεγγιστικές εκφράσεις για τη $\mu_{\phi,u}$. Επί παραδείγματι ο Keintzel (1986) πρότεινε τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mu_{\phi,u} \approx [0.5 + (3 - 4 \max(v, 0.25))(1 - s/b_{min}) \omega_w] / (v + \omega_1 - \omega_2) \quad (9a)$$

$$\mu_{\phi,u} \approx (1.45 - 1.4v + 4(1 - s/b_{min}) \omega_w) / (v + \omega_1 - \omega_2) \quad (9b)$$

ανάλογα με το αν η Φ_u υπολογίζεται στην κορυφή του διαγράμματος $M-\Phi$, ή στο 90% της μέγιστης ροπής στο φθιτό κλάδο. Οι εξ. (9a), (9b) δίνουν γενικά μεγαλύτερες τιμές από τις εξ. (8), (8a), (8b).

Σε μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις κατασκευών με προσομοίωμα συγκεντρωμένης ή κατανεμημένης ανελαστικότητας για τα μέλη, η μέγιστη τιμή της καμπυλότητας στο άκρο ενός μέλους υπολογίζεται έμμεσα, μέσω της σχέσης $M-\Phi$ και της μέγιστης τιμής της ροπής στο άκρο, M_{max} , κατά την απόκριση. Έτσι η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_{\phi} = \Phi(M_{max}) / \Phi_y = EI \Phi(M_{max}) / M_y \quad (10)$$

όπου M_y η ροπή διαρροής στο άκρο του μέλους και EI η ελαστική δυσκαμψία της ρηγματωμένης διατομής μέχρι τη διαρροή.

Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων έχει ένα βασικό μειονέκτημα: Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η έννοια της καμπυλότητας διατομής δεν έχει φυσικό νόημα, επειδή όλα τα μη-γραμμικά φαινόμενα, όπως η ρηγμάτωση, η ολίσθηση των ράβδων, ο λυγισμός του θλιβόμενου κάλυθα, κ.λ.π., λαμβάνουν χώρα σ' ένα πεπερασμένο τμήμα του μήκους του μέλους και όχι σε στάθμη διατομής. Επομένως, πρέπει να αναφέρεται κανείς στη μέση καμπυλότητα ενός τμήματος του μέλους, ή ισοδύναμα στη σχετική γωνία στροφής των ακραίων διατομών του τμήματος αυτού. Μάλιστα αυτός είναι και ο τρόπος πειραματικού προσδιορισμού της τιμής της Φ_u .

Ο δείκτης πλαστιμότητας γωνιών στροφής, μ_θ , στην ακραία διατομή ενός μέλους ορίζεται σαν ο λόγος της μέγιστης γωνίας στροφής της εμφανιζόμενης στον άξονα του μέλους, ως προς τη χορδή που συνδέει το εν λόγω άκρο με το σημείο καμψής του μέλους (όπου $M = 0$), προς την τιμή της γωνίας αυτής στην διαρροή της ακραίας διατομής, θ_y :

$$\mu_\theta = \theta_{max} / \theta_y \quad (11)$$

Αν η ροπή M μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος του μέλους, δηλ. η τέμνουσα V είναι σταθερή, το μήκος l από το άκρο μέχρι το σημείο καμψής ισούται με το άνοιγμα διάτμησης, M/V , στην ακραία διατομή. Αυτό το μήκος μπορεί να προσομοιωθεί σαν πρόβολος, στο άκρο του οποίου ασκείται η δύναμη V προκαλώντας εγκάρσια μετακίνηση (θέλος κάμψης) δ , που ισούται με θl . Αυτή η μετακίνηση περιλαμβάνει την επιρροή όλων των ρωγμών, εγκάρσιων ή λοξών ως προς τον άξονα, στο μήκος l , την επιρροή της ολίσθησης λόγω συνάφειας και της συμβολής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό μεταξύ των ρωγμών, των διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και όλων των άλλων μη-γραμμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο μήκος l .

Η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής, $\mu_{\theta,u}$, ισούται με:

$$\mu_{\theta,u} = \theta_u / \theta_y \quad (12)$$

Η γωνία στροφής στην αστοχία, θ_u , υπολογίζεται συνήθως στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα του μέλους, δηλ. στην καμπτική αντοχή, M_u , της ακραίας διατομής. Η γωνία στροφής στη διαρροή, θ_y , αντιστοιχεί στη διαρροή του εφελκυσμένου κάλυθα στην ακραία διατομή. Έτσι η διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής έχει περισσότερο φυσικό νόημα και προσδιορίζεται πειραματικά ευκολότερα από την αντίστοιχη τιμή της $\mu_{\theta,u}$, υπολογίζεται όμως δυσκολότερα.

Οι Park και Ang (1985) πρότειναν έναν ημιεμπειρικό τρόπο υπολογισμού των θ_y και $\mu_{\theta,u}$, συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους. Το προσομοίωμά τους αναπτύχθηκε με βάση πειραματικά αποτελέσματα 142 πειραμάτων μονοτονικής φόρτισης δοκών ή υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής και 261 ανακυκλιζόμενης. Τα δοκίμια των παραπάνω πειραμάτων είχαν λόγους διάτμησης από 1 έως 7, και εμφάνισαν ποικίλους τρόπους αστοχίας, πλαστικούς ή ψαθυρούς, καμπτικούς ή διατμητικούς. Το προσομοίωμα των Park και Ang, με λίγες δικές μας επεκτάσεις και τροποποιήσεις είναι το εξής:

Θεωρούνται χωριστές συμβολές στη θ_y λόγω καμπτικών παραμορφώσεων (δείκτης: flex), ολίσθησης κάλυθα (δείκτης: slip) και διατμητικών παραμορφώσεων (δείκτης: shear):

$$\theta_y = \theta_{y,flex} + \theta_{y,slip} + \theta_{y,shear} \quad (14)$$

Ο πρώτος όρος στην εξ. (14) ισούται με:

$$\theta_{y,flex} = 1/3 \Phi_y M/V \quad (15)$$

όπου η Φ_y υπολογίζεται από την εξ. (3). Αν στην τελευταία χρησιμοποιείται η τιμή του ξ_y από την εξ. (4a) με $v = 0$, που συμβολίζεται εδώ ως ξ_{y0} , οι Park και Ang πολλαπλασιάζουν την τιμή του Φ_y που προκύπτει με ένα διορθωτικό συντελεστή, που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του v και της μη-γραμμικότητας του σκυροδέματος:

$$\Phi_y = [1.05 + (0.45 / (0.84 + 2\omega_1 - \omega_2) - 0.05) v / 0.3] \xi_{y0} / (1 - \xi_{y0} - d_1/h) h \quad (16)$$

Ο 2ος όρος της εξ. (14) προκύπτει από την εξής σχέση τάσης συνάφειας (τ) -

σχετικής ολίσθησης (s):

$$\tau = \tau_{max}(s/s_1)^a \quad (17)$$

στην οποία $a = 1/3$, $s_1 = 0.025\Phi$, και $\tau_{max} = 10.3\text{MPa}$ ή 6.2MPa για ευνοϊκές ή δυσμενείς συνθήκες συνάφειας, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 1990 του CEB για σκυρόδεμα με συνθήκη εγκιβωτισμό είναι: $a = 0.25-0.35$, $\tau_{max} = 2/f_c$ και $s_1 = 0.25\text{mm}$ ή $s_1 = 0.4\text{mm}$ για ευνοϊκές ή δυσμενείς συνθήκες συνάφειας, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δεν διαφέρουν σημαντικά από τις ανωτέρω. Έτσι, θεωρώντας την τιμή $1/3$ σαν ικανοποιητική μέση τιμή για το a , η εξ. (17) σε συνδυασμό με τις συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστού, δίνει τη σχετική ολίσθηση στη θέση ρωγμής όπου η τάση σ_m του οπλισμού είναι γνωστή:

$$s = \Phi^{5/4} (\sigma_m / \sqrt{6E_s \tau_{max} s_1})^{3/2} \quad (18)$$

(διαστάσεις m, MPa). Με την τιμή του s_1 κατά Park και Ang, η εξ. (18) γίνεται:

$$s \approx 7 \times 10^{-5} \Phi (\sigma_m / \tau_{max})^{3/2} \quad (18a)$$

Τα αποτελέσματα των εξ. (18) και (18a) δεν διαφέρουν σημαντικά, έτσι, παρόλο που οι Park και Ang βασίζουν τον υπολογισμό των θ_y και μ_{ew} στην εξ. (18a), μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά στα παρακάτω η γενικότερη εξ. (18). Με βάση τα ανωτέρω ο 2ος όρος της εξ. (14) υπολογίζεται ως εξής:

$$\theta_{y, slip} = s_y / z \quad (19)$$

όπου s_y είναι η τιμή του s από την Εξ. (18) ή (18a) για $\sigma_m = f_y$, και $z \approx d-d_c$, ή $0.9d$, είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων.

Ο 3ος όρος της εξ. (14) υπολογίζεται ως εξής: Σε κάθε λοξή ρωγμή θεωρείται ότι αναπτύσσεται μία γωνία στροφής θ_m , προκαλώντας εγκάρσια μετακίνηση του άκρου του προβόλου κατά $x_1 \theta_m$, όπου x_1 είναι η μέση απόσταση της ρωγμής από το άκρο. Η συνολική εγκάρσια μετακίνηση ισούται με θ_m επί τον αριθμό των λωξών ρωγμών επί τη μέση απόστασή τους από το άκρο. Μέχρι απόσταση:

$$l' = z + d f_{ct} / \min(0.75/f_c, 0.45/f_c + 100\rho_1 / \max(M/Vd, 1)) \quad (20)$$

από το άκρο του προβόλου δεν αναπτύσσονται λοξές ρωγμές (f_{ct} : εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος σε MPa και ρ_1 : ποσοστό εφελκυσμένου χάλυβα). Στο υπόλοιπο, οι λοξές ρωγμές έχουν μέση απόσταση z . Έτσι, επιπλέον της ίσης λοξής ρωγμής που αρχίζει από τη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής, υπάρχουν $(l-l')/2z$ λοξές ρωγμές, με μέση απόσταση από το άκρο του προβόλου $(l+l')/2$. Τελικά:

$$\theta_{y, shear} = \theta_m [1 + (l+l')/(l-l')/2z] \quad (21)$$

Μετά από στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι Park και Ang (1985) πρότειναν τις εξής σχέσεις για τη διατμητική γωνία στροφής σε μία λοξή ρωγμή: Αν $M/Vd > 2.5$:

$$\theta_m = 0.002 / (M/Vd - 0.5) [1 + 1.35 \max(M/Vd - 4, 0) u'] \quad (22a)$$

Διαφορετικά:

$$\theta_m = 0.002 / \max(M/Vd - 0.5, 1) [1 + 0.925 u' / (\max(0.2, 100\rho_{mw}) - 0.4)] \quad (22b)$$

όπου $\rho_{mw} = A_{mw}/sb_w$ είναι το ποσοστό του οπλισμού κορμού του παράλληλου στη διεύθυνση της τέμνουσας V , και

$$u' = 2.4 \tau_b / \sqrt{f_c} - 1 > 0 \quad (23)$$

Στην εξ. (23) τ_b είναι η μέση τάση συνάφειας επί των εφελκυσμένων ράβδων στο μήκος l , που ισούται περίπου με:

$$\tau_b = 0.25 \Phi f_y V / M \quad (24)$$

Η τιμή της θ_y που υπολογίζεται από την εξ. (14), με τη βοήθεια των εξ. (15), (16), (18), (18a), (19), (21)-(24), συμβολίζεται εδώ με $\theta_{y, RA}$, και ισούται με τη μέση τιμή του θ_y στα 244 από τα πειράματα που χρησιμοποίησαν οι Park και Ang στα οποία ο εφελκυσμένος χάλυβας διέρρευσε πριν την αστοχία του δοκιμίου σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη ένταση. Για $\theta_y = \theta_{y, RA}$, η διαθέσιμη τιμή του μ_{ew} εξαρτάται κυρίως από την τιμή της κύριας θλιπτικής παραμόρφωσης σκυροδέματος στη στάθμη του θλιβόμενου χάλυβα κατά τη διαρροή του εφελκυσμένου:

$$\epsilon_p = 0.5 (\epsilon_{m2} + \sqrt{\epsilon_{m2}^2 + \theta_m^2}) \quad (25)$$

όπου

$$\varepsilon_{m2} = \Phi_y (\xi_y - d_1/h)h \quad (25a)$$

είναι η παραμόρφωση στη διεύθυνση του δλιζόμενου κάλυθα κατά τη διαρροή του εφελκυσμένου, και η διατμητική παραμόρφωση θ_m δίνεται από τις Εξ. (22). Η τιμή της $\mu_{e,u}$ εξαρτάται επίσης και από το ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων, ρ_w . Έτσι τελικά οι Park και Ang προτείνουν τη σχέση:

$$\mu_{e,u} = \exp(65.4\rho_w + 0.38)(\varepsilon_p/\varepsilon_c)^{21.8\min(0.02, \rho_w) - 2.15} \geq 1.0 \quad (26)$$

Η Εξ. (26) προέκυψε από τα αποτελέσματα 142 μονοτονικών πειραμάτων με M/Vd μεταξύ 1 και 7, ω_1 από 0.05 έως 0.5, v μεταξύ 0 και 0.5 και f_c μεταξύ 17 και 35 MPa. Η τιμή της $\mu_{e,u}$ από την Εξ. (26) συμβολίζεται με $\mu_{e,uPA}$ και ισούται με τη μέση διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής των μονοτονικών πειραμάτων. Για να ληφθεί υπόψη η διασπορά ως προς τη μέση τιμή, η $\mu_{e,u}$ μπορεί να θεωρηθεί σαν τυχαία μεταβλητή με λογαριθμοκανονική κατανομή και συντελεστή μεταβλητότητας 0.38.

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των ίδιων μονοτονικών πειραμάτων δίνει επίσης το λόγο της πειραματικής οριακής ροπής αστοχίας προς τη ροπή διαρροής κατά τον υπολογισμό:

$$M_u/M_y = (1.24 - 0.15\omega_1 - 0.5v)\varepsilon \quad (27)$$

όπου ε λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή 1.0 και τυπική απόκλιση 0.12.

Η απαιτούμενη τιμή του μ_e προκύπτει εύκολα από μη-γραμμική ανάλυση της απόκρισης της κατασκευής, ιδιαίτερα αν χρησιμοποιείται το προσομοίωμα σημειακών πλαστικών αρθρώσεων για τα μέλη, οπότε όλη η ανελαστική δράση του τμήματος του μέλους μεταξύ του άκρου και του σημείου καμψής συγκεντρώνεται στο ανελαστικό στρωφικό ελατήριο του άκρου. Στο ελατήριο αυτό αναπτύσσεται μόνο πλαστική στρόφη, από τη μέγιστη τιμή της οποίας στη διάρκεια της απόκρισης, $\theta_{p1,max}$, υπολογίζεται η μ_e :

$$\mu_e = \theta_{p1,max}/\theta_y + M_{max}/M_y \quad (28)$$

Οι Lybas και Sozen (1977) πρότειναν μία παραλλαγή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής, το Πηλίκο Βλάβης, DR. Ο δείκτης αυτός ισούται με το λόγο της αρχικής δυσκαμψίας προς την τέμνουσα δυσκαμψία στο σημείο της μέγιστης θ , δηλ. προς M_{max}/θ_{max} . Αν η αρχική δυσκαμψία ληφθεί ίση με την τέμνουσα δυσκαμψία στη διαρροή, M_y/θ_y , τότε η απαιτούμενη και η διαθέσιμη τιμή του ηηλικίου βλάβης είναι:

$$DR = \mu_e (M_y/M_{max}) \quad (29)$$

$$DR_u = \mu_{e,u} (M_y/M_u) \quad (30)$$

ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ

Ανακυκλιζόμενη ένταση μεγάλου εύρους μειώνει τη δυσκαμψία και την αντοχή, οδηγώντας τελικά σε αστοχία για τιμές της μέγιστης απόκρισης μικρότερες από αυτές που προκαλούν αστοχία υπό μονοτονική ένταση, δηλ. προτού εξαντληθεί η διαθέσιμη τιμή του δείκτη βλάβης, $\mu_{e,u}$, $\mu_{e,u}$, DR_u , κ.λ.π. Ακόμα και ο τρόπος αστοχίας μπορεί να αλλάξει, από καμπτικό για μονοτονική ένταση, σε διατμητικό ή λόγω συνάφειας υπό ανακυκλιζόμενη. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η συμπλήρωση ή και αντικατάσταση των μονοτονικών δεικτών βλάβης με αθροιστικούς. Έτσι ο Banon (1979) εισήγαγε την Ανηγμένη Αθροιστική Γωνία Στροφής, NCR, που ορίζεται σαν το άθροισμα των απολύτων τιμών των μεγίστων πλαστικών γωνιών στροφής σε κάθε κύκλο ανελαστικής απόκρισης του άκρου του μέλους, διηρημένο με θ_y .

$$NCR = \sum \theta_{p1}/\theta_y \quad (31)$$

Για μονοτονική φόρτιση ο NCR ισούται με $\mu_e - 1$. Ένας εναλλακτικός αθροιστικός δείκτης είναι η Ανηγμένη Απορρόφηση Ενέργειας, που ορίζεται από τον Banon (1979) σαν η συνολική ενέργεια που απορροφάται μέσω πλαστικής στροφής, δια της ελαστικής ενέργειας στη διαρροή:

$$E_n = [M\theta_{p1}/0.5M_y\theta_y] \quad (32)$$

Παρά το ότι η απαιτούμενη τιμή της υπολογίζεται δυσκολότερα από αυτήν του NCR (απαιτεί ολοκλήρωση της επιφάνειας που περικλείεται από τους βρόχους $M-\theta_{p1}$ των ανελαστικών στρωφικών ελατηρίων), η E_n υπερτερεί της τελευταίας

γιατί λαμβάνει υπόψη και τις ροπές και τις πλαστικές γωνίες στρώσης. Οι δείκτες αυτοί είναι περίπου ισοδύναμοι και στατιστικά συσχετισμένοι, καθώς και οι δύο μετρούν τον αριθμό κύκλων ανελαστικής παραμόρφωσης. Αν η σχέση $M-\theta$ είναι ελαστική-πλήρως πλαστική, οι δύο δείκτες ταυτίζονται. Οι Darwin και Nmai (1986) πρότειναν την αντικατάσταση του παρονομαστή της Εξ. (32) με $(M_y + \theta_y + M_y - \theta_y)/2$ ώστε να ληφθεί υπόψη η διαφορά μεταξύ εφελκυσμένου και θλιβόμενου χάλυβα. Για συμμετρικές διατομές η τροποποιημένη Ανηγμένη Απορρόφηση Ενέργειας, που συμβολίζεται με $E'n$, ισούται με το μισό της E_n από την Εξ. (32). Οι ίδιοι πρότειναν επίσης την παρακάτω σχέση για τη Διαθέσιμη τιμή της $E'n$ στην αστοχία:

$$E'n_u = 18.5 / \rho_w f_y w f_c / (V_{max} / bd)^2 - 17 \quad (33)$$

όπου V_{max} η μέγιστη τιμή της δρώσας τέμνουσας (μονάδες: MN και m). Οι ανωτέρω αθροιστικοί δείκτες έχουν προταθεί σαν αυτοδύναμα μέτρα της θλάθης από μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη ένταση. Η θλάθη αυτή περιγράφεται όμως καλλίτερα από ένα συνδυασμό ενός από τους αθροιστικούς δείκτες και ενός από τους δείκτες που μετρούν την παραμόρφωση για μονοτονική ένταση. Ο Banon (1979) προσπάθησε να καθορίσει την αστοχία ή όχι σ' ένα σύνολο 32 πειραμάτων με ανακυκλιζόμενη φόρτιση χρησιμοποιώντας σαν ζεύγος δεικτών μία παραλλαγή του DR, το Πηλίο Καμπτικής Βλάβης, που περιλαμβάνει μόνο καμπτικές παραμορφώσεις, και την E_n . Η μελέτη του Banon υποδεικνύει ένα γραμμικό συνδυασμό των δύο αυτών δεικτών. Πράγματι οι Park και Ang (1985) εισήγαγαν τον ανηγμένο γενικό δείκτη:

$$D_{RA} = [\mu_e + 0.58 E_n] / \mu_{e, uRA} = [\theta + 6 \int M / M_y d\theta_{p1}] / \mu_{e, uRA} \theta_y, pA \quad (34)$$

όπου

$$\theta = 0.7^{100} \rho_w [(0.073 \max(1.7, M/Vd) + 0.24 \max(0.2, v) + 31.4 \max(0.0075, \rho_1) - 0.447] \quad (35)$$

Η Εξ. (35) προέκυψε από στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων 261 πειραμάτων ανακυκλιζόμενη φόρτισης, έτσι ώστε η μέση τιμή του D_{RA} στην αστοχία να ισούται με 1 (για την ακρίβεια με 1.008), και η διασπορά του να είναι ελάχιστη (τυπική απόκλιση 0.535). Ο δείκτης θλάθης των Εξ. (34), (35) φαίνεται να είναι ο καλλίτερος που έχει προταθεί μέχρι σήμερα, γιατί 1) έχει αναπτυχθεί με βάση μεγάλο αριθμό πειραματικών αποτελεσμάτων, 2) η τιμή του υπολογίζεται εύκολα με βάση τα αποτελέσματα μιας μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης και τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέλους, και 3) εκφράζει ποσοτικά (με λογαριθμοκανονική κατανομή με τις ανωτέρω παραμέτρους) την εγγενή αβεβαιότητα της αστοχίας μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση.

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για 28 πειράματα σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και για τους δείκτες θλάθης που αναπτύχθηκαν ανωτέρω, υπολογίσθηκε αφενός η πειραματική "διαθέσιμη" τιμή, αφετέρου η τιμή που προβλέπεται από τις αντίστοιχες εκφράσεις που έχουν προταθεί για το δείκτη συναρτήσει της γεωμετρίας και των μηχανικών χαρακτηριστικών του μέλους. Για κάθε συνδυασμό πειράματος και δείκτη υπολογίσθηκε ο λόγος της πειραματικής προς την προβλεπόμενη τιμή. Τέλος υπολογίσθηκαν η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου αυτού για κάθε δείκτη. Κριτήριο αποτίμησης του δείκτη είναι η διαφορά της μέσης τιμής από το 1. Δεύτερο κριτήριο είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας του παραπάνω λόγου.

Όσο μικρότερος είναι αυτός τόσο χρησιμότερος είναι ο δείκτης θλάθης. Τα 28 δοκίμια που περιελήφθησαν είναι: Τα R1-R6 και T1-T3 των Ma et al (1976), τα A4, A7, A8, A11 και A12 των Atalay και Penzien (1975), το H7 των Hanson και Connor (1972), το W33 των Bertero et al (1974), το VBC3 των Vivathanatepa et al (1979), τα S3-S12 των Scribner και Wight (1976) και το P43 των Popov et al (1972). Από τα δοκίμια αυτά, 18 είχαν περιληφθεί στα 46 δοκίμια με βάση τα οποία αναπτύχθηκε από τους Darwin και Nmai η Εξ. (33), ενώ μόνο τα 5 δοκίμια των Atalay και Penzien περιλαμβάνονται στα 403 δοκίμια της βάσης δεδομένων των Park και Ang

(1985). Αυτή η βάση δεδομένων περιελάμβανε μόνο δοκίμια ορθογωνικής διατομής. Έτσι οι σχέσεις των Park και Ang, καθώς και οι Εξ.(8), (9), ισχύουν ουσιαστικά μόνο για τέτοιες διατομές. Όμως τα 28 δοκίμια που εξετάζονται εδώ περιλαμβάνουν και 3 διατομές T, τα T1-T3 των Ma et al (1976). Για την εφαρμογή όμως των θεωρητικών ή εμπειρικών σχέσεων που δίνουν την διαδέσιμη τιμή του δείκτη βλάβης, το πέλμα της διατομής T ελήφθη υπόψη μόνο ως προς τον διαμήκη οπλισμό που περιείχε, και όχι ως προς το σκυρόδεμα. Η σοβαρότερη δηλ. παραδοχή που έγινε για τις διατομές T είναι ότι αγνοήθηκε η συμβολή του σκυροδέματος της πλάκας σε θλίψη όταν εφελκύεται το κάτω πέλμα, συμβολή που ενισχύει το πάνω πέλμα και αυξάνει σημαντικά την πλαστιμότητα της διατομής όταν η πλάκα είναι σε θλίψη.

Στον Πίν.1 αναγράφονται τα εξής χαρακτηριστικά των δοκιμίων: Το άνοιγμα διάτμησης l , το πλάτος b , ύψος h και στατικό ύψος d της διατομής. Τα ποσοστά ρ_1 , ρ_2 , και οι διάμετροι Φ_1 , Φ_2 των ράβδων στο θεωρούμενο σαν εφελκυσμένο και σαν θλιβόμενο πέλμα. Η τάση διαρροής f_y των διαμήκων οπλισμών και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_c . Η διάμετρος Φ_n , η απόσταση σκελών s και η τάση διαρροής των συνδετήρων, f_{yw} . Οι συνδετήρες είναι τετράγωνοι, όταν δίπλα στην τιμή του s υπάρχει αστερίσκος (διαφορετικά είναι δίσκοι). Η ανηγμένη αξονική δύναμη θλίψης v και ο αριθμός διαμήκων ράβδων n στην περίμετρο, που συγκρατούνται στη γωνία συνδετήρα ή σιγμοειδούς οπλισμού. Επιπλέον στοιχεία που δεν αναγράφονται στον Πίν.1 αφορούν λεπτομέρειες για τη διάταξη των συνδετήρων στη διατομή οι οποίες επηρεάζουν το ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων. Στον ίδιο Πίνακα αναγράφεται η πειραματική τιμή των $\mu_{e,u}$, $\mu_{e,c}$, $E_{n,u}$ και DR_u . Η $\mu_{e,u}$ συγκρίνεται με τις προβλέψεις των εξ.(8a), (9a), (9b) και (8b) για $v > 0$ ή (8c) για $v = 0$. Η $\mu_{e,u}$ συγκρίνεται με την τιμή της $\mu_{e,u,DA}$ κατά την εξ.(26), και η $E_{n,u}$ με το διπλάσιο της $E'_{n,u}$ κατά την εξ.(33). Η DR_u συγκρίνεται με αυτήν που δίνει η εξ. (30) όταν χρησιμοποιηθούν οι τιμές των $\mu_{e,u}$ και M_u/M_y κατά Park και Ang, εξ.(26), (27). Τέλος από τις πειραματικές τιμές των $\mu_{e,u}$, $E_{n,u}$ υπολογίζεται η μέση τιμή του $D_{DA,u}$ κατά την εξ.(34).

Απο τον Πίν.2, ο οποίος δίνει τη μέση τιμή και το συντελεστή μεταβλητότητας του λόγου της πειραματικής προς την προβλεπόμενη τιμή των παραπάνω δεικτών βλάβης, προκύπτει ότι οι μ_e , μ_c και DR υπερτιμούν τη διαδέσιμη πλαστιμότητα του μέλους για ανακυκλιζόμενη ένταση. Εξάιρεση αποτελεί ο δείκτης $\mu_{e,u}$ κατά την εξ.(9b), ο οποίος υπολογίζεται στο φθιτό κλάδο του διαγράμματος M-Φ και μάλιστα αρκετά μετά την κορυφή του. Ως εκ τούτου δεν έχει φυσική σχέση με την αστοχία του μέλους υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, η οποία συμβαίνει λόγω της ανακύκλισης και αρκετά πριν την κορυφή του ανωτέρω διαγράμματος. Επιπλέον, η απαιτούμενη τιμή του δείκτη αυτού δεν μπορεί να υπολογισθεί εύκολα, λόγω αριθμητικών προβλημάτων της ανάλυσης μετά την κορυφή του διαγράμματος M-Φ. Ο δείκτης E'_n κατά την εξ.(33), που εκφράζει μόνο την επιρροή της ανακύκλισης, πλησιάζει καλλίτερα την πραγματικότητα. Η επιτυχία του όμως αυτή μπορεί να οφείλεται εν μέρει στο ότι 18 από τα 28 δοκίμια του Πίν.1 περιελήφθησαν στην εκ 46 δοκιμίων βάση δεδομένων από την οποία προέκυψε η εξ.(33). Τέλος ο σύνθετος δείκτης D_{DA} , που λαμβάνει υπόψη και τη μέγιστη παραμόρφωση και την ανακύκλιση της έντασης, απεικονίζει τη βλάβη καλλίτερα από όλους τους άλλους. Αυτό φαίνεται τόσο από την προσέγγιση της μέσης τιμής του D_{DA} με αυτήν της στατιστικής ανάλυσης των 403 πειραμάτων από τους Park και Ang (1.008), όσο και από το ότι ο συντελεστής μεταβλητότητός του δεν υπερβαίνει σημαντικά αυτόν της ανάλυσης των Park και Ang. Είναι αξιοσημείωτο ότι για τα δοκίμια T1-T3 με διατομή T, και επομένως με αυξημένη πλαστιμότητα για θλίψη στην πλάκα, ο μέσος λόγος της πειραματικής προς την προβλεπόμενη διαδέσιμη τιμή υπερβαίνει σημαντικά για όλους τους δείκτες τη μέση τιμή του λόγου αυτού για το σύνολο των 28 δοκιμίων. Επί παραδείγματι, αν αγνοηθούν τα δοκίμια αυτά η μέση τιμή του παραπάνω λόγου για το D_{DA} μειώνεται σε 1.05.

Πιν. 1. Γεωμετρικά και Μηχανικά χαρακτηριστικά δοκιμών - Πειραματικές Τιμές Δεικτών Βλάβης στην Ιστορία.

Δοκι- μο.	l (mm)	b (mm)	h (mm)	d (mm)	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)	f_y (MPa)	Φ_1 (mm)	Φ_2 (mm)	f_o (MPa)	Φ_h (mm)	s (mm)	f_{yw} (MPa)	v	n	$\mu_{o.u}$	$\mu_{e.u}$	DR _u	E _{n.u}
R1	1588	229	406	356	1.227	0.639	455	19.05	15.875	35	6.35	89*	415	0	7	11.4	8.2	6.8	123
R2	"	"	"	"	"	"	"	"	"	29	"	"	"	0	7	10.5	8.9	7.8	98
R3	"	"	"	"	"	"	"	"	"	31.5	"	"	"	0	7	17.1	10.3	8.5	215
R4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	30	"	"	"	0	7	24.0	13.9	10.6	122
R5	978	"	"	"	"	1.277	450	"	19.05	31.5	"	"	"	0	8	12.1	14.2	11.0	160
R6	1588	"	"	"	"	"	"	"	"	30	"	"	"	0	8	9.7	8.9	7.4	206
T1	"	"	"	"	1.636	0.639	455	"	15.875	33	"	"	"	0	7	21.8	10.4	9.0	181
T2	"	"	"	"	"	"	"	"	"	32	"	"	"	0	7	31.2	14.6	11.4	81
T3	"	"	"	"	"	1.227	450	"	19.05	31	"	"	"	0	8	15.0	11.3	8.5	222
A4	1830	305	305	254	0.835	0.835	380	22.225	22.225	28	9.525	127	380	0.1025	4	9.0	7.8	8.7	257
A7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	76	"	0.205	4	4.2	5.4	7.3	180
A8	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	127	"	0.205	4	4.2	5.4	7.3	145
A11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	76	"	0.3075	4	2.4	3.6	5.1	60
A12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	127	"	0.3075	4	2.1	3.0	4.0	54
H7	2676	"	508	457	1.656	1.656	275	28.575	28.575	26	9.525	114	275	0	4	13.3	6.5	5.6	24
W33	1981	381	737	686	1.371	1.371	415	"	"	28	"	76	415	0	4	23.4	12.9	10.0	269
VBC3	1613	229	406	356	1.227	0.639	"	19.05	15.875	31	6.35	89*	"	0	7	23.4	8.1	8.2	84
S3	1054	203	305	257	1.38	0.958	335	"	"	34.5	6.35	62.5	295	0	4	11.1	13.0	10.4	179
S4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	6.35	"	"	0	8	12.9	16.8	13.1	381
S5	787	"	254	218	1.104	0.767	365	"	"	27.5	6.35	9.5	"	0	4	15.2	22.0	14.6	456
S6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	34.5	6.35	"	"	0	8	13.4	18.8	14.1	490
S7	1054	"	305	257	1.38	0.958	"	"	"	27.5	9.525	64	380	0	4	9.2	15.1	13.1	285
S8	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	6.35	62.5	295	0	8	10.2	15.6	12.2	260
S9	1524	254	356	307	2.244	1.718	415	25.4	22.225	34	9.525	77	375	0	4	11.8	15.3	14.1	290
S10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.525	"	"	0	8	20.0	16.1	14.4	294
S11	1219	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.525	"	"	0	4	12.7	14.2	11.4	210
S12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.525	"	"	0	8	17.0	13.9	11.3	215
P43	1981	381	737	686	1.371	1.371	415	28.575	28.575	34.5	12.7	89	415	0	4	21.9	14.4	11.0	227

Από τη σύγκριση του Πίν.2 και από τις παραπάνω διευκρινήσεις, προκύπτει ότι ο δείκτης βλάβης D_{PA} , κατά τις εξ.(34), (35), (26) των Park και Ang (1985), με λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή 1.008 και τυπική απόκλιση 0.535, είναι ο καταλληλότερος από όλους τους δείκτες που εξετάζονται εδώ, για την περιγραφή της βλάβης μελών οπλισμένου σκυροδέματος λόγω ανακυκλιζόμενης έντασης.

Πίν.2. Στατιστικά στοιχεία λόγου πειραματικής προς προβλεπόμενη τιμή δείκτη βλάβης

	Με.ω. κατά:				Με.ω.ΡΑ	DR _ω	2Ε' _ω	D _{PA}
	εξ.(8)	εξ.(8a)	εξ.(8b)	εξ.(9a),(9b)	εξ.(26)	εξ.(30)	εξ.(33)	εξ.(34)
Μέση τιμή	0.293	0.521	1.313	0.394	0.391	0.408	1.325	1.085
Συντ. Μεταβλ.	0.918	0.900	0.918	0.694	0.479	0.416	0.728	0.607

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Atalay, M.B. and Penzien, J. "The Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment, Shear, and Axial Force," Earthq. Engng Res. Center, Un. of California, Berkeley, 1975.
- Banon, H. "Prediction of Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames", Rep.R80-16, Dept. of Civil Engng, M.I.T., Cambridge, Mass., 1980.
- Bertero, V.V., Popov, E.P. and Wang, T.T. "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Flexural Members with Special Web Reinforcement," Earthq. Engng Res. Center, Un. of California, Berkeley, 1974.
- Darwin, D. and Nmai, C.K. "Energy Dissipation in RC Beams under Cyclic Load", J. Struct. Engng, ASCE, V. 112, 8, 1986.
- Hanson, N.W. and Connor, H.W. "Tests of Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Simulated Seismic Loading," R.&D. Bull.RD12, P.C.A., Portland, Or., 1972.
- Keintzel, E. "Criteria and Hypotheses for the Determination of Curvature Ductility Factors in R/C Structures: A Comparative Study". Proc. 8th Europ. Conf. on Earthq. Engng, Lisbon, V.8.1/ p. 71-78, 1986.
- Lybas, J.M. and Sozen, M.A. "Effect of Beam Strength and Stiffness on Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Coupled Walls", Research Report, Dept. of Civil Engng, Un. of Illinois at Urbana-Champaign, 1977.
- Ma, S.H., Bertero, V.V. and Popov, E.P. "Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams," Earthq. Engng Res. Center, Un. of California, Berkeley, 1976.
- Park, Y.J. and Ang, A.M.-S. "Mechanistic Seismic Damage Model of Reinforced Concrete", J. Struct. Engng, ASCE, V. 111, 4, 1985.
- Popov, E.P., Bertero, V.V. and Krawinkler, H. "Cyclic Behavior of Three R.C. Flexural Members with High Shear," Earthq. Engng Res. Center, Un. of California, Berkeley, 1972.
- Scribner, C.F. and Wight, J.K. "Delaying Shear Strength Decay in Reinforced Concrete Flexural Members Under Large Load Reversals," Dep. of Civil Engng, Un. of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1978.
- Tassios, T.P. "Justification Note No. 6 " Eurocode No. 8, 1988a.
- Tassios, T.P. "Justification Note No. 4 " Eurocode No. 8, 1988b.
- Viwathanatepa, S., Popov, E.P. and Bertero, V.V. "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Interior Beam-Column Subassemblages," Earthq. Engng Res. Center, Un. of California, Berkeley, 1979.