

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΛΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τη μηχανική συμπεριφορά: α) των συστατικών υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος και β) των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση του τύπου που προκαλεί ο σεισμός. Με βάση τη συμπεριφορά αυτή επιλέγεται ο τρόπος χρησιμοποίησης του χάλυβα και του σκυροδέματος στα δομικά στοιχεία, δηλαδή το σχήμα και οι εξωτερικές διαστάσεις των μελών και το σχήμα και η ποσότητα των οπλισμών μέσα σ' αυτά, ώστε να έχουμε την επιθυμητή σεισμική συμπεριφορά των μελών και του συνόλου του έργου.

Το Κεφάλαιο 2 είναι αυτό που δίνει το υπόβαθρο των κανόνων των σύγχρονων κανονισμών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό έργων οπλισμένου σκυροδέματος. Από την άποψη αυτή συνδέεται άμεσα με το Κεφάλαιο 4, που παρουσιάζει σε συντομία τους κανόνες αυτούς σύμφωνα με το σημερινό Ελληνικό και Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο.

2.1 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ

Σκοπός της ενότητας 2.1 είναι να παρουσιάσει λεπτομερώς και ποσοτικά εκείνες τις πλευρές της μηχανικής συμπεριφοράς και εκείνες τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, του σκυροδέματος και της συνεργασίας τους μέσω της συνάφειας, που είναι σημαντικές για τη συμπεριφορά και την ακεραιότητα των μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση.

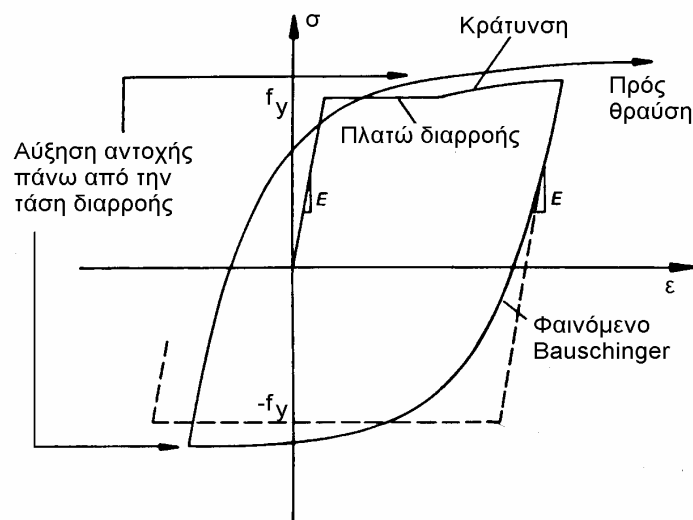
2.1.1 Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

2.1.1.1 Συμπεριφορά και αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

Σύμφωνα με την κρατούσα φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού, τα μέλη ενός δομήματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, και μαζί τους και οι ράβδοι οπλισμού, κατά κανόνα σχεδιάζονται να εξαντλήσουν το όριο ελαστικότητάς τους και να μπουν στην περιοχή της ανελαστικής συμπεριφοράς για σεισμική δράση ίση με το σεισμό σχεδιασμού διαιρεμένο δια q . Έτσι για το σεισμό σχεδιασμού ο χάλυβας οπλισμού λειτουργεί πέραν από τη διαρροή του σε τάση f_y . Γι' αυτό μας ενδιαφέρει κατ' εξοχήν η μεταδιαρροϊκή συμπεριφορά του.

Ως εκ της γεωμετρίας τους, οι ράβδοι του οπλισμού καταπονούνται κατά κανόνα σε μονοαξονικό εφελκυσμό ή θλίψη. Καθόσον δε η σεισμική δράση προκαλεί στα μέλη ανακυκλιζόμενη ένταση, μας ενδιαφέρει η ανελαστική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σε ανακυκλιζόμενες μονοαξονικές τάσεις σ και παραμορφώσεις ϵ .

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τυπικής συμπεριφοράς ενός χάλυβα οπλισμού σε ανακυκλιζόμενη ένταση φαίνονται στο Σχήμα 2.1: Τη διαρροή σε τάση f_y ακολουθεί το πλατώ διαρροής, το οποίο είναι σχετικά σύντομο για τους συνήθεις χάλυβες οπλισμού της Ελληνικής και της Ευρωπαϊκής αγοράς. Ακολουθεί η περιοχή της κράτνωσης, η οποία καταλήγει στη μέγιστη τάση (εφελκυστική αντοχή) f_t , σε αντίστοιχη παραμόρφωση (ανηγμένη μήκυνση) ϵ_{su} . Η ϵ_{su} ονομάζεται ομοιόμορφη μήκυνση θραύσης και λαμβάνεται ως η οριακή παραμόρφωση του χάλυβα υπό μονοτονική φόρτιση.

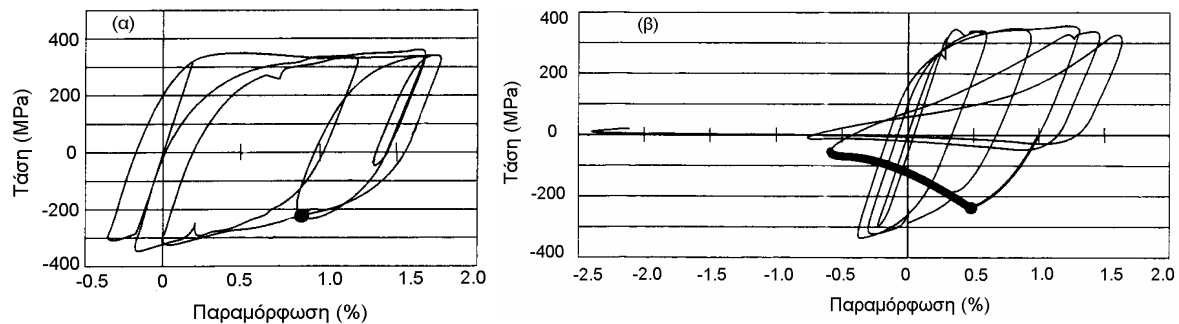


Σχ. 2.1 Χαρακτηριστικά συμπεριφοράς χάλυβα οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

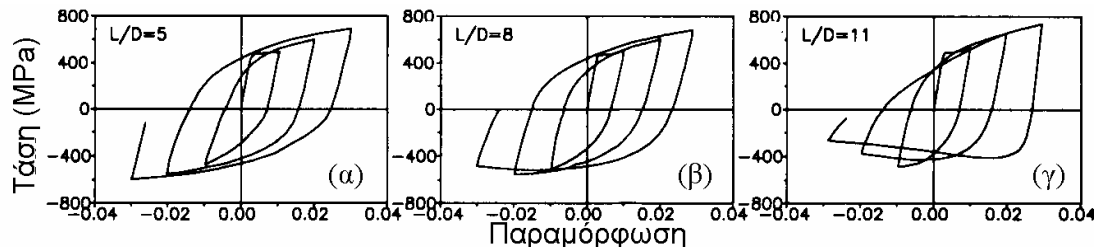
Η αποφόρτιση από το πλατώ διαρροής ή την περιοχή κράτνωσης δεν είναι γραμμική-ελαστική μέχρι την τάση διαρροής $-f_y$ σε θλίψη, αλλά καμπυλώνεται βαθμιαία για αρνητικές τάσεις. Αυτή η απόκλιση από την ευθυγραμμία κατά την αποφόρτιση, που φαίνεται σαν πρώιμη διαρροή, ονομάζεται φαινόμενο Bauschinger. Έτσι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στην αποφόρτιση μειώνεται από την ελαστική τιμή $E_s=200\text{GPa}$ προς το μηδέν σταδιακά, και όχι απότομα όπως κατά την πρώτη διαρροή του χάλυβα σε εφελκυσμό ή θλίψη.

Όταν έχει προηγηθεί διαρροή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση της θλίψης δεν εμφανίζεται πλατώ διαρροής, αλλά η κράτνωση της καμπύλης σ - ϵ οδηγεί σύντομα σε τάση θλίψης που ξεπερνά την τάση διαρροής σε θλίψη, $-f_y$. Νέα αναστροφή της φοράς μεταβολής της τάσης και της παραμόρφωσης (αποφόρτιση και επαναφόρτιση προς την αρχική κατεύθυνση,

δηλαδή προς τον εφελκυσμό) οδηγεί σε κλάδο σ - ϵ παρόμοιο με αυτόν της προηγούμενης αποφόρτισης από τον εφελκυσμό προς τη θλίψη. Ο κλάδος αυτός ξεπερνά πάλι την τάση διαρροής f_y σε πρώτη (παρθένα) φόρτιση, αλλά κατευθύνεται προς το σημείο σ - ϵ απ' όπου ξεκίνησε προηγουμένως η αποφόρτιση από τον εφελκυσμό προς τη θλίψη. Φόρτιση πέραν απ' αυτό το σημείο ακολουθεί περίπου την καμπύλη σ - ϵ σε μονοτονική φόρτιση, μέχρι τη θραύση ή μέχρι ενδεχόμενη νέα αποφόρτιση προς τη θλίψη.



Σχήμα 2.2 Βρόχοι σ - ϵ ράβδου που λυγίζει (•) σε μέλος οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση: (α) διάγραμμα σ -πραγματικής ϵ στον άξονα ράβδου (β) διάγραμμα σ -φαινόμενης ϵ στην αρχική διεύθυνση του άξονα της ράβδου (από Suda et al, 1996)



Σχήμα 2.3 Βρόχοι υστέρησης σ - (φαινόμενης) ϵ ράβδου υπό συμμετρικούς κύκλους επιβεβλημένης παραμόρφωσης: (α) χωρίς λυγισμό, (β), (γ) με λυγισμό της ράβδου (από Monti and Nuti, 1992)

Αν δεν συμβεί λυγισμός της ράβδου, η συμπεριφορά σ - ϵ σε θλίψη είναι ίδια με την αντίστοιχη σε εφελκυσμό. Στη σπάνια περίπτωση που η ράβδος θα διαρρεύσει για πρώτη φορά σε θλίψη αντί σε εφελκυσμό (π.χ. Σχήμα 2.2(α)) το πλατώ διαρροής θα εμφανισθεί μόνο στη θλίψη. Μετά το πλατώ διαρροής και ανεξάρτητα του αν αυτό θα συμβεί σε εφελκυσμό ή σε θλίψη, οι βρόχοι υστέρησης (όπως ονομάζεται το σχήμα που ορίζεται από τους δύο κλάδους αποφόρτισης και επαναφόρτισης στην αντίθετη κατεύθυνση, δηλ. από εφελκυσμό προς θλίψη και αντίστροφα) είναι συμμετρικοί, εάν η αποφόρτιση γίνεται σε ίσες και αντίθετες τιμές της παραμόρφωσης ϵ (Σχήμα 2.3(α)). Εάν όμως το ελεύθερο μήκος της

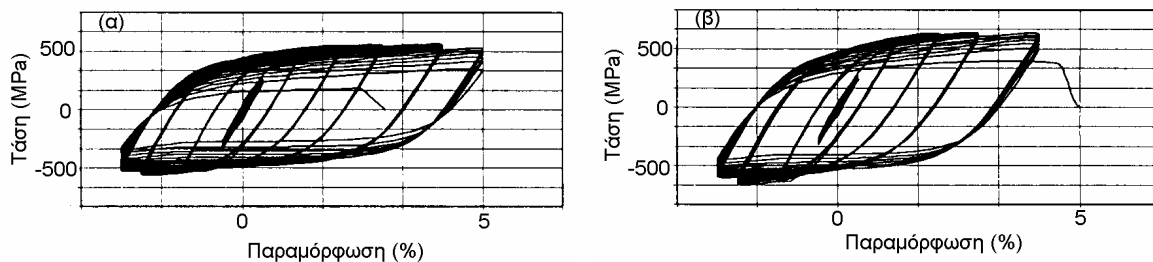
ράβδου είναι σημαντικό (όπως στις περιπτώσεις των Σχημάτων 2.3(β) και (γ), όπου το ελεύθερο μήκος L της ράβδου είναι οκταπλάσιο ή εντεκαπλάσιο της διαμέτρου) τότε η ράβδος μπορεί να λυγίσει. Δεδομένου ότι σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος η διαρροή των ράβδων σε εφελκυσμό προηγείται της τυχόν διαρροής τους σε θλίψη, ο ενδεχόμενος λυγισμός συμβαίνει κατά κανόνα στον κλάδο σ - ϵ όπου εμφανίζεται το φαινόμενο Bauschinger, ή στον κλάδο της κράτυνσης σε θλίψη που ακολουθεί. Μόλις συμβεί ο λυγισμός η ράβδος κάμπτεται, γεγονός που επιτρέπει τα δύο άκρα του ελεύθερου μήκους της L να πλησιάσουν χάριν στην εγκάρσια μετακίνηση (βέλος) της ράβδου, χωρίς στην πραγματικότητα ο άξονάς της να βραχύνεται. Επί παραδείγματι, οι πειραματικές μετρήσεις από ράβδο μέλους οπλισμένου σκυροδέματος στο Σχήμα 2.3(α) δείχνουν ότι αμέσως μετά το λυγισμό η ράβδος αποφορτίζεται (η θλιπτική της τάση σ μειώνεται), ενώ η μέση παραμόρφωση του άξονά της αλγεβρικά αυξάνεται σύμφωνα με το νόμο σ - ϵ του υλικού. Όμως, επειδή τα άκρα της ράβδου πλησιάζουν λόγω της κάμψης της, η φαινόμενη παραμόρφωσή της, που ορίζεται ως η σχετική μετακίνηση των άκρων της δια του αρχικού μήκους της L και είναι αυτή που μας ενδιαφέρει για τη μακροσκοπική συμπεριφορά του μέλους, μειώνεται αλγεβρικά. Έτσι η φαινόμενη σχέση σ - ϵ της ράβδου που λυγίζει έχει τη μορφή (των πειραματικών μετρήσεων) των Σχημάτων 2.3(β), (γ) και 2.2(β).

Επισημαίνεται ότι σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση ο λυγισμός των ράβδων σε θλίψη και όχι η εξάντληση της μήκυνσης θραύσης τους σε εφελκυσμό, ϵ_{su} , είναι κατά κανόνα αυτό που θα σημάνει την εξάντληση της ικανότητας παραμόρφωσης του δομικού μέλους. Αυτό συμβαίνει επειδή:

- ο προς τα έξω λυγισμός της ράβδου αποτινάσσει το επιφανειακό σκυρόδεμα και μειώνει την ενεργό διατομή σκυροδέματος,
- το γειτονικό σκυρόδεμα μπορεί να μη μπορέσει να αναλάβει τη δύναμη θλίψης που απελευθερώνεται από τη ράβδο που λυγίζει, και
- όταν οι ράβδοι λυγίζουν, παρασύροντας εν μέρει προς τα έξω και τους συνδετήρες που τις συγκρατούν, το εσωτερικό σκυρόδεμα χάνει την πλευρική του στήριξη και τις ευεργετικές συνέπειες που αυτή προκαλεί (περίσφιγξη, βλ. υποενότητα 2.1.2.2).

Όμως, ακόμα και αν δεν αστοχήσει το σκυρόδεμα σε θλίψη αμέσως μετά το λυγισμό των ράβδων, είναι πολύ πιθανό να αστοχήσει σε (καμπτικό) εφελκυσμό η ράβδος που λύγισε. Αυτό συμβαίνει διότι ο λυγισμός της ράβδου εισάγει σ' αυτήν, πέραν της μέσης παραμόρφωσης στον άξονά της (αυτής δηλαδή του οριζοντίου άξονα του Σχήματος 2.2(α)), πρόσθετες παραμορφώσεις λόγω κάμψης, θετικές (μηκύνσεις) προς τη μία πλευρά της ράβδου, αρνητικές (βραχύνσεις) προς την άλλη. Οι πρόσθετες αυτές παραμορφώσεις μπορεί

να φθάσουν σε σημαντικό μέγεθος, ιδιαίτερα αν το μήκος L στο οποίο εκδηλώνεται ο λυγισμός της ράβδου είναι μικρό σε σχέση με τη διάμετρό της. Οι πρόσθετες μηκύνσεις επαλληλίζονται στη μέση παραμόρφωση στον άξονα της ράβδου (αυτήν του οριζοντίου άξονα του Σχήματος 2.2(α)) και μπορεί να εξαντλήσουν τη μήκυνση θραύσης, ϵ_{su} , στις ακραίες εφελκόμενες ίνες της ράβδου. Το ενδεχόμενο αυτό είναι πιθανότερο στους χάλυβες τύπου Tempcore, που κυριαρχούν σήμερα και για το προβλεπτό μέλλον στην Ελληνική και Ευρωπαϊκή αγορά, καθότι στους χάλυβες αυτούς ο εξωτερικός φλοιός της ράβδου, όπου και αναπτύσσεται η πρόσθετη καμπτική μήκυνση, έχει υψηλότερη αντοχή αλλά μικρότερη ολκιμότητα. Βεβαίως η θραύση των ακραίων ινών της ράβδου θα επεκταθεί στο σύνολό της όταν αλλάξει κατά την ανακύκλιση το πρόσημο της έντασης του δομικού μέλους και τεθεί το σύνολο της διατομής της λυγισμένης ράβδου σε εφελκυσμό. Έτσι, ράβδοι που έχουν λυγίσει (εμφανίζονται να) θραύονται στον επόμενο ημικόκλο της φόρτισης του μέλους.



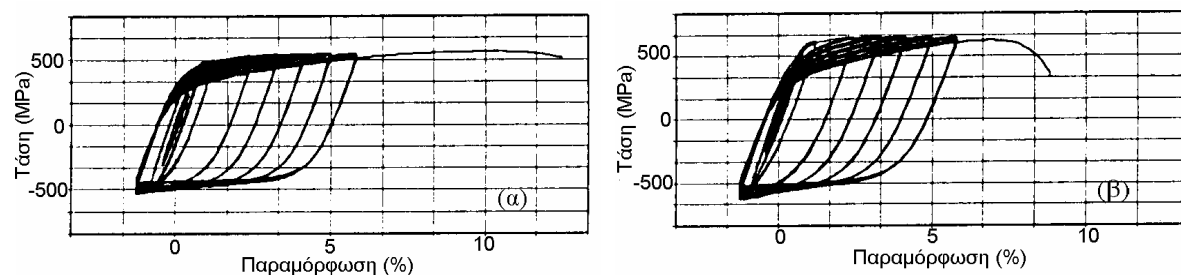
Σχήμα 2.4 Βρόχοι υστέρησης ράβδου οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, του τύπου που εμφανίζεται σε υποστυλώματα: (α) χάλυβας S400, (β) χάλυβας S500 (από Carvalho and Coelho, 1997)

Σ' ένα μέλος οπλισμένου σκυροδέματος ο λόγω κάμψης εφελκυσμός αναλαμβάνεται αποκλειστικά από τον εφελκόμενο χάλυβα, και η θλίψη κυρίως από το σκυρόδεμα, με απλή συμμετοχή του θλιβόμενου οπλισμού. Ως αποτέλεσμα, συμμετρικοί κύκλοι έντασης (π.χ. ροπής M) ή παραμόρφωσης (π.χ. καμπυλότητας ή γωνίας στροφής) σ' ένα μέλος δεν προκαλούν στο χάλυβα οπλισμού συμμετρικούς κύκλους σ-ε αλλά ασύμμετρους, στους οποίους οι εφελκυστικές παραμορφώσεις (μηκύνσεις) είναι μεγαλύτερες από τις θλιπτικές (βραχύνσεις). Οι βρόχοι υστέρησης των Σχημάτων 2.4 έως 2.6 είναι χαρακτηριστικοί σεισμικής απόκρισης των οπλισμών:

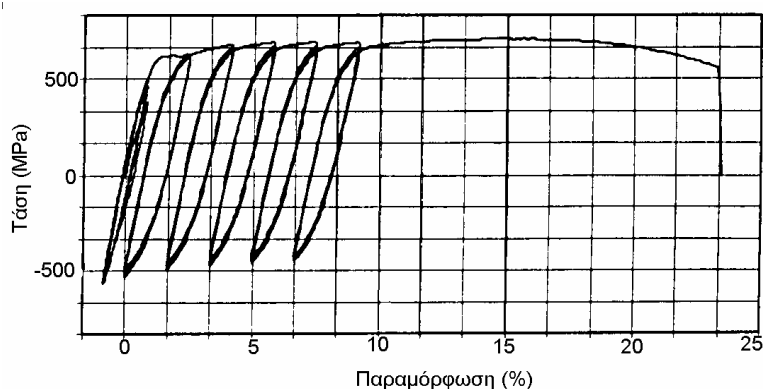
- στο Σχήμα 2.4 ενός συμμετρικά οπλισμένου υποστυλώματος (όπου υπάρχει δύναμη θλίψης),
- στο Σχήμα 2.5 των κάτω οπλισμών δοκού, που διαρρέουν σε θλίψη προκειμένου να

κλείσει η ρωγμή του κάτω πέλματος, και

- στο Σχήμα 2.6 των άνω οπλισμών δοκού, που κατά κανόνα είναι περισσότεροι από τους κάτω και δεν διαρρέουν σε θλίψη.



Σχήμα 2.5 Βρόχοι υστέρησης ράβδου οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, του τύπου που εμφανίζεται στο κάτω πέλμα δοκού: (α) χάλυβας S400, (β) χάλυβας S500 (από Carvalho and Coelho, 1997)



Σχήμα 2.6 Βρόχοι υστέρησης ράβδου οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη ένταση του τύπου που εμφανίζεται στο άνω πέλμα δοκού: χάλυβας S500 (Carvalho and Coelho, 1997)

Παρ' όλο που οι βρόχοι του τύπου του Σχήματος 2.4 είναι ασύμμετροι, με μηκύνσεις (πολύ) μεγαλύτερες από τις βραχύνσεις, δεν αποκλείεται σ' αυτούς λυγισμός ράβδων υπό συνθήκες μήκυνσης αλλά θλιπτικής τάσης. Αυτό συμβαίνει στους τελευταίους κύκλους των Σχημάτων 2.4(α) και (β), παρόλο που το ελεύθερο μήκος της ράβδου είναι εξαπλάσιο της διαμέτρου της, οδηγώντας αμέσως μετά στη θραύση της ράβδου σε εφελκυσμό. Αντίθετα, το περιορισμένο μέγεθος της μέγιστης βράχυνσης στα Σχήματα 2.5(α) και (β) φαίνεται να αποτρέπει – για την ίδια γεωμετρία ράβδου και ποιότητα χάλυβα όπως στα Σχήματα 2.4(α) και (β) – το λυγισμό και να επιτρέπει στη ράβδο να αστοχήσει τελικά σε εφελκυσμό, πλησιάζοντας την ομοιόμορφη μήκυνση θραύσης της, ϵ_{su} (παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην κορυφή του διαγράμματος για μονοτονική φόρτιση). Η τιμή της ϵ_{su} ισούται με 11,3% για το συγκεκριμένο χάλυβα Tempcore S400 και με 8,5% για τον S500. Ακόμα καλύτερη

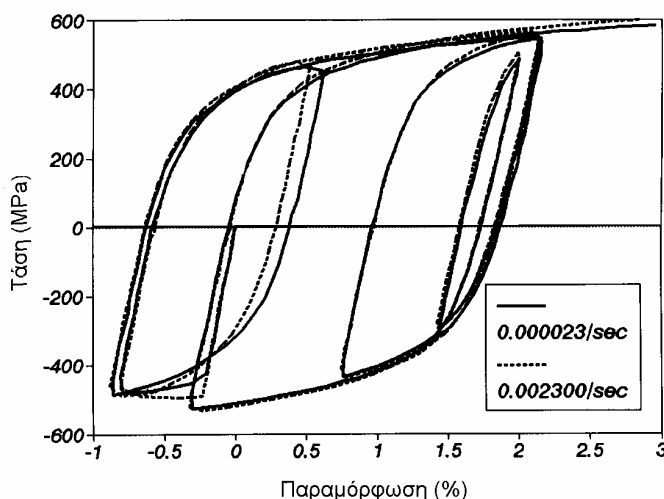
είναι η συμπεριφορά του χάλυβα S500 στο Σχήμα 2.6, όπου η τιμή της μονοτονικής μήκυνσης θραύσης, $\varepsilon_{su}=8,5\%$ όχι μόνον εξαντλείται, αλλά και ξεπερνιέται.

Από τη σύγκριση των (α) και (β) στα Σχήματα 2.4 και 2.5 είναι σαφής η μεγαλύτερη ολκιμότητα του χάλυβα S400, ως προς τον S500.

2.1.1.2 Επιρροές του χρόνου στη μηχανική συμπεριφορά

Οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το χάλυβα, δηλ. οι τάσεις διαρροής και θραύσης, f_y και f_u , και η ομοιόμορφη μήκυνση θραύσης, ε_{su} , μετρώνται εργαστηριακά υπό μικρές ταχύτητες παραμόρφωσης, πολύ χαμηλότερες αυτών που αναπτύσσονται κατά το σεισμό. Για χάλυβα οπλισμού του τύπου που χρησιμοποιείται ως οπλισμός αντισεισμικών στοιχείων (νευροχάλυβας S400 ή S500 κλπ.) κατά καλή προσέγγιση οι παράμετροι του διαγράμματος σ - ε σε μονοτονική ένταση αυξάνονται με την ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\varepsilon}$, σε σχέση με τις τιμές τους για οιονεί στατική ταχύτητα παραμόρφωσης (CEB, 1988): $\dot{\varepsilon}_0=5 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$, κατά $c \ln(\dot{\varepsilon} / 5 \times 10^{-5})$, όπου $c=6\text{MPa}$ για την τάση διαρροής, f_y , $c=7\text{MPa}$ για την εφελκυστική αντοχή, f_t και $c=0,3\%$ για την ομοιόμορφη μήκυνση θραύσης, ε_{su} .

Για τους ψαθυρούς χάλυβες ψυχρής κατεργασίας, που δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε αντισεισμικές κατασκευές, η επιρροή της ταχύτητας παραμόρφωσης στην αντοχή είναι μικρότερη απ' ό,τι στους όλκιμους χάλυβες. Όμως η επιρροή στην (ούτως ή άλλως μικρή) ολκιμότητά τους είναι μεγαλύτερη.



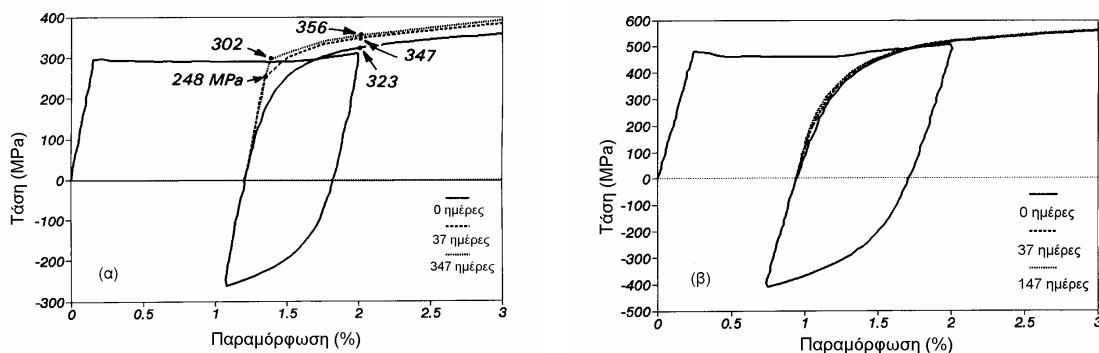
Σχήμα 2.7 Επιρροή ταχύτητας παραμόρφωσης στους βρόχους υστέρησης ράβδου οπλισμού (από Restrepo-Posada κ.α., 1994).

Τα ανωτέρω αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση. Όμως, όπως δείχνει το Σχήμα 2.7, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση φαίνεται να αυξάνεται με την ταχύτητα παραμόρφωσης μόνον η

τάση της πρώτης διαρροής, ενώ οι μέγιστες τάσεις στους κατοπινούς βρόχους υστέρησης δεν φαίνεται να επηρεάζονται.

Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα παραμόρφωσης μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη σεισμική απόκριση: είναι μέγιστη όταν η παραμόρφωση ισούται με μηδέν (οπότε η απόκριση είναι σχεδόν ελαστική) και ελάχιστη (σχεδόν μηδενική) κατά τη μέγιστη απόκριση. Η αύξηση της αντοχής ως προς τη στατική τιμή είναι αυτή που αντιστοιχεί όχι στη μέση ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τον ημικόκλο της απόκρισης, αλλά σε μία αρκετά μικρότερη (αλλά μη μηδενική) τιμή, ίση με το 15%-30% περίπου της μέγιστης ταχύτητας παραμόρφωσης κατά την απόκριση (σε κάποια στιγμή που η παραμόρφωση είναι περίπου μηδενική), ή με το 30% περίπου της μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης.

Είναι ενδιαφέρον ότι χάλυβες χωρίς Βανάδιο (V), όπως είναι όλοι οι χάλυβες που παράγονται ή χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα σήμερα ή χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, εμφανίζουν αύξηση της τάσης διαρροής και μείωση της ολκιμότητάς τους με το χρόνο μετά από ενδεχόμενη ανελαστική καταπόνησή τους. Η αύξηση της τάσης διαρροής με το χρόνο μετά την αρχική καταπόνηση φαίνεται για ένα τέτοιο χάλυβα στο Σχήμα 2.8(α) και συγκρίνεται με την απουσία αυτού του φαινομένου για ένα χάλυβα με Βανάδιο στο Σχήμα 2.8(β) (Restrepo-Posada, κ.α., 1994). Η πρακτική επίπτωση του φαινομένου αυτού είναι ότι, αν σε μία κατασκευή με χάλυβα χωρίς Βανάδιο οι οπλισμοί διαρρεύσουν σε μία διατομή λόγω σεισμού, σε μελλοντικό σεισμό θα εμφανίσουν κάπως υψηλότερη τάση διαρροής αλλά και λίγο μικρότερη ολκιμότητα. Αν το μέλος δεν έχει επισκευασθεί μέχρι τότε, στο μελλοντικό σεισμό ενδέχεται η νέα διαρροή να συμβεί όχι στη διατομή όπου είχε συμβεί παλιά, αλλά σε γειτονική, όπου δεν είχε συμβεί ρηγμάτωση και ο οπλισμοί δεν είχαν διαρρεύσει (και επομένως δεν αυξήθηκε η τάση διαρροής τους).



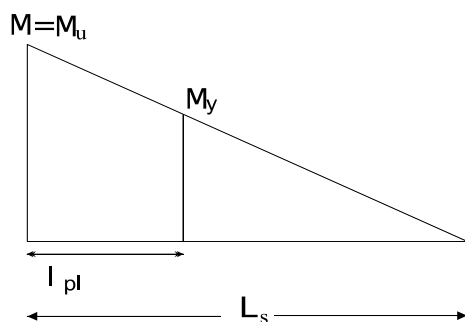
Σχήμα 2.8 Αύξηση τάσης διαρροής χάλυβα μετά την παρέλευση κάποιου διαστήματος από την αρχική ανελαστική καταπόνηση: (α) χάλυβας χωρίς Βανάδιο, (β) χάλυβας με Βανάδιο (από Restrepo-Posada, κ.α., 1994)

2.1.1.3. Απαιτήσεις για το χάλυβα οπλισμού σε αντισεισμικά έργα

Η σημασία του μεγέθους της ομοιόμορφης μήκυνσης θραύσης, ε_{su} , για την παραμορφωσιμότητα και την αστοχία του χάλυβα οπλισμού, είτε άμεσα σε εφελκυσμό είτε λόγω λυγισμού, επισημάνθηκε ήδη στην υποενότητα 2.1.1.1.

Σημαντική ιδιότητα για τη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη ένταση είναι και η κράτυνση, καθότι αυτή καθορίζει το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στην ανελαστική περιοχή και μέσω αυτού το λυγισμό των ράβδων μετά τη διαρροή τους. Η κράτυνση του χάλυβα είναι όμως σημαντική και για έναν επιπλέον λόγο: επειδή επηρεάζει τη δυνατότητα αύξησης της ροπής στο άκρο του μέλους πέραν από τη ροπή διαρροής, M_y , και μέσω αυτής το μέγεθος της “πλαστικής άρθρωσης” που θα σχηματισθεί εκεί. Πράγματι, αν κάνουμε την απλοποιητική υπόθεση ότι μετά τη διαρροή ο μοχλοβραχίοντας των εσωτερικών δυνάμεων της διατομής δεν μεταβάλλεται, τότε η ροπή M στην ακραία διατομή είναι ανάλογη της τάσης f του χάλυβα εκεί και ισούται με $M=(f/f_y)M_y$. Αν, επιπλέον, υποθέσουμε ότι η αστοχία της ακραίας διατομής οφείλεται στη θραύση του χάλυβα σε εφελκυσμό και όχι σ’ αυτήν του σκυροδέματος σε θλίψη (υπόθεση που επαληθεύεται αν το ποσοστό του εφελκυσμένου χάλυβα είναι πολύ χαμηλό ή το σκυρόδεμα είναι εξαιρετικά καλά περισιφιγμένο), τότε ο χάλυβας μπορεί να φθάσει εκεί την εφελκυστική αντοχή του, f_t . Αν το διάγραμμα ροπών κάμψης μειώνεται περίπου γραμμικά με την απόσταση από την ακραία διατομή, τότε η ακραία περιοχή του μέλους όπου αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις προκύπτει από τα όμοια τρίγωνα ότι έχει μήκος:

$$l_{pl} = L_s \left(1 - \frac{M_y}{M_u} \right) = L_s \left(1 - \frac{f_y}{f_t} \right) \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.9 Καθορισμός μήκους πλαστικοποίησης άκρου από τη ροπή αστοχίας της ακραίας διατομής

Προκύπτει λοιπόν ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος f_t/f_y , τόσο μεγαλύτερο είναι και το μήκος πλαστικοποίησης του μέλους ως ποσοστό του μήκους διάτμησης L_s , αυξάνοντας έτσι και τη συνολική παραμορφωσιμότητα του μέλους μέχρι την αστοχία. Πράγματι, η τιμή της γωνίας στροφής χορδής του άκρου του μέλους (δηλαδή ο λόγος του βέλους του άκρου του

μήκους διάτμησης, δια του L_s , βλ. Σχ. 1.3) στην καμπτική του αστοχία, θ_u , ισούται στην περίπτωση του Σχήματος 2.9 με:

$$\theta_u = \phi_y \frac{L_s}{3} + \frac{I_{pl}}{3} \left[\phi_u \left(1 + \frac{f_y}{2f_t} \right) - \phi_y \left(\frac{1}{2} + \frac{f_t}{f_y} \right) \right] \quad (2.2)$$

Αν καθοριστικός της διαρροής και της αστοχίας είναι ο εφελκόμενος οπλισμός, οι αντίστοιχες καμπυλότητες της διατομής, ϕ_y και ϕ_u , ισούνται με:

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{(1 - \xi_y)d} = \frac{f_y}{E_s(1 - \xi_y)d} \quad (2.3)$$

$$\phi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1 - \xi_{su})d} \quad (2.4)$$

όπου ε_y και ε_{su} είναι η μήκυνση του χάλυβα στη διαρροή και στη μέγιστη τάση και ξ_y , ξ_{su} το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στο αντίστοιχο στάδιο ανηγμένο στο στατικό ύψος d . Οι τιμές των ξ_y , ξ_{su} εξαρτώνται από τα ποσοστά οπλισμού της διατομής και από το μέγεθος της αξονικής δύναμης (βλ. εξ.(2.26), (2.27), (2.29), (2.32) στην υποενότητα 2.2.2.1). Έτσι, για δεδομένη διατομή, όπλιση, αξονική δύναμη και τιμή της ε_{su} , η λόγω κάμψης παραμόρφωση αστοχίας του μέλους, θ_u , αυξάνεται με το μέγεθος του μήκους πλαστικοποίησης, I_{pl} , άρα και με το λόγο f_t/f_y .

Παρόλο που η ανωτέρω εικόνα είναι εξαιρετικά εξιδανικευμένη (θεωρεί μόνο καμπτικές παραμορφώσεις και υποθέτει ανεξάντλητη παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος), αρκεί για να συνειδητοποιήσει κανείς ότι τυχόν πολύ χαμηλή τιμή του λόγου f_t/f_y συνεπάγεται πολύ μικρό μήκος πλαστικοποίησης και χαμηλή ικανότητα παραμόρφωσης του δομικού μέλους. Για το λόγο αυτό οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εισάγουν όχι μόνο ένα κάτω όριο για τις επιτρεπτές τιμές της ε_{su} , αλλά και ένα κάτω όριο για την τιμή του λόγου f_t/f_y , ως μέσο εξασφάλισης κάποιας κράτυνσης και κάποιας ικανότητας παραμόρφωσης του μέλους.

Όπως τονίσθηκε ήδη στις Ενότητες 1.3 και 1.4 του Κεφαλαίου 1, ο σύγχρονος αντισεισμικός σχεδιασμός επιδιώκει να ελέγξει την ανελαστική σεισμική απόκριση. Συγκεκριμένα, μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού επιδιώκει να εξασφαλίσει ότι ανελαστικές παραμορφώσεις θα αναπτυχθούν μόνο στις πλάστιμες περιοχές και ότι οι ψαθυρές περιοχές και τρόποι αστοχίας θα διαθέτουν κάποια υπεραντοχή σε σχέση με τις γειτονικές τους πλάστιμες, που θα αποτρέψει την εξάντληση της αντοχής τους πριν αλλά και μετά τη διαρροή των γειτονικών τους πλάστιμων περιοχών. Πλάστιμες περιοχές και τρόποι αστοχίας είναι μόνον αυτές όπου η διαρροή και η αντοχή καθορίζονται από τον εφελκόμενο οπλισμό, ενώ ψαθυρές είναι κυρίως αυτές, όπου καθοριστικό της αντοχής είναι το σκυρόδεμα. Τυχόν

υπεραντοχή του χάλυβα οπλισμού σε σχέση με την ονομαστική τάση διαρροής του, f_{yk} , μπορεί να ανατρέψει την ιεράρχηση αντοχών μεταξύ πλαστιμών περιοχών και ψαθυρών που επετεύχθη κατά τη μελέτη μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού. Με άλλα λόγια, αν ο χάλυβας διαθέτει πολύ υψηλότερη αντοχή απ' ό,τι υποθέσαμε στη μελέτη, μπορεί η αντίστοιχη διατομή (ή θέση) να μη διαρρεύσει προτού αστοχήσει σε θλίψη το γειτονικό σκυρόδεμα, γεγονός που θα οδηγήσει τοπικά σε ψαθυρό τρόπο συμπεριφοράς και αστοχίας. Για το λόγο αυτό οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί θέτουν ένα ανώτατο όριο στην εφελκυστική αντοχή f_t και στην πραγματική τάση διαρροής του χάλυβα f_y , για δεδομένη ονομαστική τάση διαρροής του, f_{yk} .

Ο Ευρωκώδικας 8 (μέσω παραπομπής στον Ευρωκώδικα 2) θέτει για το χάλυβα κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος κατηγορίας πλαστιμότητας (DC) Υψηλής (H) την τιμή 1,35 ως ανώτατο όριο της άνω χαρακτηριστικής τιμής με πιθανότητα υπέρβασης 10% του λόγου f_t/f_y , δηλ. του $(f_t/f_y)_{k,0,9}$. Για τη μήκυνση θραύσης, ε_{su} , και το κάτω όριο του λόγου f_t/f_y , ο Ευρωκώδικας 8 (με παραπομπή πάλι στον Ευρωκώδικα 2) θέτει για τις κατηγορίες πλαστιμότητας L (Χαμηλή) και M (Μέση) τις απαιτήσεις για χάλυβα κατηγορίας B. Για την κατηγορία πλαστιμότητας Υψηλή (H) θέτει τις υψηλότερες απαιτήσεις του χάλυβα κατηγορίας C. Οι απαιτήσεις για χάλυβες κατηγορίας B ή C αφορούν τις κάτω χαρακτηριστικές τιμές με πιθανότητα υπέρβασης 90%, $\varepsilon_{suk0,10}$ και $(f_t/f_y)_{k,0,10}$, και είναι οι εξής:

Για χάλυβα τύπου B (που επιτρέπεται στις κατηγορίες πλαστιμότητας L και M):

$$\varepsilon_{suk,0,10} \geq 5\%,$$

$$(f_t/f_y)_{k,0,10} \geq 1,08$$

Για χάλυβα τύπου C (που απαιτείται στην κατηγορία πλαστιμότητας H):

$$\varepsilon_{suk,0,10} \geq 7.5\%$$

$$(f_t/f_y)_{k,0,10} \geq 1,15.$$

Οι χάλυβες τύπου *temprecore*, κυρίως της κατηγορίας S500 που κυριαρχούν σήμερα στην Ευρωπαϊκή και στην Ελληνική αγορά ικανοποιούν τις σημερινές απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8 για τις κατηγορίες πλαστιμότητας L και M. Όμως οι απαιτήσεις για την κατηγορία πλαστιμότητας H ικανοποιούνται μόνο από χάλυβες ειδικής ολκιμότητας, και πάλι οριακά. Οι λίγοι χάλυβες S400 που κυκλοφορούν ακόμη στον Ευρωπαϊκό χώρο υπερτερούν ως προς την ικανοποίηση των απαιτήσεων για την $\varepsilon_{suk,0,10}$ και την κατώτατη οριακή τιμή του $(f_t/f_y)_{k,0,10}$, παραβιάζουν όμως συχνά την ανώτατη οριακή τιμή $(f_t/f_y)_{k,0,90}$ (κυρίως επειδή χάλυβες που παράγονται ως S500 αλλά δεν ικανοποιούν τα κριτήρια για ονομαστική τάση

διαρροής $f_{yk}=500\text{MPa}$, κατηγοριοποιούνται ως S400). Για τους λόγους αυτούς οι σχετικές προδιαγραφές και η Ευρωπαϊκή παραγωγή χάλυβα χαρακτηρίζονται σήμερα από ρευστότητα. Φαίνεται πιθανή η μελλοντική παραγωγή χάλυβα tempcore με ονομαστική τάση διαρροής 450MPa, που θα ικανοποιεί άνετα όλες τις απαιτήσεις των Ευρωπαϊκών προδιαγραφών (EN).

Υπενθυμίζεται ότι στο χάλυβα tempcore, που λόγω χαμηλού κόστους μονοπωλεί την Ευρωπαϊκή αγορά, η υψηλή αντοχή επιτυγχάνεται θερμικά και συγκεκριμένα με απότομη ψύξη της επιφάνειας της ράβδου και αξιοποίηση της θερμότητας του εσωτερικού της για τη θερμική κατεργασία. Έτσι δεν είναι απαραίτητη η προσθήκη άνθρακα σε υψηλή περιεκτικότητα ή άλλων χημικών στοιχείων για λόγους αντοχής, με αποτέλεσμα ο χάλυβας να είναι και συγκολλησίμος, δηλαδή τύπου s (π.χ. S500s, αντί απλώς S500). Επιπλέον η ομοιόμορφη παραμόρφωση θραύσης του, ϵ_{su} , είναι ικανοποιητική, έτσι ώστε ράβδοι από χάλυβα tempcore να μπορούν να καμφθούν χωρίς τοπική θραύση. Το βασικό τους μειονέκτημα, κυρίως για αντισεισμικά έργα, είναι η σχετικά περιορισμένη κράτυνση, δηλαδή η χαμηλή τιμή του λόγου f_t/f_y .

2.1.2 ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1.2.1 Το σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη

Σε αντίθεση με τις ράβδους οπλισμού, όπου η ουσιαστικά μονοδιάστατη γεωμετρία τους επιβάλλει πρακτικά μονοαξονική ένταση, η γεωμετρία των μελών οπλισμένου σκυροδέματος επιτρέπει την ανάπτυξη διαξονικής ή τριαξονικής έντασης. Επειδή όμως το σκυρόδεμα ουσιαστικά στερείται εφελκυστικής αντοχής, οι τυχόν εφελκυστικές τάσεις της τριαξονικής του έντασης είναι αμελητέες και πρακτική σημασία έχουν μόνον οι θλιπτικές.

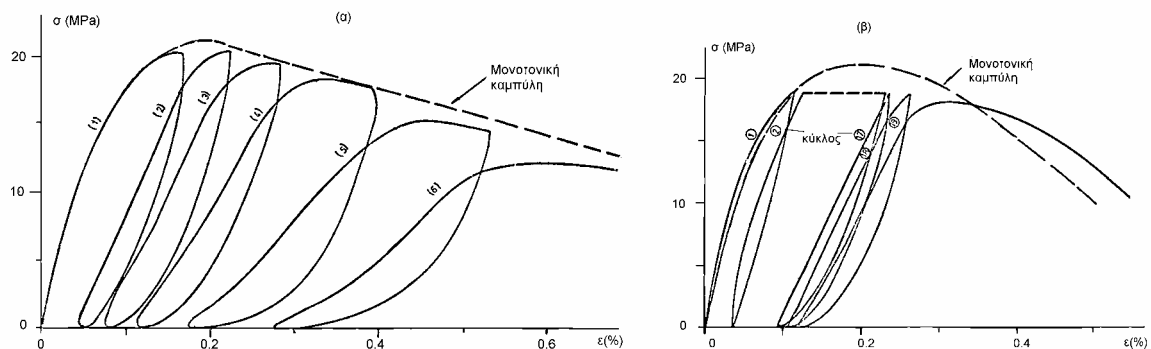
Η παρουσία μικρών εφελκυστικών τάσεων εγκάρσια στη διεύθυνση μίας θλιπτικής τάσης μειώνει ελαφρά την αντοχή και τη δυσκαμψία του σκυροδέματος στη διεύθυνση της θλιπτικής τάσης. Επίσης, αν κάθετα στη διεύθυνση της θλιπτικής τάσης δρα μία μόνο σημαντική σε μέγεθος θλιπτική τάση ενώ η τάση στην τρίτη διεύθυνση είναι σχετικά μικρή (εφελκυστική ή θλιπτική), τότε η αντοχή και η δυσκαμψία στη διεύθυνση της μεγάλης θλίψης βελτιώνεται ελάχιστα.

Η μόνη περίπτωση που η πολυαξονικότητα της έντασης επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά στη διεύθυνση της κυρίαρχης θλίψης, είναι όταν οι τάσεις και στις δύο άλλες εγκάρσιες διευθύνσεις είναι θλιπτικές και σημαντικές σε μέγεθος. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται αναλυτικά στην υποενότητα 2.1.2.2 κατωτέρω. Σ' όλες τις άλλες περιπτώσεις η πολυαξονικότητα της έντασης αγνοείται και εξετάζεται μόνον η συμπεριφορά στη διεύθυνση

της κυρίαρχης θλίψης με θεώρηση μονοαξονικής έντασης.

Η συμπεριφορά σε ανακυκλιζόμενη μονοαξονική θλίψη φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Με τους βρόχους υστέρησης που δημιουργούνται από την αποφόρτιση και την επαναφόρτιση απορροφάται από το υλικό κάποια ενέργεια ίση με το εμβαδόν που περικλείεται από το βρόχο. Η ενέργεια αυτή είναι όμως μικρή, σε σύγκριση με εκείνη που απορροφάται κατά την ανακύκλιση της έντασης του χάλυβα. Η επαναφόρτιση κατευθύνεται προς τη μονοτονική καμπύλη σ - ϵ και όταν τη φθάσει την ακολουθεί. Έτσι η μονοτονική καμπύλη αποτελεί περιβάλλουσα και οδηγό για τους βρόχους σ - ϵ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Συνεχείς κύκλοι αποφόρτισης-επαναφόρτισης μέχρι το ίδιο (υψηλό) ποσοστό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής f_c (στο Σχήμα 2.10(β) μέχρι $0,9f_c$) οδηγούν σε συσσώρευση παραμενουσών παραμορφώσεων και σταδιακή προσέγγιση του φθίνοντος κλάδου της μονοτονικής καμπύλης. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος. Στο Σχήμα 2.10(β) αυτό συμβαίνει μετά από 19 κύκλους μέχρι μέγιστη τάση $0,9f_c$, αλλά αν η ανακύκλιση φθάνει μέχρι $0,85f_c$, για την προσέγγιση της μονοτονικής καμπύλης απαιτούνται σχεδόν 200 κύκλοι (Karsan, 1968). Πρόκειται για φαινόμενο ολιγοκυκλικής κόπωσης του σκυροδέματος.

Συμπερασματικά, υπό σεισμικές δράσεις κατά καλή προσέγγιση μόνον η αντοχή και η καμπύλη σ - ϵ του σκυροδέματος σε μονοτονική φόρτιση μας ενδιαφέρουν ως σημαντικές.



Σχήμα 2.10. Συμπεριφορά σ - ϵ σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη μονοαξονική θλίψη (από Karsan, 1968)

2.1.2.2 Η επιρροή της περίσφιγξης στη θλιπτική συμπεριφορά

Στα αντισεισμικά δομήματα από οπλισμένο σκυρόδεμα μας ενδιαφέρει η αντοχή και η συμπεριφορά σ - ϵ του σκυροδέματος υπό τριαξονική θλίψη και συγκεκριμένα:

- με την τάση στη μία κύρια διεύθυνση, π.χ. στη διεύθυνση 1, θλιπτική και υψηλή και

- στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις, δηλαδή στις 2 και 3, θλιπτικές τάσεις μικρότερες από τη σ_1 αλλά περίπου ίσες μεταξύ τους: $\sigma_2 \approx \sigma_3 < \sigma_1$.

Τέτοια εντατική κατάσταση αναπτύσσεται συχνά στο σκυροδέμα της θλιβόμενης ζώνης όταν αυτό πλησιάζει τη θλιπτική αστοχία, υπό την προϋπόθεση ότι περιορίζεται η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος (εγκάρσια στη διεύθυνση της θλίψης) που εκδηλώνεται πάντοτε πριν την αστοχία. Στην κρίσιμη διατομή άκρου μίας δοκού ή βάσης ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος, ο όγκος σκυροδέματος, μέσα στον οποίο ενσωματώνεται το μέλος που μας ενδιαφέρει (δηλαδή ο όγκος σκυροδέματος του υποστυλώματος, αν πρόκειται για άκρο δοκού, ή ο όγκος σκυροδέματος της πλάκας ή του στοιχείου θεμελίωσης, αν πρόκειται για βάση υποστυλώματος ή τοιχώματος) προκαλεί περιορισμό της εγκάρσιας στον άξονα του μέλους διόγκωσης του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης. Παρόμοια λειτουργούν, και μάλιστα σε μεγαλύτερη έκταση κατά τη διαμήκη έννοια, κλειστοί συνδετήρες ή άλλοι εγκάρσιοι στον άξονα του καμπτόμενου μέλους οπλισμοί, καθώς και μανδύες από σύνθετα υλικά (ινοοπλισμένα πλαστικά - FRP) που μπορεί να τοποθετηθούν περιμετρικά, για λόγους ενίσχυσης. Όταν ο περιορισμός της πλευρικής διόγκωσης επιτυγχάνεται μέσω εγκάρσιων οπλισμών ή μανδύα από FRP, μιλάμε για “περίσφιγξη” του σκυροδέματος, ενώ όταν αυτός οφείλεται στον όγκο του περιβάλλοντος σκυροδέματος, είναι καταλληλότερος ο όρος “εγκιβωτισμός”.

Η άσκηση ομοιόμορφης εγκάρσιας θλίψης στις διευθύνσεις 2 και 3, $\sigma_2 = \sigma_3 = p$, αυξάνει την αντοχή στη διεύθυνση της σ_1 , από f_c για $p=0$ σε f_c^* , αλλά και την παραμόρφωση στην κορυφή του διαγράμματος σ_1 - ϵ_1 , από $\epsilon_{c0} \approx 0,2\%$ σε ϵ_{c0}^* . Οι τιμές των f_c^* , ϵ_{c0}^* αυξάνονται με την εγκάρσια πίεση, p . Στο φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος μετά την κορυφή παρατηρείται όχι μόνον αύξηση των τεταγμένων (σ) με την τιμή της p , αλλά και μείωση της κλίσης (οριζοντίωσή του). Η μονοτονική καμπύλη σ_1 - ϵ_1 για $p \neq 0$ αποτελεί, όπως και στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης ($p=0$), περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης και γενικότερα της συμπεριφοράς σ_1 - ϵ_1 υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με $p \neq 0$ (βλ. π.χ. Σχήμα στο κατωτέρω Παράδειγμα 2.8).

Έχει προταθεί πληθώρα προσομοιωμάτων για τη μηχανική συμπεριφορά (σε όρους σ - ϵ) του περισφιγμένου σκυροδέματος. Απ’ αυτά παρουσιάζονται εδώ αυτά που έχουν επικρατήσει και υιοθετούνται κυρίως στην Ευρώπη.

Τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η θλιπτική αντοχή στη διεύθυνση της $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$, αυξάνεται έναντι της μονοαξονικής τιμής σε:

$$f_c^* = f_c(1+K) \quad (2.5)$$

$$\text{όπου } K \approx 3,7 \left(\frac{p}{f_c} \right)^{0,86} \quad (2.6)$$

Η εξ.(2.6), έχει προταθεί από τους Newman and Newman (1971) και υιοθετεί στο Μέρος 3 του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2003). Δίνει παρόμοια αποτελέσματα με τη σχέση:

$$K = 2.254 \left[\sqrt{1 + 7.94 \frac{p}{f_c}} - 1 \right] - \frac{2p}{f_c} \quad (2.7)$$

η οποία προσαρμόστηκε από τους Elwi and Murray (1974) στα πειραματικά δεδομένα, και χρησιμοποιείται συχνά καθότι υιοθετήθηκε από τους Mander et al (1988a).

Αν οι εγκάρσιες τάσεις, σ_2 και σ_3 , δεν είναι ίσες, δηλαδή αν $\sigma_2 > \sigma_3$, οι εξ.(2.6), (2.7) μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά προσέγγιση με $p \approx (\sigma_2 + 4\sigma_3)/5$, δηλαδή η μικρότερη από τις δύο τάσεις είναι η καθοριστική.

Η αύξηση της αντίστοιχης παραμόρφωσης είναι αναλογικά μεγαλύτερη (Richart et al, 1928):

$$\varepsilon_{co}^* \approx \varepsilon_{co}(1+5K) \quad (2.8)$$

Η καμπύλη σ_1 - ε_1 δεν επηρεάζεται από την εγκάρσια τάση p , παρά μόνον όταν η τιμή της σ_1 πλησιάζει τη μονοαξονική αντοχή f_c . Έτσι μέχρι αυτές τις τιμές της σ_1 δεν επηρεάζεται σημαντικά ούτε το εφαπτομενικό ούτε το επιβατικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, παρά το γεγονός ότι το επιβατικό μέτρο ελαστικότητας στην αντοχή f_c^* , δηλαδή η τιμή του f_c^*/ε_{co}^* , μειώνεται, όσον αυξάνεται η εγκάρσια τάση p . Επισημαίνεται ότι, αν το σχήμα της καμπύλης σ_1 - ε_1 του περισφιγμένου σκυροδέματος προσομοιωθεί όπως για τη μονοαξονική θλίψη, δηλαδή ως παραβολικό, το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ισούται με $2f_c^*/\varepsilon_{co}^*$ και μειώνεται με την τιμή της p , πράγμα που είναι από φυσική άποψη παράλογο. Το πρόβλημα αυτό αποφεύγεται, αν αντί του απλού παραβολικού διαγράμματος σ - ε που χρησιμοποιείται συνήθως για το σκυρόδεμα σε μονοαξονική θλίψη, χρησιμοποιηθεί η σχέση που προτείνει ο Ευρωκώδικας 2 (CEN, 2003b) για τη μη-γραμμική ανάλυση δομημάτων από σκυρόδεμα, γενικευμένη με χρήση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος, f_c^* , και της αντίστοιχης παραμόρφωσης, ε_{co}^* , κατά τις εξ.(2.5), (2.8):

$$\frac{\sigma}{f_c^*} = \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}^*} \left(k - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}^*} \right)}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}^*}} \quad (2.9)$$

όπου:

$$k=1.05E_c\varepsilon_{co}^*/f_c^* \quad (2.10)$$

με E_c την τιμή του επιβατικού μέτρου Ελαστικότητας μέχρι μονοαξονική τάση $\sigma=0.4f_c$, η οποία, κατά τον Ευρωκώδικα 2, ισούται με $11000f_c^{0.3}$. Το απλό παραβολικό διάγραμμα σ - ε προκύπτει από την εξ.(2.9) για $k=2$. Για μονοαξονική θλίψη, η εξ.(2.9) ισχύει και στο φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος σ - ε μετά την μονοαξονική αντοχή f_c , μέχρι και την παραμόρφωση αστοχίας, ε_{cu} .

Ο εγκιβωτισμός που προσφέρει στη θλιβόμενη ζώνη της ακραίας διατομής (διατομής παρειάς) το περιβάλλον σκυρόδεμα του μέλους στο οποίο συντρέχει το υπόψη κατά κανόνα αγνοείται υπέρ της ασφαλείας. Αντίθετα λαμβάνεται υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό η περίσφιγξη που προσφέρουν στο σκυρόδεμα οι συνδετήρες.

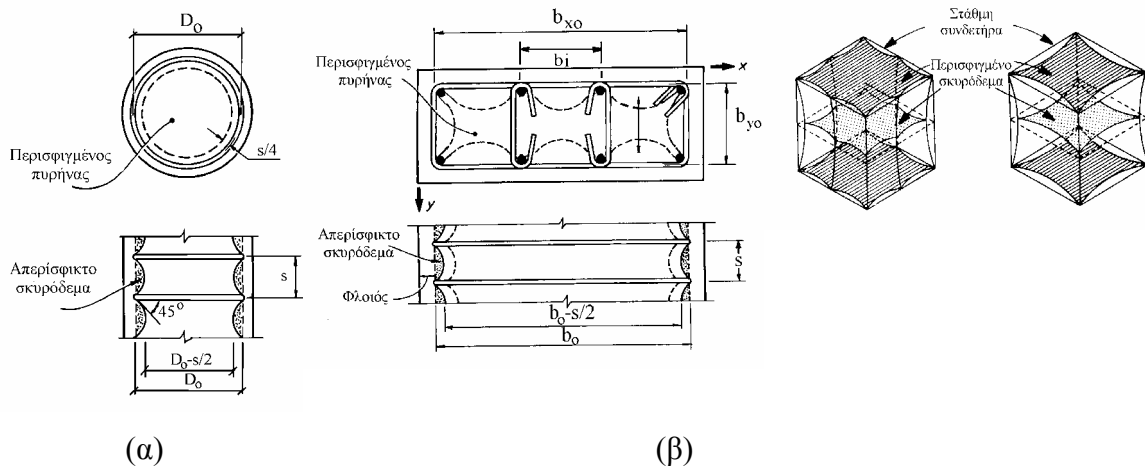
Κλειστοί και πυκνοί κυκλικοί συνδετήρες λειτουργούν σαν χιτώνιο, το οποίο αντιδρά στην πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος που περιβάλλουν, ασκώντας σ' αυτό σχεδόν ομοιόμορφη εγκάρσια τάση θλίψης ίση με:

$$p = \frac{A_{sw}}{s} \frac{\sigma_s}{R} \quad (2.10)$$

όπου: A_{sw} και s αντίστοιχα η διατομή και η απόσταση των συνδετήρων κατά τον άξονα του μέλους (το A_{sw}/s είναι το ισοδύναμο πάχος του “χιτωνίου” που εγκιβωτίζει το σκυρόδεμα), R η μέση ακτίνα του συνδετήρα και σ_s η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται σ' αυτόν παράλληλα με την ανάπτυξη της τάσης p στο σκυρόδεμα. Ως ογκομετρικό ποσοστό του συνδετήρα, ρ_w , ορίζεται το πηλίκο του όγκου του συνδετήρα δια του όγκου του περισφιγμένου σκυροδέματος, $\rho_w=(2\pi R)A_{sw}/(\pi R^2s)=2A_{sw}/sR$. Έτσι η μέγιστη τάση περίσφιγξης που μπορεί να αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα, δηλαδή κατά τη διαρροή του συνδετήρα, $\sigma_s=f_{yw}$, είναι:

$$\frac{p}{f_c} = 0,5\rho_w \frac{f_{yw}}{f_c} = 0,5\omega_w \quad (2.11)$$

όπου $\omega_w=\rho_w f_{yw}/f_c$ είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων, ανηγμένο στον όγκο του περισφιγμένου πυρήνα, ο οποίος λαμβάνεται μέχρι τον άξονα των συνδετήρων.



Σχήμα 2.11 Περισιφισμένα και απερίσιφικτα τμήματα σκυροδέματος, (α) για κυκλικούς συνδετήρες, (β) για ορθογωνικούς συνδετήρες σε διατομή και μηκτομή

Σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής, η περίσιφιξη επιτυγχάνεται κατά κανόνα όχι με κυκλικούς συνδετήρες αλλά με πολύτμητους ορθογωνικούς (βλ. Σχήμα 2.11(β), τα σκέλη των οποίων στην εγκάρσια διεύθυνση 2 (ή x) της διατομής αντιστοιχούν σε γεωμετρικό ποσοστό ρ_2 (ή ρ_x) = $\Sigma A_{swx}/b_y s$. Αν υποθεθεί ότι η ανάπτυξη εφελκυστικής τάσης $\sigma_s = f_{yw}$ σ' όλα τα σκέλη των συνδετήρων της διεύθυνσης x προκαλεί ομοιόμορφη εγκάρσια θλιπτική τάση σ_2 στο σκυρόδεμα, η ισορροπία δίνει: $\sigma_2 b_y s = (\Sigma A_{swx}) f_y$, δηλ. $\sigma_2 / f_c = \rho_x f_{yw} / f_c$. Αντίστοιχα στην (άλλη) εγκάρσια διεύθυνση, 3 ή y είναι: $\sigma_3 / f_c = \rho_y f_{yw} / f_c$. Επειδή δε, αν $\sigma_2 \neq \sigma_3$, για τη μηχανική συμπεριφορά του περισιφισμένου σκυροδέματος καθοριστική είναι κυρίως η μικρότερη από τις δύο εγκάρσιες τάσεις, είναι πάλι:

$$\rho / f_c \approx \min(\rho_x, \rho_y) f_{yw} / f_c = 0,5 \omega_w \quad (2.12)$$

όπου πλέον το ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων, ρ_w , ανηγμένο στον όγκο του περισιφισμένου πυρήνα (μέχρι τον άξονα του περιμετρικού συνδετήρα) ορίζεται ως:

$$\rho_w = 2 \min(\rho_x, \rho_y) = 2 \min(\Sigma A_{swx} / b_y, \Sigma A_{swy} / b_x) / s \quad (2.13)$$

όπου b_x και b_y είναι οι διαστάσεις του περισιφισμένου πυρήνα, δηλαδή οι διαστάσεις άξονα του περιμετρικού συνδετήρα.

Υποστρώματα με σχεδόν τετραγωνική διατομή, $b_x \approx b_y$, συχνά έχουν ένα ρομβοειδή συνδετήρα με κορυφές στα μέσα των πλευρών b_x και b_y του περιμετρικού συνδετήρα. Ένας τέτοιος συνδετήρας υπεισέρχεται στον υπολογισμό των ρ_x και ρ_y με τη διατομή ενός

σκέλους, A_{sw} , επί $\sqrt{2}$. Εναλλακτικά, υπεισέρχεται στο ογκομετρικό ποσοστό, ρ_w , με την πραγματική του περίμετρο επί A_{sw} . Ένας οκταγωνικός συνδετήρας υπεισέρχεται στον υπολογισμό των ρ_x ή ρ_y με τη διατομή σκέλους A_{sw} επί $\sqrt{2}$, που σημαίνει ότι δεν λαμβάνεται στο ογκομετρικό ποσοστό ρ_w με την πραγματική του περίμετρο.

Η περισφιγξη από ένα κυκλικό συνδετήρα ασκείται προς το σκυρόδεμα όχι ως ομοιόμορφη εγκάρσια τάση p αλλά ως εγκάρσια δύναμη ανά m μήκους της περιμέτρου του συνδετήρα. Έχει επικρατήσει η υπόθεση της αρχικής εργασία των Sheikh and Uzumeri (1982), ότι η δύναμη αυτή διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος αρχικά υπό γωνία $\pm 45^\circ$ ως προς το επίπεδο του συνδετήρα και στη συνέχεια στο εσωτερικό παραβολικών τόξων που εκτείνονται κατά τη διεύθυνση του άξονα του μέλους μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων, με εφαπτόμενη που σχηματίζει γωνία 45° ως προς τα επίπεδα των συνδετήρων (Σχήμα 2.11(α)). Μόνο το σκυρόδεμα που βρίσκεται προς το εσωτερικό των παραβολικών αυτών τόξων προς τον άξονα του μέλους θεωρείται ότι αισθάνεται την ευεργετική επιρροή της περισφιγξης. Το υπόλοιπο, που βρίσκεται έξω από τα παραβολικά τόξα μέχρι και την εξωτερική επιφάνεια, δεν θεωρείται περισφιγμένο. Η ελάχιστη διατομή του θεωρούμενου ως περισφιγμένου σκυροδέματος είναι στο μέσο ακριβώς της απόστασης διαδοχικών συνδετήρων. Επειδή δε η κορυφή παραβολικού τόξου απέχει από τη χορδή μήκους s που ενώνει τα άκρα του, απόσταση ίση με $0,5(s/2)\tan\varphi$, όπου φ είναι η γωνία μεταξύ χορδής και εφαπτομένης της παραβολής στα άκρα του τόξου (εδώ $\varphi=45^\circ$), η διάμετρος του ελάχιστου περισφιγμένου τμήματος ισούται με $2(R-s/4)=D_o-s/2$ (όπου D_o η διάμετρος στον άξονα του συνδετήρα) και η επιφάνειά του με $\pi(D_o-s/2)^2/4$, δηλ. με το εξής κλάσμα της διατομής σκυροδέματος μέσα από το συνδετήρα:

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2D_o}\right)^2 \quad (2.14a)$$

Παρόμοια, δηλαδή με όριο παραβολικά τόξα μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων σε μηκοτομή του μέλους δια του άξονά του, ορίζεται το περισφιγμένο και το απερίσφικτο σκυρόδεμα, αν ο συνδετήρας είναι σπειροειδής, έχει δηλαδή μορφή συνεχούς έλικας. Τότε όμως σε κάθε διατομή του μέλους το περισφιγμένο τμήμα βρίσκεται στο εσωτερικό κύκλου που εφάπτεται του σπειροειδούς συνδετήρα σ' ένα σημείο και αντιδιαμετρικά απέχει από το συνδετήρα κατά $0,5(s/2)\tan\varphi=s/4$. Έτσι η διάμετρός του είναι $D_o-s/4$ και ο λόγος της επιφάνειάς του προς αυτήν που περικλείεται από τη σπείρα ισούται με:

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{4D_o}\right)^2 \approx 1 - \frac{s}{2D_o} \quad (2.14b)$$

Για περίσφιγξη με ορθογωνικούς συνδετήρες, διαστάσεων (κατά του άξονα του συνδετήρα) b_{x_0} επί b_{y_0} , το παραπάνω σκεπτικό δίνει ελάχιστη διατομή περισφιγμένου τμήματος του μέλους, ως ποσοστό του $b_{x_0}b_{y_0}$, ίση με (Σχήμα 2.11(β)):

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_{x_0}}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_{y_0}}\right) \quad (2.15)$$

Κυκλικοί συνδετήρες ασκούν τις δυνάμεις περίσφιγξης στο σκυρόδεμα μέσω του συνόλου της περιμέτρου τους, δηλ. συνεχώς. Αντίθετα, ορθογωνικοί συνδετήρες ασκούν στο σκυρόδεμα εγκάρσιες δυνάμεις μόνο στις γωνίες τους. Ευθύγραμμα σκέλη συνδετήρων κατά την περίμετρο της διατομής κάμπτονται προς τα έξω υπό την επίδραση των τάσεων διογκώσεως του σκυροδέματος και δεν είναι αποτελεσματικά ως μέσο περίσφιγξης, παρά μόνον αν η πλευρική διόγκωση είναι τόσο μεγάλη που τα ευθύγραμμα περιμετρικά σκέλη καμπυλωθούν προς τα έξω αρκετά, ώστε να αρχίσουν να λειτουργούν ως κυκλικός συνδετήρας. Στις γωνίες των συνδετήρων οι δυνάμεις περίσφιγξης ασκούνται στο σκυρόδεμα σημειακά. Εφαρμόζεται και στην περίπτωση αυτή το σκεπτικό που αναπτύχθηκε προηγουμένως για τη διάχυση των δυνάμεων περίσφιγξης στο εσωτερικό παραβολικών τόξων που εκτείνονται μεταξύ διαδοχικών γωνιών συνδετήρα στην περίμετρο και έχουν στα άκρα τους εφαπτομένη υπό γωνία $\varphi=45^\circ$ ως προς την περίμετρο (Σχήμα 2.11(β)). Και πάλι η κορυφή του κάθε παραβολικού τόξου απέχει από τη μέση γραμμή του περιμετρικού συνδετήρα απόσταση $0,5(b_i/2)\tan\varphi=b_i/4$. Το σκυρόδεμα στο εσωτερικό αυτών των παραβολικών τόξων προς τον άξονα του μέλους θεωρείται περισφιγμένο και αυτό έξω από τα τόξα θεωρείται απερίσφικτο. Επειδή δε η επιφάνεια μεταξύ παραβολικού τόξου και της χορδής του που έχει μήκος b_i ισούται με $2b_i/3$ επί την απόσταση της κορυφής του τόξου από τη χορδή, δηλαδή με $b_i^2/6$, η επιφάνεια του περισφιγμένου σκυροδέματος ως ποσοστό αυτής που περικλείεται από τη μέση γραμμή του περιμετρικού συνδετήρα ισούται με:

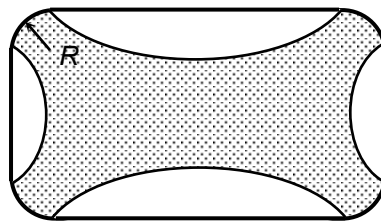
$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2/6}{b_{x_0}b_{y_0}} \quad (2.16)$$

Η εφαρμογή μανδύων από σύνθετα υλικά (ινο-οπλισμένα πολυμερή, FRP) γύρω από τις κρίσιμες περιοχές (περιοχές πλαστικών αρθρώσεων) των άκρων, αποτελεί πρόσφορη μέθοδο ενίσχυσης υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος. Η ενίσχυση αυτή έχει ως κύριο στόχο τη βελτίωση της ικανότητας παραμόρφωσης του υποστυλώματος σε κάμψη, μέσω περίσφιγξης του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης στις πλαστικές αρθρώσεις των άκρων. Επειδή οι μανδύες είναι συνεχείς, είναι $\alpha_s=1$. Εάν το υποστύλωμα είναι κυκλικό, είναι και $\alpha_n=1$. Εάν είναι ορθογωνικό, η περίσφιγξη ασκείται μέσω των τεσσάρων γωνιών της

διατομής, οι οποίες διαμορφώνονται σε τεταρτοκύκλια ακτίνας R εν μέρει για προσαύξηση της περισφιγμένης περιοχής και εν μέρει για λόγους προστασίας του (ψαθυρού) ινοοπλισμένου πολυμερούς από υψηλές τοπικές παραμορφώσεις στη γωνία (υπενθυμίζεται ότι η κάμψη του φύλλου του FRP σε ακτίνα R εισάγει σ' αυτό πρόσθετη εφελκυστική μήκυνση $\varepsilon=t/2R$, όπου t το πάχος του φύλλου του FRP). Το απερίσφικτο τμήμα της διατομής ορίζεται από τέσσερα παραβολικά τόξα με χορδή το ευθύγραμμο τμήμα κάθε πλευράς, οπότε προκύπτει, κατ' αναλογία προς την εξ.(2.16):

$$\alpha_n = 1 - \frac{(b_x - 2R)^2 + (b_y - 2R)^2}{3b_x b_y} \quad (2.17)$$

όπου b_x και b_y οι εξωτερικές διαστάσεις της ορθογωνικής διατομής (βλ. Σχ.2.12)



Σχ. 2.12. Περίσφιγξη ορθογωνικής διατομής μέσω συνθέτων υλικών (ινοοπλισμένων πολυμερών, FRP).

Τα μεγέθη των εξ.(2.14) έως (2.17) εκφράζουν τη διατομή του περισφιγμένου σκυροδέματος ανηγμένη σ' αυτήν που περικλείεται από τη μέση γραμμή του συνδετήρα, και ονομάζονται συντελεστές αποδοτικότητας της περισφιγξης. Επειδή δε σε ορθογωνικούς συνδετήρες η αποδοτικότητα της περισφιγξης μειώνεται, όχι μόνον στο μεσοδιάστημα μεταξύ συνδετήρων αλλά και μέσα στο ίδιο το επίπεδο του συνδετήρα μεταξύ διαδοχικών γωνιών του, για ορθογωνικούς συνδετήρες η συνολική αποδοτικότητα της περισφιγξης ορίζεται ως το γινόμενο:

$$\alpha = \alpha_n \alpha_s \quad (2.18)$$

των συντελεστών των εξ.(2.16) και (2.17) ή (2.18), εκφράζει δε το ελάχιστο εμβαδόν περισφιγμένης επιφάνειας σκυροδέματος μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων ως ποσοστό αυτού που περικλείεται από τον περιμετρικό συνδετήρα (Σχήμα 2.11(γ)). Για κυκλικούς συνδετήρες η εξ.(2.18) εξακολουθεί να ισχύει, αλλά με $\alpha_n=1$.

Οι πρώτες και βασικές προσπάθειες ποσοτικοποίησης της επιρροής της περίσφιγξης αφορούσαν τη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη. Αυτή η φέρουσα ικανότητα ισούται με το άθροισμα της ελάχιστης διατομής περισφιγμένου σκυροδέματος κατά μήκος του μέλους επί την αντίστοιχη αντοχή, και της διατομής του απερίσφικτου σκυροδέματος, επί f_c . Αυτό ισοδυναμεί με πολλαπλασιασμό της συνολικής επιφάνειας της διατομής σκυροδέματος, A_c , επί τη θλιπτική αντοχή f_c^* της εξ.(2.5), με παράλληλο πολλαπλασιασμό της τιμής του K , που εκφράζει την επιρροή της περίσφιγξης, επί το “συντελεστή αποδοτικότητάς” της, α , της εξ.(2.19). Επειδή, όμως, κατά κανόνα το K της εξ.(2.5) εκφράζεται χάριν απλότητας ως γραμμική συνάρτηση της εγκάρσιας θλιπτικής τάσης p , η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη του μηχανικού ογκομετρικού ποσοστού συνδετήρων, ω_w , (βλ. εξ.(2.11), (2.12)), τελικά ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης α , εξ.(2.14)-(2.19) εφαρμόζεται συνήθως ως πολλαπλασιαστικός συντελεστής στο ω_w .

Στο προσομοίωμα Mander et al (1988a), οι συντελεστές α_n και α_s εφαρμόζονται στις τάσεις περίσφιγξης σ_2 και σ_3 : δηλαδή το α_s στο ω_w στην εξ.(2.11) για κυκλικούς ή σπειροειδείς συνδετήρες και το α της εξ.(2.18) στα μηχανικά ποσοστά συνδετήρων $\omega_x = \rho_x f_{yw} / f_c$ και $\omega_y = \rho_y f_{yw} / f_c$ που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων $\sigma_2 / f_c = \alpha \omega_x$, $\sigma_3 / f_c = \alpha \omega_y$. Για το ϵ_{co}^* το προσομοίωμα Mander et al (1988a) υιοθετεί την εξ.(2.8) με K από την εξ.(2.7).

Το προσομοίωμα των Sheikh and Uzumeri (1982) χρησιμοποιεί στην εξ.(2.5) τιμή του K ίση περίπου με:

$$K = \alpha (7(\rho_w f_{yw})^{1/2} / f_c) \quad (2.19)$$

με α (περίπου) κατά τις εξ.(2.14)-(2.18) και μονάδες MPa.

Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται συχνά το προσομοίωμα του Model Code 90 των CEB/FIP (CEB, 1991), το οποίο δίνει γενικά συντηρητικότερα αποτελέσματα από όλα τα ανωτέρω. Επειδή δε έχει υιοθετηθεί από τον Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2003b) και επομένως και τον Ευρωκώδικα 8, δίνονται εδώ γι’ αυτό περισσότερες λεπτομέρειες. Στο προσομοίωμα αυτό χάριν απλότητας η εξ.(2.5) γραμμικοποιείται ως προς p :

$$f_c^* = \beta f_c = \min \left(1 + 5 \frac{p}{f_c}, 1,125 + 2,5 \frac{p}{f_c} \right) f_c \quad (2.20)$$

η δε τάση p υπολογίζεται από τις εξ.(2.11), (2.12) με χρήση του α_{ω_w} αντί του ω_w , όπου το α δίνεται από τις εξ.(2.14)-(2.19). Αντί της εξ.(2.8), χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση ε_{co}^* στην κορυφή του διαγράμματος η εξής:

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} \beta^2 \quad (2.21)$$

με $\varepsilon_{co} = 0,2\%$ και β σύμφωνα με την εξ.(2.20).

Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό του οπλισμένου σκυροδέματος η βράχυνση του σκυροδέματος στην αστοχία, ε_{cu} , έχει μεγάλη σημασία, πιθανόν μεγαλύτερη απ' ό,τι η θλιπτική του αντοχή f_c (ή f_c^*). Κι αυτό επειδή η εξάντληση της ε_{cu} στην ακραία θλιβόμενη ίνα της περισσότερο επιπονούμενης σε κάμψη διατομής σηματοδοτεί, συμβατικά ή στην πραγματικότητα, την (τελική) αστοχία διατομής και μέλους σε κάμψη. Η βράχυνση αστοχίας ορίζεται συνήθως συμβατικά, ως αυτή που αντιστοιχεί σε τάση ίση με 85% της θλιπτικής αντοχής f_c (ή f_c^* για περισφιγμένο σκυρόδεμα) στο φθίνοντα κλάδο μετά την κορυφή του διαγράμματος $\sigma_1 - \varepsilon_1$. Υπενθυμίζεται ότι στους υπολογισμούς της καμπτικής αντοχής διατομών το διάγραμμα $\sigma_1 - \varepsilon_1$ θεωρείται μετά την κορυφή του ως ορθογωνικό, με σταθερή τάση μέχρι τη (συμβατική) βράχυνση αστοχίας ε_{cu} . Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της ε_{cu} πρέπει να είναι περίπου τέτοια, ώστε το εμβαδόν κάτω από την πραγματική καμπύλη $\sigma_1 - \varepsilon_1$ από την κορυφή και πέρα να ισούται με $f_c(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co})$ (ή με $f_c^*(\varepsilon_{cu}^* - \varepsilon_{co}^*)$ για περισφιγμένο σκυρόδεμα). Επισημαίνεται ότι αυτό το εμβαδόν και αυτό το γινόμενο ισούται με τη συμβολή του φθίνοντος κλάδου του διαγράμματος $\sigma_1 - \varepsilon_1$ στην ανά μονάδα όγκου μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης της θλιβόμενης ζώνης.

Με βάση κάποια πειραματικά αποτελέσματα που δείχνουν ότι η αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος συμβαίνει όταν η πλευρική του διόγκωση προκαλέσει θραύση των συνδετήρων σε εφελκυσμό, το προσομοίωμα των Mander et al. (1988a) προτείνει η τιμή της ε_{cu}^* του περισφιγμένου σκυροδέματος να είναι τέτοια ώστε η ανά μονάδα όγκου του μέλους ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στους συνδετήρες μέχρι τη θραύση τους να ισούται με την επιπλέον ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στη θλιβόμενη ζώνη λόγω της περίσφιγξης. Αν το διάγραμμα τάσεων $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα των συνδετήρων θεωρηθεί (συντηρητικά και χάριν απλότητας) ως οριζόντιο σε τάση f_{yw} , για παραμόρφωση από 0 έως την ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας τους $\varepsilon_{su,w}$, η ανωτέρω απαίτηση σημαίνει:

$$\rho_w f_{yw} \varepsilon_u \approx f_c^* (\varepsilon_{cu}^* - \varepsilon_{cu})$$

$$\text{δηλ.} \quad \varepsilon_{cu}^* \approx \varepsilon_{cu} + \frac{\omega_w \varepsilon_{su,w}}{(1+K)} \quad (2.22)$$

Οι Pauley και Priestley (1992) πρότειναν τροποποίηση της ανωτέρω σχέσης με πολλαπλασιασμό του τελευταίου όρου με 1,4 και χρήση της τιμής $\varepsilon_{cu}=0,004$ για το απερίσφιγκτο σκυροδέμα. Η τροποποίηση αυτή της εξ.(2.22) φαίνεται να δίνει ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα για κεντρική θλίψη.

Μας ενδιαφέρει περισσότερο, όμως, η αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης καμπτόμενων στοιχείων, και μάλιστα στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Τα πειραματικά στοιχεία για την ικανότητα καμπτικής παραμόρφωσης της πλαστικής άρθρωσης δείχνουν ότι είναι σπάνια έως απίθανη η θραύση των συνδετήρων λόγω της τάσης του σκυροδέματος του περισφιγμένου πυρήνα να διογκωθεί και επομένως η τιμή της ομοιόμορφης μήκυνσης αστοχίας τους, $\varepsilon_{su,w}$, δεν επηρεάζει την παραμόρφωση αστοχίας στις ακραίες περισφιγμένες ίνες σκυροδέματος. Προκύπτει μάλιστα ότι οι ακραίες περισφιγμένες ίνες σκυροδέματος ορθογωνικής θλιβόμενης ζώνης αστοχούν σε μικρότερες παραμορφώσεις και συγκεκριμένα σε τιμή (Biskinis and Fardis, 2004):

Για μονοτονική φόρτιση:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 \left(1 - 0.01 \max \left(0, \left(\frac{s}{d_b} - 5 \right) \right) \right) + 0.055 \omega_w \quad (2.23)$$

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 + 0.25 \frac{\alpha \omega_w}{1+K} \quad (2.24)$$

όπου d_b είναι η διάμετρος των διαμήκων ράβδων του θλιβόμενου πέλματος, s η απόσταση των συνδετήρων που τις συγκρατούν έναντι λυγισμού και ο συντελεστής α δίνεται από τις εξ.(2.16)-(2.18).

Σημειώνεται ότι οι εξ.(2.23), (2.24) δίνουν βέλτιστη συμφωνία των εξ.(2.4) και (2.34) με τις πειραματικές τιμές της καμπυλότητας στην αστοχία αν θεωρηθεί ότι χάλυβες τύπου C (όπως αυτός ορίζεται στον Ευρωκώδικα 2 – βλ. Υποενότητα 2.1.1.3) έχει $\varepsilon_{su}=6\%$ και χάλυβες τύπου B ή A έχουν ε_{su} ίση με την ελάχιστη χαρακτηριστική τιμή, δηλ. $\varepsilon_{su}=5\%$ για χάλυβες τύπου B και $\varepsilon_{su}=2.5\%$ για τους ψαθυρούς χάλυβες τύπου A.

Χρήση της τιμής της ε_{cu}^* από την εξ.(2.22) με $\varepsilon_{cu}=0.004$ δίνει ανεκτή ακρίβεια στην

εκτίμηση της ικανότητας πλαστικής παραμόρφωσης της πλαστικής άρθρωσης. Εάν, όμως, ο 2^{ος} όρος της εξ.(2.22) πολλαπλασιασθεί επί 1.4, όπως προτείνουν οι Paulay and Priestley, η ικανότητα καμπτικής παραμόρφωσης της πλαστικής άρθρωσης υπερτιμάται υπερβολικά, ιδίως για ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Ο Πρότυπος Κανονισμός 1990 των CEB/FIP (CEB, 1991), τον οποίο ακολουθούν ως προς αυτό το σημείο ο Ευρωκώδικας 2 (και επομένως και ο Ευρωκώδικας 8), υιοθετεί μία διαφορετική σχέση για το ϵ_{cu} , με το $0,1\alpha_n\alpha_s$ ως πολλαπλασιαστικό συντελεστή του ω_w αντί του αρκετά μεγαλύτερου του $\epsilon_{su}/(1+K)$, καθώς και την τιμή $\epsilon_{cu}=0,0035$. Η σχέση που προκύπτει:

$$\epsilon_{cu}^* = 0,0035 + 0,1\alpha_n\alpha_s\omega_w \quad (2.25)$$

δίνει πολύ πιο συντηρητικές προβλέψεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για την ικανότητα παραμόρφωσης της πλαστικής άρθρωσης καμπτομένων στοιχείων.

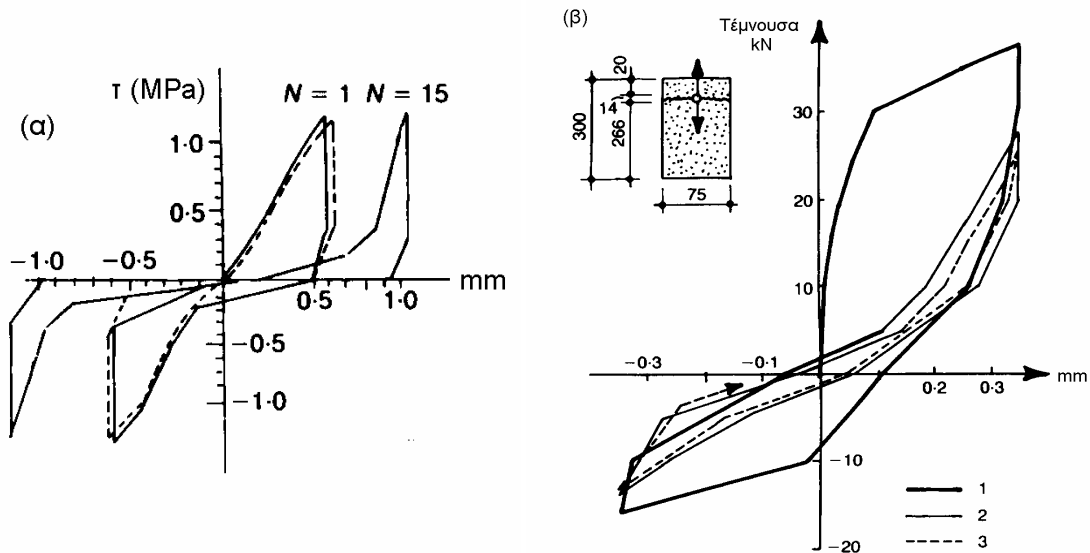
Σημειώνεται ότι σε καμπτόμενα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος η αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί από την τάση ελλιπώς κλειστών συνδετήρων να ανοίξουν πριν τη θραύση τους, ή εξαιτίας της ταυτόχρονης επιβάρυνσης των συνδετήρων από την τάση των διαμήκων ράβδων να λυγίσουν προς τα έξω (τάση που ακυρώνει επίσης τη συμβολή των ιδίων των διαμήκων ράβδων στην περίσφιγξη του σκυροδέματος).

Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση της κάμψης με ή χωρίς αξονική θλίψη, η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος των ακραίων θλιβομένων ινών περιορίζεται, προς τα έξω μεν από τους συνδετήρες, προς τα μέσα δε από τις εσωτερικές ίνες της διατομής, δηλαδή από αυτές που βρίσκονται πιο κοντά στον ουδέτερο άξονα, καθότι αυτές, όντας υπό χαμηλότερες τάσεις, έχουν μικρότερη τάση πλευρικής διόγκωσης. Επομένως οι ίνες αυτές ανθίστανται στην πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος ακραίων ινών και την περιορίζουν, όπως ακριβώς κάνουν και οι συνδετήρες. Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι οι σχέσεις για την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του περισφιγμένου σκυροδέματος που έχουν αναπτυχθεί για την περίπτωση κεντρικής θλίψης μπορούν να εφαρμοσθούν και στη θλιβόμενη ζώνη καμπτομένων στοιχείων.

2.1.2.3 Η μεταφορά τέμνουσας στις ρωγμές με αλληλοεμπλοκή αδρανών και δράση βλήτρου

Το σκυρόδεμα ρηγματώνεται κάθετα στη διεύθυνση μιας κύριας εφελκυστικής τάσης, όταν αυτή υπερβεί την εφελκυστική του αντοχή. Καθώς δεν δρουν διατμητικές τάσεις σε

κύρια επίπεδα τάσεων, αρχικά δεν υπάρχει μεταφορά διατμητικών δυνάμεων μέσω της διεπιφάνειας της ρωγμής. Επειδή όμως κατά τη σεισμική απόκριση οι συνιστώσες της έντασης δεν αυξάνονται αναλογικά, αλλά μεταβάλλονται ριζικά σε μέγεθος, πρόσημο κλπ., ρωγμές που έχουν σχηματισθεί στο σκυρόδεμα σε κάποιο στάδιο της απόκρισης καλούνται αργότερα να μεταφέρουν διατμητικές δυνάμεις.



Σχήμα 2.13 Σχέση διατμητικής τάσης-μετακίνησης παράλληλα στη ρωγμή, υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης έντασης: (α) αλληλοεμπλοκή αδρανών (από Laible et al, 1997), (β) δράση βλήτρου (από Vintzeleou and Tassios, 1987)

Επειδή οι ρωγμές έχουν ανώμαλη επιφάνεια και κατά κανόνα διαπερνώνται κάθετα ή λοξά από ράβδους οπλισμού, μπορούν να μεταφέρουν δυνάμεις παράλληλες στην επιφάνειά τους, δηλαδή διατμητικές, μέσω τριβής (η οποία στην περίπτωση αυτή αναφέρεται ως “αλληλοεμπλοκή αδρανών”) και μέσω “δράσης βλήτρου” των οπλισμών που τις διαπερνούν. Και οι δύο αυτοί μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας μπορούν να μεταφέρουν σημαντικές δυνάμεις υπό μονοτονική φόρτιση. Όμως και οι δύο είναι πολύ ευαίσθητοι στην ανακύκλιση της διατμητικής έντασης και της ολίσθησης κατά μήκος της ρωγμής. Η ανακύκλιση λειαίνει και εξομαλύνει την επιφάνεια της ρωγμής, αποδυναμώνοντας έτσι το μηχανισμό “αλληλοεμπλοκής αδρανών”. Επίσης, συνθλίβει και σταδιακά καταστρέφει το σκυρόδεμα γύρω από τις ράβδους που λειτουργούν ως βλήτρα. Αυτό φαίνεται και στα χαρακτηριστικά πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.13. Το Σχήμα 2.13(α) αφορά αλληλοεμπλοκή αδρανών και το 2.13(β) δράση βλήτρου. Και στις δύο περιπτώσεις οι βρόχοι υστέρησης είναι στενοί, που σημαίνει ότι δεν απορροφούν σημαντική ενέργεια και έχουν σχήμα αντίστροφου

S, με αποφόρτιση αρχικά απότομη και εξίσου απότομη τελική επαναφόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση, με σχεδόν ελεύθερη ολίσθηση στο ενδιάμεσο διάστημα. Αυτή η ελεύθερη ολίσθηση είναι απαραίτητη για να έλθουν σε “σκληρή” επαφή οι δύο (λειασμένες) παρειές της ρωγμής ή η ράβδος-βλήτρο με το (συνθλιμμένο) σκυρόδεμα στην αντίθετη κατεύθυνση. Ως αποτέλεσμα, υπό συνθήκες σταθερού εύρους της ανακυκλιζόμενης δύναμης έχουμε ταχεία σταδιακή αύξηση της ολίσθησης (Σχήμα 2.13(α)), ενώ υπό συνθήκες σταθερού εύρους της ανακυκλιζόμενης μετατόπισης κατά μήκος της ρωγμής έχουμε ραγδαία μείωση του μεγέθους της δύναμης που μεταφέρεται (Σχήμα 2.13(β)).

Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι υπό ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση η μεταφορά τέμνουσας στις ρωγμές χαρακτηρίζεται από μικρή δυσκαμψία (μεγάλες μετακινήσεις) και από ασήμαντη απορρόφηση ενέργειας.

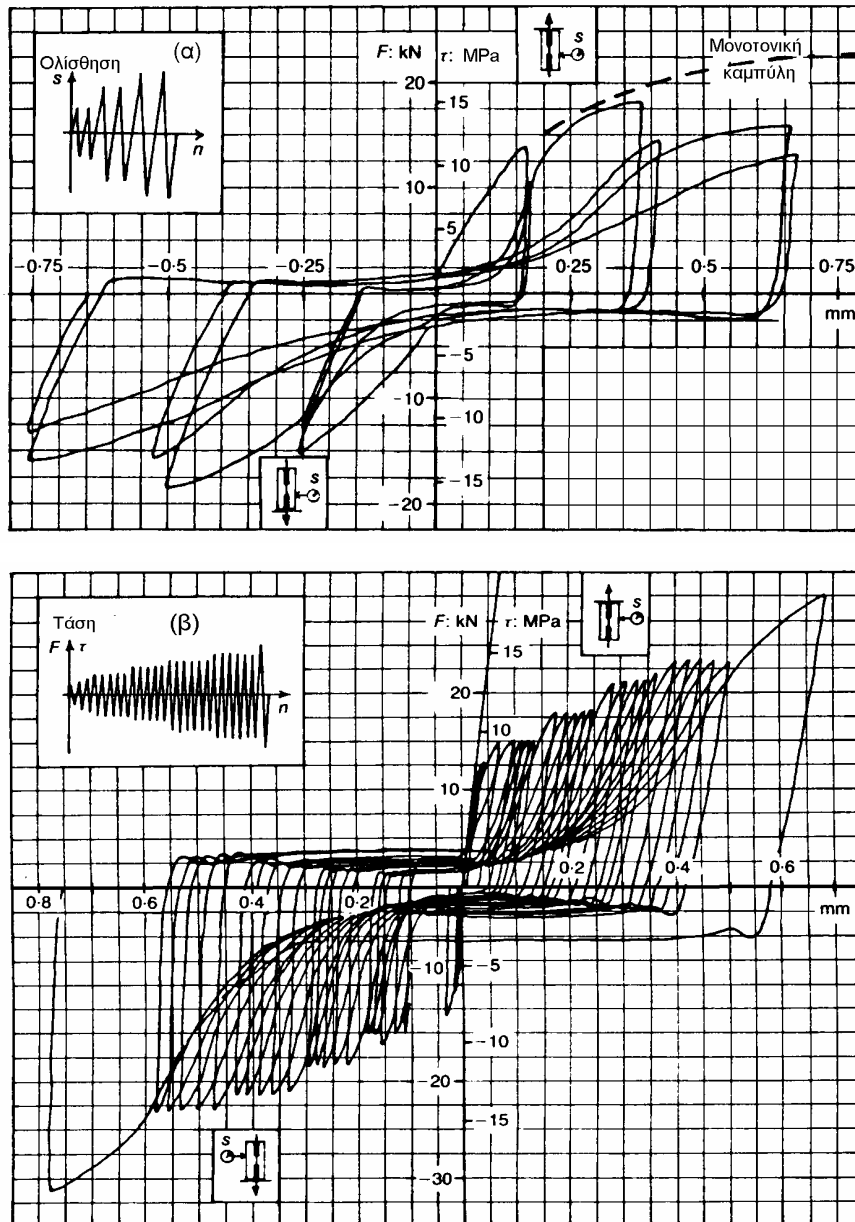
2.1.3 Η ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ-ΟΠΛΙΣΜΩΝ

Οι αγκυρώσεις και οι ενώσεις των ράβδων στο σκυρόδεμα σχεδιάζονται κατά κανόνα με βάση μία τιμή σχεδιασμού της τάσης συνάφειας η οποία, για ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας ισούται κατά τον Ευρωκώδικα 2 και τον ΕΚΟΣ 2000 με $2.25f_{ctd}$, όπου f_{ctd} είναι η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, η οποία συνιστάται κατά τους κανονισμούς αυτούς να προκύπτει με διαίρεση με τον επιμέρους συντελεστή ασφαλείας υλικού $\gamma_c=1,5$, της κάτω χαρακτηριστικής τιμής, $f_{ctk,0.05}$, αντί της μέσης τιμής της εφελκυστικής αντοχής f_{ctm} . Οι τιμή αυτή προκύπτει ίση με $0,315f_{ck}^{2/3}$ για ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας και - με την κατά 30% μείωση - με $0,22 f_{ck}^{2/3}$ για δυσμενείς (f_{ck} σε MPa). Οι τιμές αυτές, που για f_{ck} από 16 έως 30MPa κυμαίνονται από 2 έως 3MPa στην πρώτη περίπτωση, ή από 1,4 έως 2,1MPa στη δεύτερη, εμπεριέχουν τον επιμέρους συντελεστή ασφαλείας υλικού $\gamma_c=1,5$, αντιστοιχούν δε (χωρίς το γ_c) στην τάση που προκαλεί ολίσθηση 0.1mm μεταξύ ράβδου και περιβάλλοντος σκυροδέματος και όχι στην οριακή αντοχή σε συνάφεια.

Κατά CEB/FIP Model Code 90 (CEB, 1991), η πραγματική οριακή αντοχή σε συνάφεια σε απερίσφικτο σκυρόδεμα (χωρίς τον επιμέρους συντελεστή $\gamma_c=1,5$) ισούται περίπου με $2\sqrt{f_c}$ για ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας και με $\sqrt{f_c}$ για δυσμενείς (δηλαδή για f_c από 16 έως 30MPa, μεταξύ 8 και 11MPa στην πρώτη περίπτωση, ή 4 και 5.5MPa στη δεύτερη) και αντιστοιχεί σε ολίσθηση $s=0,6\text{mm}$.

Κατά νεότερες έρευνες (Huang et al, 1996), η οριακή αντοχή σε συνάφεια συνοδεύεται από ολίσθηση 1mm και ισούται με το 45% της (μέσης) θλιπτικής αντοχής f_c υπό ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας, ή με το μισό (δηλ. $0.225f_c$) για δυσμενείς. Για f_c μεταξύ 16 και 30MPa,

οι τιμές αυτές δίνουν οριακή αντοχή μεταξύ 7.2 και 13.5MPa στην πρώτη περίπτωση, ή μεταξύ 3.6 και 6.75MPa στη δεύτερη. Όταν όμως η ράβδος που αγκυρώνεται φθάσει τη διαρροή, η οριακή αντοχή σε συνάφεια μειώνεται στο 20% περίπου των ανωτέρω κανονικών τιμών της.



Σχήμα 2.14 Σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης ράβδου υπό ανακυκλιζόμενη ένταση (από Balazs, 1991)

Μετά την οριακή αντοχή η τάση συνάφειας μειώνεται σταδιακά, φθάνοντας μία απομένουσα αντοχή ίση με το 15% της οριακής. Αν το σκυρόδεμα γύρω από τη ράβδο είναι περισφιγμένο, τότε η αστοχία της συνάφειας εκδηλώνεται όχι με διάρρηξη του σκυροδέματος αλλά με “εξόλκευση” (pull-out) της ράβδου, οι ανωτέρω τιμές της οριακής

αντοχής αυξάνονται κατά 25% περίπου, η ολίσθηση στην οποία συμβαίνει η αστοχία αυξάνεται στο 1mm έως 3mm, η δε απομένουσα αντοχή σε συνάφεια ισούται με το 40% περίπου της οριακής αντοχής και συμβαίνει σε τιμές της ολίσθησης τάξεως δεκάδων mm.

Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι η τιμή σχεδιασμού της τάσης συνάφειας με την οποία διαστασιολογούνται οι αγκυρώσεις ισούται με μικρό μόνο ποσοστό της πραγματικής οριακής αντοχής και μόλις ξεπερνούν την απομένουσα αντοχή της συνάφειας. Όμως αυτό το περιθώριο ασφαλείας μοιάζει να είναι απαραίτητο υπό συνθήκες σεισμικής έντασης, διότι η εναλλαγή του προσήμου (δηλαδή της φοράς) της τάσης συνάφειας προκαλεί σημαντική εξασθένηση της σχετικής αντοχής και δυσκαμψίας.

Πράγματι, τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.14 (για σκυρόδεμα με $f_{ck}=25\text{MPa}$) δείχνουν ότι έχουμε σταδιακή αύξηση της ολίσθησης υπό σταθερό εύρος τάσης συνάφειας και ότι οι βρόχοι υστέρησης έχουν σχήμα αντίστροφου S και μικρό εύρος (που σημαίνει χαμηλή απορρόφηση ενέργειας). Το σχήμα των βρόχων οφείλεται στην απότομη αποφόρτιση και στη σχεδόν ελεύθερη ολίσθηση της ράβδου μέχρι να ενεργοποιηθεί ξανά η συνάφεια προς την αντίθετη κατεύθυνση. Βρόχοι με τέτοιο σχήμα δείχνουν ότι η συμπεριφορά ελέγχεται από την ολίσθηση και την τριβή, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της αλληλοεμπλοκής αδρανών. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη σταδιακή αποσύνθεση του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο, λόγω επέκτασης και διασύνδεσης των μικρορωγμών που προκαλούν οι τάσεις συνάφειας, λόγω τοπικής σύνθλιψης του σκυροδέματος μπροστά από και μεταξύ των νευρώσεων, κ.α.

Με την εξασφάλιση ενός ικανοποιητικού μήκους αγκύρωσης (ή ένωσης) η μέση τάση συνάφειας διατηρείται αρκετά χαμηλή και φαινόμενα όπως αυτά του Σχήματος 2.14 περιορίζονται σε μέγεθος και έκταση. Όμως σε αγκυρώσεις ράβδων μέσα σε κόμβους τα φαινόμενα αυτά δεν μπορούν να αποφευχθούν στο πρώτο τμήμα της ράβδου μέσα στον κόμβο. Συγκεκριμένα, στη διατομή παρειάς του κόμβου οι εφελκόμενες ράβδοι του μέλους έχουν όχι μόνο διαρρεύσει αλλά και αναπτύξει σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις (π.χ. βλ. Σχήμα 2.6). Στην αμέσως γειτονική θέση κατά μήκος της ράβδου προς το εσωτερικό του κόμβου οι τάσεις στη ράβδο (και μαζί και οι παραμορφώσεις της) θα είναι μικρότερες, αλλά θα παραμένουν μεγάλες. Μεγάλες μηκύνσεις στη ράβδο μέσα στον κόμβο σημαίνουν και σημαντική ολίσθηση μεταξύ ράβδου και περιβάλλοντος σκυροδέματος, καθότι η ολίσθηση ισούται με το ολοκλήρωμα κατά μήκος της ράβδου της μήκυνσης του χάλυβα (μείον τη μήκυνση του περιβάλλοντος σκυροδέματος, που είναι αμελητέα). Μεγάλη ολίσθηση σημαίνει ότι τοπικά η ράβδος είναι στην ουρά του (μονοτονικού) διαγράμματος συνάφειας-ολίσθησης, όπου οι τάσεις συνάφειας είναι μικρές. Ως αποτέλεσμα, η ουσιαστική μείωση της

τάσης της ράβδου μεταφέρεται προς το εσωτερικό του κόμβου, όπου το σκυρόδεμα γύρω από τη ράβδο είναι καλά εγκιβωτισμένο και μπορεί να αναπτύξει υψηλές τάσεις συνάφειας χωρίς μεγάλη ολίσθηση. Έτσι οι ράβδοι αγκυρώνονται μόνο στον πυρήνα του κόμβου, μέσα από τους συνδετήρες. Στο πριν από τον πυρήνα τμήμα τους, μήκους αρκετών cm, η συνάφεια δεν επαρκεί για τη μείωση της τάσης τους κάτω από το όριο διαρροής. Γι' αυτό, το αρχικό αυτό τμήμα των ράβδων μέσα στον κόμβο καλείται μήκος “διείσδυσης της διαρροής”.

2.1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Με βάση τον τρόπο συμπεριφοράς του χάλυβα, του σκυροδέματος και της αλληλεπίδρασής τους (συνάφεια, μεταφορά διάτμησης στις ρωγμές) υπό ανακυκλιζόμενη ένταση και παραμόρφωση, συνάγεται το εξής συμπέρασμα για το ποιό υλικό και τρόπος συμπεριφοράς προκρίνεται ως κατάλληλο για να παίζει τον κύριο ρόλο στην ανελαστική απόκριση ενός μέλους οπλισμένου σκυροδέματος:

Υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, η μεταφορά τέμνουσας παράλληλα στις ρωγμές με αλληλοεμπλοκή αδρανών και δράση βλήτρου και η συνάφεια σκυροδέματος-οπλισμού χαρακτηρίζονται από χαμηλή απορρόφηση ενέργειας και μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής με την ανακύκλιση (αύξηση μέγιστης παραμόρφωσης για σταθερό εύρος δύναμης, ή μείωση μέγιστης δύναμης για σταθερό εύρος μετακίνησης). Άρα αυτοί οι τρόποι συμπεριφοράς δεν είναι κατάλληλοι για ανελαστική απόκριση και χρειάζεται να κρατηθούν (μέσω του σχεδιασμού) στην ελαστική περιοχή. Αντίθετα, εξαιρετικά πλάστιμη και κατάλληλη για την ανελαστική απόκριση είναι η συμπεριφορά του χάλυβα σε εφελκυσμό, καθότι χαρακτηρίζεται από μεγάλη απορρόφηση ενέργειας και σταθερότητα βρόχων ακόμα και για μεγάλες παραμορφώσεις. Το απερίσφικτο σκυρόδεμα και ο χάλυβας υπό θλιπτικές τάσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν λυγισμό, έχουν ψαθυρή συμπεριφορά, όχι όμως τόσο ψαθυρή όσο η συνάφεια ή η μεταφορά τέμνουσας παράλληλα στις ρωγμές. Αντίθετα το περισφιγμένο σκυρόδεμα σε θλίψη έχει οιοное πλάστιμη συμπεριφορά, καθότι μπορεί να υποστεί σημαντικό αριθμό κύκλων ανελαστικής παραμόρφωσης χωρίς να μειωθεί σημαντικά η μέγιστη τάση του. Επομένως, μπορεί να ανατεθεί και σ' αυτό σημαντικός ρόλος, στα πλαίσια της ανελαστικής απόκρισης του μέλους.

2.2 ΤΑ ΜΕΛΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σκοπός της ενότητας 2.2 είναι να παρουσιάσει τη συμπεριφορά των συνήθων μελών

οπλισμένου σκυροδέματος σε ανακυκλιζόμενη κάμψη και διάτμηση, του τύπου που συνήθως προκαλεί σ' αυτά ο σεισμός.

2.2.1 ΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ: ΚΑΜΨΗ, ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑ

Σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με λόγο διάτμησης (δηλ. λόγο μήκους διάτμησης $L_s=M/V$ προς ύψος h της διατομής) μεγαλύτερο του 2,0 έως 2.5, όπως είναι οι συνήθεις δοκοί, τα συνήθη υποστυλώματα και τοιχώματα, οι μηχανισμοί μεταφοράς των δυνάμεων μέσω κάμψης (δηλαδή με δυνάμεις και τάσεις παράλληλες στον άξονα) και διάτμησης (δηλαδή με λοξές ή και εγκάρσιες προς τον άξονα δυνάμεις και τάσεις) μπορούν να θεωρηθούν ως περίπου ανεξάρτητοι. Αντίθετα, σε μέλη με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2,0 με 2.5 (κοντά υποστυλώματα ή τοιχώματα, κοντές ή υψίκορμες δοκοί), αυτοί ο δύο μηχανισμοί ανάληψης και μεταφοράς δυνάμεων συγχωνεύονται ουσιαστικά σε έναν, γεγονός που συχνά εκφράζεται ως σημαντική μείωση της καμπτικής αντοχής λόγω της τέμνουσας και της διατμητικής αντοχής λόγω της κάμψης.

Στα στοιχεία με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του 2,0 με 2.5 οι δύο (πρακτικά) ανεξάρτητοι μηχανισμοί ανάληψης και μεταφοράς των δυνάμεων μπορούν να θεωρηθούν ότι λειτουργούν εν σειρά μέσα στο μήκος διάτμησης, L_s , υπό την έννοια ότι:

- οι δυνάμεις χρειάζεται να αναληφθούν με ασφάλεια και από τους δύο και αστοχία του ενός μηχανισμού σημαίνει αστοχία του μέλους και
- οι συνολικές παραμορφώσεις του μέλους ισούνται με το άθροισμα των παραμορφώσεων, ελαστικών ή ανελαστικών, που οφείλονται στους δύο επιμέρους μηχανισμούς.

Μάλιστα, ο ικανοτικός σχεδιασμός των μελών σε διάτμηση στηρίζεται ακριβώς στην εν σειρά λειτουργία των δύο αυτών μηχανισμών, για να εξασφαλίσει ότι οι ανελαστικές παραμορφώσεις θα οφείλονται στην (πλάστιμη) καμπτική συμπεριφορά αντί στην ψαθυρή διατμητική.

Στο βαθμό που η λειτουργία των μηχανισμών καμπτικής ή διατμητικής αντοχής απαιτεί την ανάπτυξη (εφελκυστικών) τάσεων στους οπλισμούς, απαιτεί επίσης και τη λειτουργία του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων από το χάλυβα στο σκυρόδεμα και αντίστροφα μέσω συναφείας, με ό,τι αυτό συνεπάγεται (σχετική ολίσθηση χάλυβα-σκυροδέματος κλπ.). Το τμήμα του μηχανισμού αυτού που λειτουργεί μέσα στο μήκος διάτμησης κατ' ανάγκην θεωρείται επιμέρους τμήμα του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων με κάμψη ή διάτμηση. Όμως, έξω από το μήκος διάτμησης και μέσα στην επέκταση των διαμήκων ράβδων πέραν από το άκρο του μέλους (π.χ. μέσα στον κόμβο) η μεταφορά δυνάμεων από τις ράβδους στο

σκυρόδεμα και αντίστροφα καθώς και η σχετική ολίσθηση που τη συνοδεύει, πρέπει να θεωρηθεί ως ένας χωριστός μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων, εν σειρά και αυτός με τους προηγούμενους. Έτσι τελικά το μήκος διάτμησης L_s ενός μέλους οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εν σειρά σύστημα: (α) του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων μέσω κάμψης (β) του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων μέσω διάτμησης και (γ) της αγκύρωσης των διαμήκων ράβδων στον κόμβο πέραν από το άκρο του μήκους διάτμησης. Οι συνολικές παραμορφώσεις του μέλους ισούνται με το άθροισμα των (ελαστικών ή ανελαστικών) παραμορφώσεων των τριών επιμέρους μηχανισμών, η δε αντοχή του με την ελάχιστη των επιμέρους αντοχών.

Από τα λίγα που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.1.3 προκύπτει σαφώς ότι πέραν από ένα σχετικά χαμηλό μέγιστο όριο τάσης συνάφειας, η μεταφορά δυνάμεων από το σκυρόδεμα στο χάλυβα και αντίστροφα είναι ευαίσθητη στην ανακύκλιση της έντασης, δεν προσφέρεται για απορρόφηση ενέργειας και γενικά δεν αντιστοιχεί σε πλάστιμη συμπεριφορά. Προκύπτει έτσι η ανάγκη εξασφάλισης της αγκύρωσης των διαμήκων ράβδων σε περιοχές καλά εγκιβωτισμένου σκυροδέματος (π.χ. στον πυρήνα κόμβων), σε μήκος επαρκές για τον περιορισμό του εύρους διακύμανσης των τάσεων συνάφειας μέσα σ' ανεκτά όρια, τέτοια ώστε ακόμα και υπό ανακυκλιζόμενη ένταση η σχετική ολίσθηση των οπλισμών μέσα στο μήκος αγκύρωσής τους να είναι μικρή.

Στις παρακάτω υποενότητες θα δούμε αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων με κάμψη ή διάτμηση σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης έντασης.

2.2.2 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

2.2.2.1 Σχέση ροπών-καμπυλοτήτων σε μονοτονική μονοαξονική κάμψη

2.2.2.1.1 Η σημασία και το φυσικό νόημα της καμπυλότητας

Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η υπόθεση Navier-Bernoulli περί επιπεδότητας διατομών ισχύει κατά προσέγγιση και για γραμμικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, όχι μόνο μετά την (καμπτική) ρηγμάτωση του σκυροδέματος αλλά και μετά τη διαρροή του χάλυβα, μέχρι σχεδόν την τελική (καμπτική) αστοχία. Αυτό επιτρέπει την περιγραφή της καμπτικής συμπεριφοράς σε επίπεδο διατομής και σε όρους ροπών M και καμπυλοτήτων φ . Υπενθυμίζεται ότι σε καμπτόμενα μέλη η καμπυλότητα συνδέει την παραμόρφωση ε με την απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα: $\varepsilon = \varphi y$, και επομένως τη μέγιστη βράχυνση του σκυροδέματος με το ύψος $x = \xi d$ της θλιβόμενης ζώνης: $\varepsilon_c = \varphi x$, καθώς και την παραμόρφωση χάλυβα, εφελκόμενου σε απόσταση d_1 από το εφελκόμενο πέλμα ή θλιβόμενου σε

απόσταση d_1 από το θλιβόμενο, με τις αντίστοιχες αποστάσεις από τον ουδέτερο άξονα: $\varepsilon_{s1}=\varphi(d-x)=\varphi(1-\xi)d$, $\varepsilon_{s2}=\varphi(x-d_1)=\varphi(1-\xi-d_1/d)d$. Υπενθυμίζεται επίσης ότι η ροπή M και η καμπυλότητα φ είναι έργο-αντίστοιχα μεγέθη (όπως ακριβώς η τάση σ και η παραμόρφωση ε) καθώς το ολοκλήρωμα του $Md\varphi$ δίνει την ανά m μήκους καμπτική ενέργεια παραμόρφωσης.

Η περιγραφή της συμπεριφοράς καμπτομένων μελών σε όρους M - φ είναι πολύ διαδεδομένη, επειδή η σχέση $\varepsilon=\varphi y$ διευκολύνει εξαιρετικά την κατασκευή του διαγράμματος M - φ μέχρι και την αστοχία για δεδομένη τιμή της αξονικής δύναμης. Συγκεκριμένα, για δεδομένη κατανομή του χάλυβα στη διατομή και γνωστούς νόμους σ - ε σκυροδέματος και χάλυβα, υπολογίζεται η ροπή M που αντιστοιχεί σε καμπυλότητα φ ως $M = \int y\sigma dA$, αφού καθορισθεί με διαδοχικές επαναλήψεις η θέση του ουδέτερου άξονα (δηλαδή η τιμή του $\xi=x/d$), η οποία για τη συγκεκριμένη τιμή της φ , δίνει τη γνωστή τιμή της αξονικής δύναμης: $N = \int \sigma dA$. Αν είναι διαθέσιμοι οι νόμοι σ - ε των υλικών για ανακυκλιζόμενη φόρτιση (δηλαδή με αποφόρτιση, επαναφόρτιση κλπ.), μπορούν να κατασκευασθούν διαγράμματα M - φ για ανακυκλιζόμενη κάμψη υπό σταθερή αξονική δύναμη. Υπάρχουν για το σκοπό αυτό πολλά απλά προγράμματα H/Y , για την κατασκευή των οποίων αρκεί στοιχειώδης γνώση προγραμματισμού.

Όμως, ενώ για τους παραπάνω λόγους η καμπυλότητα είναι δημοφιλής και χρησιμοποιείται ευρύτατα, σε μέλη οπλισμένου σκυροδέματος χάνει το φυσικό της νόημα μετά τη ρηγμάτωση. Και τούτο λόγω της διακριτής φύσης της ρηγμάτωσης και του γεγονότος ότι ο λυγισμός των ράβδων και η θλιπτική αστοχία του απερίσφικτου ή του περισφιγμένου σκυροδέματος συμβαίνουν σ' ένα πεπερασμένο μήκος του μέλους. Για το λόγο αυτό η καμπυλότητα ορίζεται (αλλά και μετράται πειραματικά) ως η σχετική γωνία στροφής $\Delta\theta$ δύο γειτονικών διατομών, σε απόσταση μεταξύ τους Δx η οποία είναι παρόμοια σε τάξη μεγέθους: α) με την απόσταση δύο διαδοχικών ρωγμών και β) με το μήκος στο οποίο εκτείνεται ο λυγισμός των ράβδων (διπλάσιο του μήκους λυγισμού τους L) ή και η θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος. Προκύπτει έτσι μία μέση καμπυλότητα, $\varphi=\Delta\theta/\Delta x$, η οποία κανονικά αναφέρεται στη μέση τιμή της ροπής στο μήκος Δx .

2.2.2.1.2 Η τιμή της καμπυλότητας στη διαρροή

Η αναλυτική ή πειραματική καμπύλη ροπής M - (μέσης) καμπυλότητας φ είναι αρχικά γραμμική, με κλίση M/φ ίση με τη δυσκαμψία EI της αρηγμάτωτης διατομής σκυροδέματος (ακριβέστερα, με αυτή της “ισοδύναμης” διατομής, στην οποία ο οπλισμός έχει

μετασχηματισθεί σε α-πλάσια επιφάνεια σκυροδέματος, όπου α ο λόγος των Μέτρων Ελαστικότητας, $\alpha = E_s/E_c$). Μετά τη ρηγμάτωση η σχέση Μ-φ συνεχίζει (περίπου) γραμμικά αλλά με μειωμένη κλίση, μέχρι και τη “διαρροή” της διατομής. Εκεί η κλίση της καμπύλης Μ-φ μειώνεται σημαντικά και σχετικά απότομα. Κατά κανόνα η “διαρροή” της διατομής οφείλεται στη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού σε τάση $\sigma_{s1} = f_y$ και συμβαίνει σε τιμή της καμπυλότητας που δίνεται από την εξ.(2.3), με ανηγμένο (στο στατικό ύψος d) ύψος θλιβόμενης ζώνης ίσο με:

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A \quad (2.26)$$

όπου για ορθογωνική διατομή με πλάτος b και στατικό ύψος d:

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0.5\rho_v(1 + \delta_1) + \frac{N}{bdf_y} \quad (2.27)$$

Στην εξ.(2.27) ρ_1 , ρ_2 και ρ_v είναι αντίστοιχα (τα ανηγμένα στο bd) ποσοστά του οπλισμού του εφελκόμενου πέλματος, αυτού του θλιβόμενου πέλματος και του οπλισμού στον κορμό, ο οποίος θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένος στο τμήμα του ύψους μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού. Η απόσταση του εφελκόμενου ή του θλιβόμενου οπλισμού από το αντίστοιχο πέλαμα συμβολίζεται με d_1 , και ως δ_1 ορίζεται ο λόγος d_1/d . Η αξονική δύναμη N λαμβάνεται θετική αν είναι θλιπτική.

Αν το ποσοστό ρ_1 είναι πολύ μεγάλο και τα ρ_2 , ρ_v μικρά, ή αν η μέση θλιπτική τάση N/bd είναι υψηλή, η σχέση Μ-φ μπορεί να καμπυλωθεί προς τα κάτω όχι λόγω διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού αλλά λόγω εισόδου του σκυροδέματος στο έντονα μη-γραμμικό τμήμα του διαγράμματος σ-ε σε θλίψη. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει, αν η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας ξεπεράσει μία τιμή ϵ_c της τάξεως του $\epsilon_c \approx 1,8f_c/E_c \approx 0,9\epsilon_{co}$, και αντιστοιχεί σε καμπυλότητα “διαρροής”:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{0,9\epsilon_{co}}{\xi_y d} \quad (2.28)$$

όπου το (ανηγμένο στο d) ύψος της θλιβόμενης ζώνης δίνεται πάλι από την εξ.(2.26) με:

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v - \frac{N}{\epsilon_c E_s b d} \approx \rho_1 + \rho_2 + \rho_v - \frac{N}{1,8\alpha b d f_c}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5\rho_v(1 + \delta_1) \quad (2.29)$$

Αν η εξ.(2.28), σε συνδυασμό με τις (2.26), (2.29), δίνει μικρότερη τιμή της ϕ_y απ’ ό,τι ο συνδυασμός των (2.3), (2.26), (2.27), τότε καθοριστικό της “διαρροής” είναι το σκυρόδεμα.

Αν $N=0$, οι εξ.(2.27) και (2.29) δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα και η θέση του ουδέτερου άξονα παραμένει σταθερή μετά τη ρηγμάτωση και μέχρι τη “διαρροή” της διατομής.

Η ροπή διαρροής δίνεται από την:

$$\frac{M_y}{bd^3} = \phi_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0,5(1+\delta_1) - \frac{\xi_y}{3} \right) + \frac{E_s}{2} \left[(1-\xi_y)\rho_1 + (\xi_y - \delta_1)\rho_2 + \frac{\rho_v}{6}(1-\delta_1) \right] (1-\delta_1) \right\} \quad (2.30)$$

Σύγκριση του αποτελέσματος των εξ.(2.3) και εξ.(2.26)-(2.30) με πειραματικά αποτελέσματα πάνω από 1700 δοκών ή υποστυλωμάτων και πάνω από 150 τοιχωμάτων έδειξε ότι οι σχέσεις αυτές υποτιμούν ελαφρώς τη ροπή στη γωνία διγραμμικού διαγράμματος που προσαρμόζεται στην περιβάλλουσα των βρόχων δύναμης-μετακίνησης δ (ή ροπής-γωνίας στροφής χορδής). Ο λόγος είναι ότι η διαρροή κατά τις εξ.(2.3) και εξ.(2.26)-(2.30) αφορά τις ακραίες εφελκόμενες ράβδους ή τις ακραίες θλιβόμενες ίνες της ακραίας διατομής, ενώ η οριστική καμπύλωση του διαγράμματος δύναμης-μετακίνησης συμβαίνει αφού μπει για τα καλά στη διαρροή η άμεση γειτονία των ακραίων εφελκόμενων ράβδων ή των ακραίων θλιβόμενων ινών (περιλαμβανομένου ενός τμήματος του οπλισμού με ποσοστό ρ_v που είναι κατανεμημένος μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος). Η μέση τιμή ροπής και καμπυλότητας στη γωνία διγραμμικού διαγράμματος δύναμης-μετακίνησης είναι 1.035 φορές η τιμή της εξ.(2.30) για δοκούς ή υποστυλώματα, ή 1.045 φορές η τιμή αυτή για τοιχώματα. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να παίρνεται και ως διορθωτικός της θεωρητικής καμπυλότητας από τις εξ.(2.3) και εξ.(2.26)-(2.30).

Όταν η ένταση προέρχεται από σεισμό, το τμήμα της απόκρισης όπου το σκυρόδεμα είναι αρηγμάτωτο δεν παίζει σημαντικό ρόλο και η σχέση M-φ μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμική μέχρι και τη διαρροή, με ενεργό δυσκαμψία $(EI)_{ef} = M_y/\phi_y$. Από την εξ.(2.30) είναι προφανές ότι η τιμή αυτής της δυσκαμψίας είναι ανάλογη του bd^3 , αλλά και του ποσοστού του εφελκόμενου κυρίως οπλισμού ή του γινομένου της διατομής του εφελκόμενου χάλυβα, A_{s1} , επί d^2 .

2.2.2.1.3 Η τιμή της καμπυλότητας στην καμπτική αστοχία

Η αστοχία της διατομής θα συμβεί είτε με θραύση του εφελκόμενου οπλισμού, είτε με αστοχία του σκυροδέματος σε θλίψη (με εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας του).

Θραύση του εφελκόμενου χάλυβα πριν την εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας του σκυροδέματος, ε_{cu} , στις ακραίες θλιβόμενες ίνες συμβαίνει, αν: $\xi < \varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{su} + \varepsilon_{cu})$, που μεταφράζεται στην εξής συνθήκη για την ανηγμένη αξονική θλίψη:

$$v < \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \frac{\varepsilon_{su}(1+\delta_1) - \varepsilon_{cu}(1-\delta_1)}{(1-\delta_1)(\varepsilon_{su} + \varepsilon_{cu})} \quad (2.31)$$

Τότε η καμπυλότητα στη θραύση του εφελκόμενου χάλυβα δίνεται από την εξ.(2.4), σε

τιμή του (ανηγμένου στο d) ύψους θλιβόμενης ζώνης:

$$\xi_{su} = \frac{(1-\delta_1) \left(v + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left(\frac{1+\delta_1}{2} \right) \left(1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1-\delta_1) \left(1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left(1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} \quad (2.32)$$

Στις εξ.(2.31), (2.32) είναι $v=N/bdf_c$, $\omega_1=\rho_1 f_y/f_c$, $\omega_2=\rho_2 f_y/f_c$, $\omega_v=\rho_v f_y/f_c$, (με τα ρ_1 , ρ_2 , ρ_v ανηγμένα στο bd), $\delta_1=d_1/d$, ενώ ε_{co} συμβολίζει τη βράχυνση του σκυροδέματος στην κορυφή του διαγράμματος σ-ε και ε_{su} την (ομοιόμορφη) μήκυνση θραύσης του χάλυβα.

Η εξ.(2.32) προκύπτει από ισορροπία, με βάση τις υποθέσεις: α) επιπεδότητας διατομών, β) παραβολικού διαγράμματος σ-ε για το σκυρόδεμα μέχρι την κορυφή σε παραμόρφωση ε_{co} και οριζόντιου κατόπιν, γ) διαρροής του οπλισμού κορμού όπου αυτός ξεπερνά την παραμόρφωση διαρροής, $\varepsilon_y=f_y/E_s$, και μερική είσοδό του στην κράτυνση.

Εάν η εξ. (2.31) δεν ικανοποιείται, θα συμβεί αποφλοίωση και προσωρινή πτώση της καμπτικής αντίστασης της διατομής. Τότε χρειάζεται να υπολογιστεί:

- η ροπή αντοχής, M_{Rc} , της πλήρους και απερίσφικτης διατομής,
- η ροπή αντοχής του περισφιγμένου πυρήνα, M_{Ro} .

Η M_{Ro} υπολογίζεται με βάση την αντοχή, f_c^* , και την παραμόρφωση, ε_{co}^* , του περισφιγμένου σκυροδέματος και τις διαστάσεις πλάτους, b_o , στατικού ύψους d_o , και στατικού ύψους d_o' του θλιβόμενου οπλισμού στον περισφιγμένο πυρήνα.

(i) Εάν

$$M_{Ro} < 0.8 M_{Rc} \quad (2.33)$$

ως αστοχία της διατομής χαρακτηρίζεται η εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας, ε_{cu} , του απερίσφικτου σκυροδέματος της επικάλυψης και η καμπυλότητα αστοχίας υπολογίζεται με την εξ. (2.34).

$$\phi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu} d} \quad (2.34)$$

με τιμή του ξ_{cu} η οποία υπολογίζεται από τις πιο κάτω εξ. (2.35)-(2.38).

Η εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας, ε_{cu} , του απερίσφικτου σκυροδέματος της επικάλυψης θα συμβεί με διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, εφόσον $\xi < \varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y)$, δηλ. εάν :

$$\frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \frac{\varepsilon_{su}(1+\delta_1) - \varepsilon_{cu}(1-\delta_1)}{(1-\delta_1)(\varepsilon_{su} + \varepsilon_{cu})} < v \leq \omega_2 - \omega_1 - \frac{\delta_1}{1-\delta_1} \omega_v + \frac{\left(\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3} \right) + (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y) \frac{\omega_v}{1-\delta_1}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (2.35)$$

Εάν ικανοποιείται η εξ.(2.35), το ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην εξ.(2.34) ισούται με:

$$\xi_{cu} = \frac{(1-\delta_1)(v + \omega_1 - \omega_2) + (1+\delta_1)\omega_v}{(1-\delta_1)\left(1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}}\right) + 2\omega_v} \quad (2.36)$$

Η εξ.(2.36) βασίζεται στις ανωτέρω υποθέσεις α) έως δ), χωρίς όμως είσοδο των οπλισμών στην κράτυνση. Ισχύει εφόσον κατά την εξάντληση της ε_{cu} στο θλιβόμενο πέλμα έχει διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός, δηλ. αν ικανοποιείται η εξ.(2.35). Τότε, επειδή τόσο ο εφελκόμενος όσο και ο θλιβόμενος οπλισμός είναι σε διαρροή, συμβάλουν στην αξονική δύναμη N με $(A_{s2}-A_{s1})f_y=(\omega_2-\omega_1)bdf_c$. Αν το βάθος της θλιβόμενης ζώνης ισούται με ξd , ο “οπλισμός κορμού” που κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ ω_1 και ω_2 – δηλαδή σε μήκος $(1-\delta_1)d$ – συμβάλει στην αξονική θλίψη, N , με $[(\omega_v bdf_c)/(1-\delta_1)][(\xi-\delta_1)-(1-\xi)]=(\omega_v bdf_c)(2\xi-1-\delta_1)/(1-\delta_1)$. Τέλος, για παραβολικό διάγραμμα σ - ε μέχρι $\varepsilon=\varepsilon_{co}$ και για ορθογωνικό διάγραμμα για $\varepsilon_{co}\leq\varepsilon\leq\varepsilon_{cu}$, η θλιβόμενη ζώνη δίνει αξονική θλίψη: $\xi(bdf_c)(1-\varepsilon_{co}/3\varepsilon_{cu})$. Αρα:

$$v = \frac{N}{bdf_c} = \omega_2 - \omega_1 + \frac{\omega_v(2\xi - \delta_1)}{1 - \delta_1} + \left(1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}}\right)\xi$$

από την οποία προκύπτει η εξ.(2.36).

Εάν δεν ικανοποιείται η εξ.(2.36), και συγκεκριμένα αν είναι:

$$v > \omega_2 - \omega_1 - \frac{\delta_1}{1 - \delta_1}\omega_v + \frac{\left(\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}\right) + (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y)\frac{\omega_v}{1 - \delta_1}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (2.37)$$

το ξ_{cu} βρίσκεται ως η θετική ρίζα της εξίσωσης:

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} - \frac{\omega_v}{2(1-\delta_1)} \frac{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y)^2}{\varepsilon_{cu}\varepsilon_y}\right]\xi^2 + \left[\omega_2 + \omega_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} - v + \frac{\omega_v}{1-\delta_1} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} - \delta_1\right)\right]\xi - \left[\omega_1 + \frac{\omega_v}{2(1-\delta_1)}\right] \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y} = 0 \quad (2.38)$$

(ii) Εάν

$$M_{Ro} > 0.8 M_{Rc} \quad (2.39)$$

η αστοχία της διατομής αφορά στον περισφιγμένο πυρήνα. Η αστοχία αυτή μπορεί να συμβεί είτε με εξάντληση της ομοιόμορφης μήκυνσης αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού, οπότε η καμπυλότητα αστοχίας υπολογίζεται με εφαρμογή των εξ.(2.4), (2.31), (2.32) για τον περισφιγμένο πυρήνα (με βάση την αντοχή, f_c^* , και την παραμόρφωση, ε_{co}^* , του περισφιγμένου σκυροδέματος και τις διαστάσεις b_o , d_o , d_o' του περισφιγμένου πυρήνα), είτε με εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας του, ε_{cu}^* , του περισφιγμένου σκυροδέματος, και η

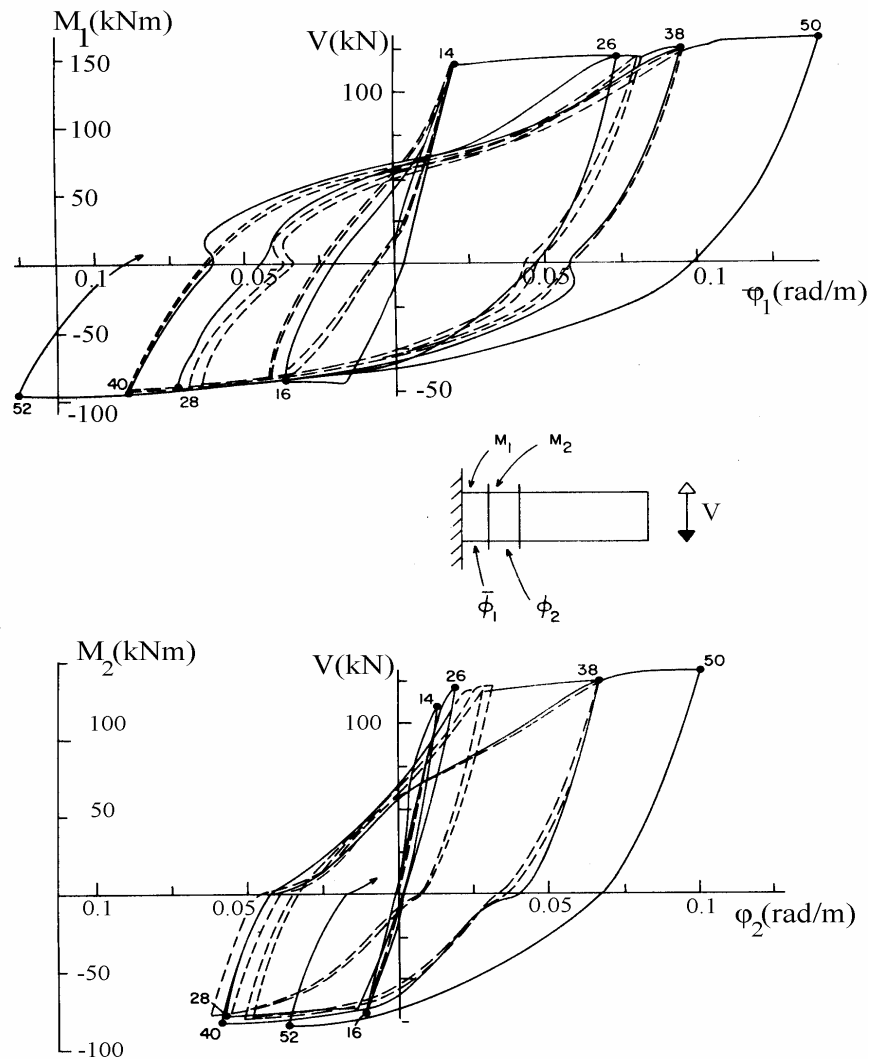
καμπυλότητα αστοχίας υπολογίζεται με εφαρμογή των εξ. (2.34)-(2.38) για τον περισφιγμένο πυρήνα (με βάση την αντοχή, f_c^* , και την παραμόρφωση, ϵ_{co}^* , του περισφιγμένου σκυροδέματος και τις διαστάσεις b_o , d_o , d_o' του περισφιγμένου πυρήνα).

Οι τιμές της ροπής που αντιστοιχούν στις ανωτέρω χαρακτηριστικές καμπυλότητες (ροπή αντοχής, M_{Rc} , της πλήρους και απερίσφικτης διατομής, και η αντίστοιχη, M_{Ro} , του περισφιγμένου πυρήνα) υπολογίζονται με ικανοποιητική προσέγγιση ως μονοαξονικές ροπές αντοχής διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας τα σχετικά βοηθήματα διαστασιολόγησης (αναλυτικές σχέσεις, διαγράμματα αλληλεπίδρασης συμμετρικά οπλισμένων διατομών σε μονοαξονική κάμψη, μ - ν , πίνακες, προγράμματα H/Y). Όμως στον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι μέσες ή οι πραγματικές τιμές των αντοχών των υλικών αντί των τιμών σχεδιασμού: Αντί της $f_{yd}=f_y/\gamma_s$, η f_{ym} ή η f_y για το χάλυβα. Αντί της $f_{cd}=f_{ck}/\gamma_c$, η f_{cm} ή η f_c για το σκυρόδεμα πριν την αποφλοίωση (δηλαδή για τη ροπή που αντιστοιχεί στην καμπυλότητα αποφλοίωσης φ_{cu} κατά τις εξ.(2.34)-(2.38) αλλά και στη θραύση του χάλυβα σε καμπυλότητα φ_{su} κατά τις εξ.(2.4), (2.31), (2.32) πριν την αποφλοίωση) και η f_{cm}^* ή η f_c^* για τον περισφιγμένο πυρήνα (για τη ροπή αστοχίας σε καμπυλότητα φ_{su}^* ή φ_{cu}^* κατά τις τροποποιημένες εξ.(2.4), (2.31), ή (2.34)-(2.38) αντίστοιχα). Αν χρησιμοποιούνται βοηθήματα που έχουν ενσωματωμένο το γνωστό μειωτικό συντελεστή 0,85 στην τιμή της f_{cd} , ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να αναιρεθεί, με χρήση της τιμής $f_c/0,85$ ως f_{cd} . Τέλος, για τον υπολογισμό από τα βοηθήματα αυτά της ροπής που αντιστοιχεί στην καμπυλότητα φ_{su} ή φ_{su}^* όπου θραύεται ο εφελκόμενος οπλισμός, θα πρέπει ως διατομή εφελκόμενου οπλισμού να ληφθεί το $A_{s1}f_t/f_y$ (δηλ. το ω_1 να πολλαπλασιασθεί με f_t/f_y).

Για διδακτικούς λόγους αυτές οι ροπές υπολογίζονται εδώ ακριβέστερα, με τις βασικές αρχές και υποθέσεις της κάμψης. Στην αρχή υπολογίζεται η M_{Rc} , και κατ' αντιστοιχία η M_{Ro} .

Η ροπή των οπλισμών ω_1 , ω_2 και ω_v ως προς το κέντρο της διατομής (που απέχει από τους ω_1 και ω_2 απόσταση $0.5h-d_1=(d-d_1)/2$) ισούται με $(\omega_1+\omega_2)bd^2f_c(1-\delta_1)/2$. Εφόσον η ακραία θλιβόμενη ίνα έχει παραμόρφωση ϵ_{cu} , ο οπλισμός κορμού, που κατανέμεται σε μηχανικό ποσοστό ω_v μεταξύ ω_1 και ω_2 , δίνει ως προς το κέντρο της διατομής ροπή ίση με $\omega_vbd^2f_c/(1-\delta_1)[(\xi-\delta_1)(1-\xi)-(\xi f_y/E_s\epsilon_{cu})^2/3]$. Τέλος, για παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα σ - ϵ , οι τάσεις σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη δίνουν ροπή ως προς το κέντρο της διατομής: $bd^2f_c\xi[(1-\xi)/2-(1/2-\xi+\xi\epsilon_{co}/4\epsilon_{cu})(\epsilon_{co}/3\epsilon_{cu})]$. Ετσι, τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει ίση με:

$$M_{Rc} = bd^2f_c \left\{ \frac{(1-\delta_1)(\omega_1 + \omega_2)}{2} + \frac{\omega_v}{1-\delta_1} \left[(\xi - \delta_1)(1-\xi) - \frac{1}{3} \left(\frac{\xi f_y}{E_s \epsilon_{cu}} \right)^2 \right] + \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\epsilon_{co}}{3\epsilon_{cu}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\epsilon_{co}}{4\epsilon_{cu}} \xi \right) \right] \right\}$$



Σχήμα 2.15 Πειραματικές καμπύλες M - (μέσης) ϕ σε ανακυκλιζόμενη κάμψη χωρίς επιρροή της ολίσθησης: (α) στο ακραίο τμήμα του μέλους, (β) στο αμέσως γειτονικό (από Ma et al, 1976).

2.2.2.2 Η επιρροή της ανακύκλισης της κάμψης

Τα ανωτέρω αφορούν τη μονοτονική φόρτιση. Ας θεωρήσουμε τώρα την ανακυκλιζόμενη κάμψη με: α) αποφόρτιση από κάποια τιμή της καμπυλότητας ϕ_r μετά τη διαρροή, β) αντιστροφή της φοράς της φόρτισης και φόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση μέχρι περίπου μέγιστη καμπυλότητα $-\phi_r$, γ) αποφόρτιση και επαναφόρτιση προς την αρχική διεύθυνση της φόρτισης μέχρι περίπου την προηγούμενη μέγιστη τιμή καμπυλότητας ϕ_r , ή πέρα απ' αυτήν, δ) νέα αποφόρτιση κ.ο.κ. Όπως δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.15 για δοκό με περισσότερο οπλισμό στο πάνω πέλμα (θετικές ροπές) παρά στο κάτω και του Σχήματος 2.16 για συμμετρικά οπλισμένο μέλος, η συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη

M-φ στην αποφόρτιση-(επανα)φόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση παίρνει σχήμα ανάποδου S. Σε ασύμμετρα οπλισμένες διατομές ($\rho_1 > \rho_2$, $\omega_1 > \omega_2$), όπως αυτή του Σχήματος 2.15, αυτό συμβαίνει μόνον όταν η αποφόρτιση γίνεται από την πλευρά στην οποία το πέγμα με το λιγότερο οπλισμό (ρ_2) ήταν σε εφελκυσμό προς την κατεύθυνση όπου αυτό θα αναπτύξει θλίψη. Και τούτο διότι, όντας λιγότερος, ο οπλισμός αυτός διαρρέει γρήγορα σε θλίψη, οπότε η διαμπερής ρωγμή κλείνει στο πέγμα αυτό. Αντίθετα, όταν στην ασύμμετρα οπλισμένη διατομή το πέγμα με τον περισσότερο οπλισμό, ρ_1 , (το πάνω στο Σχήμα 2.15) οδεύει από τον εφελκυσμό προς τη θλίψη, ο οπλισμός του απέναντι (δηλαδή του κάτω) πέγματος δεν είναι αρκετός για να προκαλέσει διαρροή σε θλίψη του (πάνω) οπλισμού με ποσοστό ρ_1 και έτσι το κλείσιμο της ρωγμής καθυστερεί. Όπως δείχνει και το Σχήμα 2.6, στο πέγμα με τον περισσότερο οπλισμό δεν αναπτύσσονται κατά την ανακύκλιση σημαντικές θλιπτικές παραμορφώσεις και το σκυρόδεμα δεν καταπονείται σημαντικά, καθότι η διαρροή του οπλισμού αυτού σε θλίψη αρκεί για να αναλάβει το σύνολο της θλιπτικής δύναμης του πέγματος. Έτσι τελικά στις ασύμμετρα οπλισμένες διατομές η καμπύλη αποφόρτισης-επαναφόρτισης έχει σχήμα ανάποδου S μόνο κατά την επαναφόρτιση προς την πλευρά της μεγαλύτερης αντοχής. Η επαναφόρτιση προς την κατεύθυνση της μικρότερης αντοχής γίνεται πάντα με τη μικρότερη κλίση που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του ζεύγους των οπλισμών και η οποία είναι ίδια με την αρχική κλίση της επαναφόρτισης προς την πλευρά της μεγαλύτερης αντοχής, πριν δηλαδή την αύξηση της δυσκαμψίας. Σε συμμετρικά οπλισμένες διατομές, όπως αυτές των υποστυλωμάτων, ο κλάδος της επαναφόρτισης προς την αντίθετη κατεύθυνση εμφανίζει κάποια αύξηση της δυσκαμψίας και για τις δύο φορές (πρόσημα) της φόρτισης (Σχήμα 2.16). Τυχόν θλιπτική αξονική δύναμη επιταχύνει το κλείσιμο της ρωγμής κατά την επαναφόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση και περιορίζει το τμήμα του κλάδου M-φ που χαρακτηρίζεται από μικρότερη κλίση (δυσκαμψία).

- 3) Με την πλήρη αντιστροφή της ροπής η καμπύλη M-φ τείνει να συμπίπτει με την αντίστοιχη καμπύλη για μονοτονική φόρτιση στη διεύθυνση αυτή. Αν είχε προηγηθεί φόρτιση και αποφόρτιση από την ίδια κατεύθυνση, η επαναφόρτιση τείνει να συναντήσει τη μονοτονική καμπύλη περίπου στο σημείο της μέγιστης προγενέστερης καμπυλότητας στη διεύθυνση αυτή. Προκύπτει έτσι ένας σχεδόν κλειστός βρόχος υστέρησης. Το σιμοειδές σχήμα του κλάδου αποφόρτισης-επαναφόρτισης στη μία ή και στις δύο κατευθύνσεις της φόρτισης, δίνει βρόχους με στένωση στο μέσο τους.
- 4) Αν η ανηγμένη αξονική θλίψη είναι χαμηλή και το μέλος διαθέτει ικανοποιητική περίσφιγξη, επανάληψη του πλήρους κύκλου παραμόρφωσης μία ή περισσότερες φορές

με σταθερές μέγιστες τιμές καμπυλότητας στη θετική και στην αρνητική κατεύθυνση οδηγεί σε περίπου σταθερό βρόχο, χωρίς ουσιώδη μείωση της μέγιστης ροπής, θετικής ή αρνητικής, από κύκλο σε κύκλο. Αντίθετα, η σταδιακή αποσύνθεση του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης, όταν η ανηγμένη αξονική θλίψη είναι υψηλή ή όταν δεν υπάρχει ικανοποιητική περίσφιγξη, οδηγεί σε σταδιακή συρρίκνωση των βρόχων για κύκλους σταθερού εύρους παραμόρφωσης.

2.2.2.3 Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων

Στην ενότητα 1.2 του κεφαλαίου 1 είδαμε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς q , που διαιρεί τις σεισμικές δυνάμεις που προκαλεί ο σεισμός σχεδιασμού στο ελαστικό δομικό σύστημα για να προκύψουν οι δυνάμεις με τις οποίες θα σχεδιασθεί τελικά το δομικό σύστημα, συνδέεται με το συνολικό δείκτη πλαστιμότητας μ_δ (οριζοντίων) μετακινήσεων, δ , του δομικού συστήματος (εξ.(1.1), (1.2)). Ο δείκτης μ_δ ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής οριζόντιας μετακίνησης του δομικού συστήματος υπό το σεισμό σχεδιασμού, προς την αντίστοιχη μετακίνηση στη διαρροή του συστήματος. Λόγω αυτής της σημασίας του δείκτη πλαστιμότητας συνολικών μετακινήσεων, οι ανελαστικές παραμορφώσεις των μελών (συνήθως γωνίες στροφής χορδής στα άκρα, θ) εκφράζονται ανηγμένες στην αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης στη διαρροή (θ_y για την θ), δηλαδή ως δείκτης πλαστιμότητας παραμορφώσεων μελών (π.χ. $\mu_\theta = \theta/\theta_y$). Η πρακτική αυτή επεκτείνεται και στις καμπυλότητες διατομών καμπτομένων μελών, για τις οποίες ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ορίζεται ως ο λόγος $\mu_\phi = \phi/\phi_y$.

Για όλους τους δείκτες πλαστιμότητας υπάρχει πάντοτε μία απαιτούμενη και μία διαθέσιμη τιμή. Η πρώτη προκύπτει από τη μέγιστη τιμή του αντίστοιχου μεγέθους (δ , θ ή ϕ) που προκαλεί ο σεισμός. Η δεύτερη προκύπτει από την τιμή του μεγέθους αυτού στην αστοχία του συστήματος (για τη δ), του μέλους (για τη θ), ή της διατομής (για τη ϕ).

Η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_ϕ , ορίζεται ως:

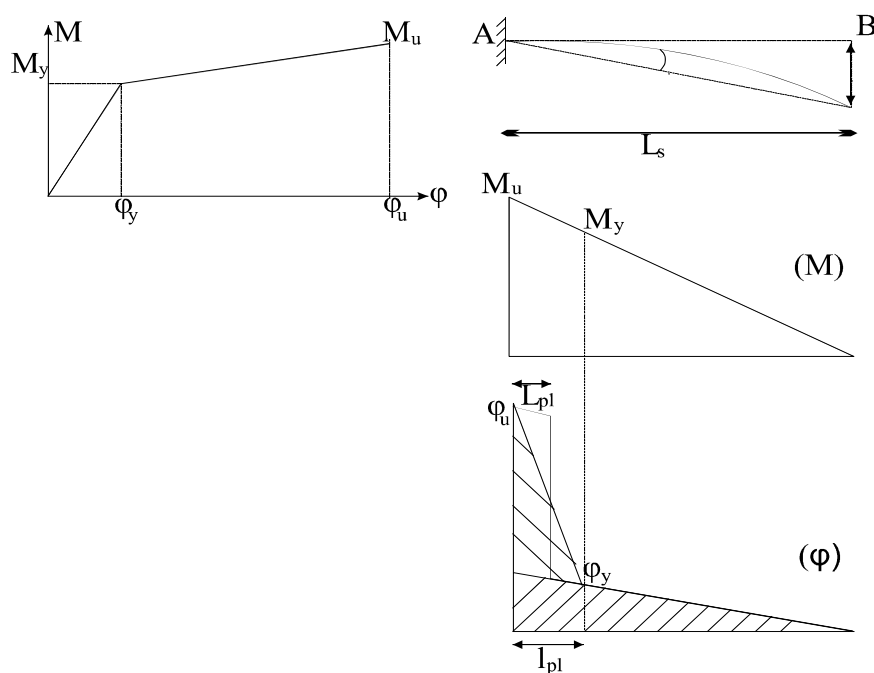
$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2.40)$$

Η ϕ_y είναι η ελάχιστη από τις τιμές της καμπυλότητας διαρροής που προκύπτουν από τις εξ.(2.3) και (2.28). Η ϕ_u είναι η ελάχιστη από τις καμπυλότητες αστοχίας που δίνουν:

- η εξ.(2.4) πριν την αποφλοίωση,
- η εξ.(2.34) εφαρμοζόμενη για την πλήρη απερίσφιγκτη διατομή αν ισχύει η εξ.(2.33) ή για τον περισφιγμένο πυρήνα μετά την αποφλοίωση αν ισχύει η (2.39), ή

- η εξ.(2.4) εφαρμοζόμενη μετά την αποφλοιώση στον περισφιγμένο πυρήνα, εφόσον ισχύει η εξ.(2.39).

Η σπουδαιότητα του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων μέλους, μ_θ , έγκειται στο ότι για (υποτιθέμενα) γνωστή κατανομή της ανελαστικότητας στο δομικό σύστημα η απαιτούμενη τιμή του μπορεί να προκύψει από αυτήν του δείκτη συνολικής μετακίνησης του δομήματος, μ_δ (επομένως και από την τιμή του q). Περαιτέρω η σημασία του μ_θ οφείλεται κυρίως στο ότι, υπό ορισμένες εξιδανικευμένες υποθέσεις, η απαιτούμενη τιμή του στην ακραία διατομή του μήκους διάτμησης L_s , μπορεί να συνδεθεί με αυτήν του αντίστοιχου μ_θ . Έτσι η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_ϕ , που προκύπτει από την εξ.(2.40) με βάση τις ανωτέρω σχέσεις εξ.(2.3), (2.4), (2.26)-(2.29), (2.31)-(2.38), μπορεί κατ' αρχήν να μεταφρασθεί σε διαθέσιμη τιμή του μ_θ για το μήκος διάτμησης και του μ_δ για το δομικό σύστημα. Επειδή, όμως, τμήμα μόνο των παραμορφώσεων θ του μήκους διάτμησης οφείλεται στις καμπτικές παραμορφώσεις που εκφράζει η καμπυλότητα και η μ_ϕ , η ποσοτική χρησιμότητα μιας τέτοιας υπολογιστικής διαδικασίας είναι πολύ περιορισμένη. Γι' αυτό η σημασία του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων έγκειται κυρίως στη δυνατότητά του να εκφράζει, ποιοτικά τουλάχιστον, την επιρροή των διαφόρων παραμέτρων και παραγόντων στην ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής. Βεβαίως αυτή η ικανότητα παραμόρφωσης εκφράζεται σχεδόν εξίσου καλά μέσω της καμπυλότητας αστοχίας ϕ_u (κατά την εξ.(2.4) και τις (2.4) και (2.34) τροποποιημένες για τον περισφιγμένο πυρήνα). Σ' αυτό το θέμα είναι αφιερωμένη η επόμενη υποενότητα.



Σχήμα 2.16. Μήκος πλαστικοποίησης και “μήκος πλαστικής άρθρωσης” στο μήκος διάτμησης

2.2.2.4 Μήκος πλαστικής άρθρωσης

Η σύνδεση της καμπυλότητας ϕ στο ένα άκρο A του μήκους διάτμησης L_s με το βέλος κάμψης δ στο άλλο B, (ή ισοδύναμα με τη γωνία στροφής χορδής $\theta = \delta/L_s$ στο άκρο A), γίνεται συνήθως μέσω του “μήκους πλαστικής άρθρωσης” στο άκρο A, L_{pl} . Αυτό δεν είναι το μήκος στο οποίο εκτείνεται η πλαστικοποίηση του εφελκυσμένου οπλισμού και του μέλους κοντά στο A (βλ. εξ.(2.1) στην υποενότητα 2.1.1.3) αλλά κάποιο μικρότερο. Το μήκος πλαστικής άρθρωσης ορίζεται θεωρώντας ότι κατά μήκος του L_{pl} το πλαστικό τμήμα της καμπυλότητας, $\phi - \phi_y$, παραμένει σταθερό και ίσο με την τιμή του στο άκρο A. Αυτό σημαίνει ότι το σχεδόν τριγωνικό διάγραμμα μεταβολής του πλαστικού τμήματος της καμπυλότητας στο πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους αντικαθίσταται με ορθογωνικό ίσου εμβαδού, $(\phi - \phi_y)L_{pl}$ (Σχήμα 2.17). Δηλαδή το πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους προσομοιώνεται με μία άρθρωση στο μέσο του μήκους πλαστικής άρθρωσης L_{pl} , όπου αναπτύσσεται πλαστική γωνία στροφής $\theta_{pl} = (\phi - \phi_y)L_{pl}$. Αυτή η γωνία στροφής προκαλεί βέλος στο άκρο B του μήκους διάτμησης ίσο με $\theta_{pl}(L_s - 0,5L_{pl})$, το οποίο προστίθεται στο ελαστικό τμήμα του βέλους, το οποίο είναι περίπου ίσο με $\phi_y L_s^2/3$. Έτσι τελικά η γωνία στροφής χορδής στο A, $\theta_A = \delta_B/L_s$, είναι:

$$\theta = \phi_y \frac{L_s}{3} + (\phi - \phi_y)L_{pl} \left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s}\right) = \phi L_{pl} \left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s}\right) + \phi_y \frac{L_s}{3} \left(1 - \frac{3L_{pl}}{L_s} \left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s}\right)\right) \quad (2.41)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στη διαρροή είναι $\theta_y = \phi_y L_s/3$, προκύπτει η εξής σχέση μεταξύ $\mu_\theta = \theta/\theta_y$ και $\mu_\phi = \phi/\phi_y$:

$$\mu_\theta = 1 + (\mu_\phi - 1) \frac{3L_{pl}}{L_s} \left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s}\right) \approx \frac{3L_{pl}}{L_s} \mu_\phi \quad (2.42)$$

Η ανωτέρω θεώρηση ισχύει (έστω κατά προσέγγιση) μόνο για το τμήμα του βέλους κάμψης, δ , και της γωνίας στροφής χορδής, θ , που οφείλεται αποκλειστικά σε κάμψη. Επιπλέον, εφαρμόζεται για σχετικά μεγάλες τιμές της πλαστικής γωνίας στροφής και της μέγιστης καμπυλότητας ϕ και συγκεκριμένα κοντά στην καμπτική αστοχία στο άκρο A, δηλαδή για $\phi \approx \phi_u$. Έτσι οι εξ.(2.41), (2.42) εφαρμόζονται συνήθως για τις τιμές αστοχίας (ή διαθέσιμες τιμές) των θ , ϕ , μ_θ , μ_ϕ , δηλαδή για τις θ_u , ϕ_u , $\mu_{\theta u}$, $\mu_{\phi u}$. Αυτό σημαίνει ότι αν είναι γνωστό το L_{pl} , οι τιμές της ϕ_u της προηγούμενης υποενότητας μεταφράζονται σε διαθέσιμες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων ή γωνιών στροφής χορδής του μήκους διάτμησης (δηλαδή του μέλους).

Οι πραγματικές γωνίες στροφής χορδής στο άκρο B του μήκους διάτμησης δεν οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην κάμψη, αλλά και στη διάτμηση και στην ολίσθηση των ράβδων

στη ζώνη αγκύρωσης. Επί παραδείγματι, για την ίδια τιμή της φ στο άκρο A, η λοξή ρηγμάτωση, ιδιαίτερα αυτή που συμβαίνει μέσα στην ίδια την πλαστική άρθρωση, αυξάνει την τιμή της θ , επειδή, μεταξύ άλλων, αυξάνει τις τάσεις του εφελκόμενου οπλισμού και το μήκος στο οποίο αυτός διαρρέει, πέραν απ' ό,τι προβλέπει η κάμψη (πρόκειται για το γνωστό “μήκος μετάθεσης”, a_l , του διαγράμματος ροπών, οι τιμές του οποίου κυμαίνονται μεταξύ 0,5d και 0,9d). Επίσης, για δεδομένη τιμή της φ στο A, η ολίσθηση των ράβδων ως προς το σκυρόδεμα, τόσο μέσα στο ίδιο το μήκος διάτμησης όσο και στη ζώνη αγκύρωσής τους πέραν από το άκρο A, αυξάνει την τιμή της θ . Επί παραδείγματι, όσο καλύτερη είναι η συνάφεια κατά μήκος των διαμήκων ράβδων, τόσο ταχύτερα μειώνεται με την απόσταση από το άκρο A η τάση σ' αυτές και επομένως τόσο μικρότερη είναι η τιμή των θ και μ_θ για δεδομένη τιμή των φ και μ_φ . Έτσι το “μήκος πλαστικής άρθρωσης” δεν ισούται με το μισό του μήκους πλαστικοποίησης l_{pl} της εξ.(2.1), όπως θα έδειχνε η θεώρηση μόνον της κάμψης κατά το Σχήμα 2.17.

Το “μήκος πλαστικής άρθρωσης” έχει περισσότερο μαθηματικό νόημα παρά φυσικό. Είναι εκείνο το πλασματικό μήκος που επιτρέπει την εκτίμηση της πραγματικής τιμής της γωνίας στροφής χορδής στο άκρο, θ , μέσω της εξ.(2.41), από την τιμή της καμπυλότητας φ στην ακραία διατομή. Δεδομένου δε ότι στο οπλισμένο σκυρόδεμα η καμπυλότητα φ είναι περισσότερο ένα λογιστικό μέγεθος παρά ένα πραγματικό, το L_{pl} , ως μαθηματική ποσότητα, εξαρτάται από τον τρόπο υπολογισμού της φ στο άκρο του μέλους. Επειδή, τέλος, οι εξ.(2.41), (2.42) εφαρμόζονται κατά κανόνα στην αστοχία του μέλους, δηλαδή για $\theta=\theta_u$, και $\varphi=\varphi_u$ και επιπλέον ο τρόπος υπολογισμού της φ_u δεν είναι μονοσήμαντος (όπως είδαμε στην Υποενότητα 2.2.2.1.3, η τιμή της φ_u εξαρτάται κυρίως από το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για το περισφιγμένο σκυρόδεμα και ιδίως για την παραμόρφωση αστοχίας του, ε_{cu}^*) το L_{pl} ως μαθηματικό μέγεθος εξαρτάται από τον τρόπο υπολογισμού της φ_u και πρέπει να δίνεται πάντοτε με αναφορά σ' αυτόν.

Έχει προταθεί πληθώρα εμπειρικών σχέσεων για το L_{pl} . Όμως καμία απ' αυτές δεν ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στο σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με κατασκευαστική διαμόρφωση και λεπτομέρειες όπλισης κατά τις σύγχρονες αντιλήψεις για αντισεισμικά στοιχεία, συχνά εφαρμόζεται η σχέση των Paulay και Priestley (1992):

$$L_{pl,PP} = 0,08L_s + 0,022a_{sl}d_b f_y \quad (\text{MPa}) \quad (2.43)$$

όπου d_b η διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού (σε ίδιες μονάδες όπως τα L_s , L_{pl}). Ο

δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επιρροή στο βέλος στο άκρο B της ολίσθησης των ράβδων μέσα στη ζώνη αγκύρωσης τους πέραν από το άκρο A και ιδιαίτερα της ολίσθησης στο τμήμα της ράβδου στο οποίο η διαρροή επεκτείνεται και μέσα στην αγκύρωση. Το τμήμα αυτό ονομάζεται τμήμα “διείσδυσης της διαρροής” μέσα στον κόμβο όπου αγκυρώνεται ο διαμήκης οπλισμός.

Η εξ.(2.43) αναπτύχθηκε για χρήση μαζί με το προσομοίωμα Mander et al (1988a) για την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, f_c^* , και την αντίστοιχη παραμόρφωση, ϵ_{co}^* , δηλαδή με τις εξ.(2.7), (2.8), καθώς και με την τροποποίηση των Paulay and Priestley (1992) στην εξ.(2.22) για την παραμόρφωση αστοχίας, ϵ_{cu}^* , του περισφιγμένου σκυροδέματος (με την προσθήκη του συντελεστή 1.4 στο 2^ο όρο). Αν στην εξ.(2.41) χρησιμοποιηθεί, αφενός μεν η τιμή της ϕ_u που προκύπτει με αυτές τις προϋποθέσεις, αφετέρου δε η τιμή του L_{pl} από την εξ.(2.43), ο λόγος της πειραματικής τιμής της στροφής χορδής στον αστοχία προς την πρόβλεψη για περίπου 290 μονοτονικά πειράματα σε δοκούς, υποστυλώματα ή τοιχώματα έχει διάμεσο (τιμή με πιθανότητα υπέρβασης ή υποσκελισμού ακριβώς 50%) 1.065 και συντελεστή μεταβλητότητας (λόγο τυπικής απόκλισης προς μέση τιμή) 116%. Οι αντίστοιχες τιμές για περίπου 900 πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης είναι 0.52 (σοβαρή υπερίμηση της πειραματικής τιμής) και 81.5%.

Αν μαζί με την τιμή του L_{pl} από την εξ.(2.43) χρησιμοποιηθεί στην εξ.(2.41) η τιμή της ϕ_u που προκύπτει με εφαρμογή του προσομοιώματος περίσφιγξης κατά Model Code 90, εξ.(2.20), (2.21), (2.25), τότε η υποτίμηση της θ_u είναι μεγάλη: Ο λόγος πειραματικής προς προβλεπόμενη τιμή της θ_u έχει διάμεσο και συντελεστή μεταβλητότητας 3.38 και 72.5% στα περίπου 290 μονοτονικά πειράματα και 1.32 ή 65.9% στα περίπου 900 πειράματα με ανακυκλιζόμενη ένταση. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική μέση ακρίβεια (δηλαδή τιμή διαμέσου του λόγου πειραματικής προς προβλεπόμενη τιμή του θ_u κοντά στο 1.0), χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν στην εξ.(2.41) οι εξής τιμές του L_{pl} :

- Για δοκούς, υποστυλώματα ή τοιχώματα με ορθογωνικό κορμό με αντισεισμικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και με ϕ_u από προσομοίωμα περίσφιγξης κατά Model Code 90 (εξ. (2.20), (2.21), (2.25)), λαμβάνοντας στην εξ.(2.4) $\epsilon_{su}=6\%$ για χάλυβα τύπου C, ή ίσο με την ελάχιστη επιτρεπτή χαρακτηριστική τιμή για χάλυβα τύπου A ή B:

$$L_{pl,CEB} = 0.1L_s + 0.17h + 0.24 \frac{d_{bL} f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \quad (2.44)$$

- Για υποστυλώματα ή τοιχώματα με ορθογωνικό κορμό χωρίς αντισεισμικές

κατασκευαστικές λεπτομέρειες (δηλαδή με αραιούς και όχι καλά κλειστούς συνδετήρες) υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και με φ_u από προσομοίωμα περίσφιγξης κατά Model Code 90 (εξ. (2.20), (2.21), (2.25)) και με τις υποθέσεις της προηγούμενης παραγράφου για τις τιμές του ε_{su} στην εξ.(2.4):

$$L_{pl,CEB,cy,old} = 0.2L_s + a_{sl} \frac{f_y \text{ (MPa)}}{10} d_b \quad (2.45)$$

Στις εξ.(2.43) έως (2.45), όπως και στις παρακάτω (2.46), (2.47), (2.48), L_s είναι το μήκος διάτμησης, h το ύψος της διατομής, d_b και f_y η διάμετρος και η τάση διαρροής των διαμήκων ράβδων του εφελκόμενου πέλματος, και a_{sl} συντελεστής που παίρνει την τιμή $a_{sl}=1$ αν μπορεί να υπάρξει ολίσθηση των οπλισμών από τη ζώνη αγκύρωσής τους πέρα της ακραίας διατομής (όπως γενικά συμβαίνει στις πραγματικές κατασκευές στο σεισμό), ή $a_{sl}=0$ αν δεν μπορεί να υπάρξει τέτοια ολίσθηση (π.χ. αν η πλαστική άρθρωση συμβαίνει στο μέσο του ανοίγματος μέλους που φορτίζεται εκεί από συγκεντρωμένο εγκάρσιο φορτίο, όπως δηλαδή σε ορισμένα πειράματα).

Παρά την ανεκτή μέση συμφωνία της με τα πειραματικά δεδομένα, η εξ.(2.44) δίνει μεγάλη διασπορά προβλέψεων ως προς αυτά και – το χειρότερο – προβλέπει συστηματικά πολύ υψηλές τιμές του θ_u σε πολλές περιπτώσεις που οι πραγματικές είναι χαμηλές. Η δε εξ.(2.45), παρά το ότι δίνει μικρότερη διασπορά προβλέψεων ως προς τις πειραματικές τιμές, υποτιμά την πειραματική τιμή κατά 10% κατά μέσο όρο.

Οι εξ.(2.44), (2.45) ισχύουν μόνο για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Δεν είναι εύκολη η εύρεση σχέσης για το L_{pl} που να δίνει ικανοποιητική προσαρμογή με τα πειραματικά αποτελέσματα για μονοτονική φόρτιση, με χρήση της τιμής της φ_u που προκύπτει από το προσομοίωμα περίσφιγξης κατά Model Code 90 (εξ. (2.20), (2.21), (2.25)).

Αν η τιμή της φ_u εκτιμηθεί με βάση το προσομοίωμα των εξ.(2.6), (2.8) για τα f_c^* , ε_{co}^* (που δίνει παρόμοιες τιμές με αυτές που προκύπτουν από το προσομοίωμα Mander et al, 1988a, εξ.(2.7)), και τις εξ.(2.23), (2.24) για την παραμόρφωση αστοχίας υπό μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση, αντίστοιχα, τότε καλή μέση συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιηθούν στην εξ.(2.41) οι παρακάτω τιμές: του “μήκους πλαστικής άρθρωσης” (Fardis and Biskinis, 2003):

– Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση δοκών, υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων με ορθογωνικό κορμό και αντισεισμικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, για φ_u με προσομοίωμα περίσφιγξης κατά εξ.(2.6), (2.8), (2.24), και με τις υποθέσεις για την τιμή του ε_{su} που

αναφέρθηκαν σε σχέση με την εξ.(2.44):

$$L_{pl,cy} = \frac{L_s}{30} + 0.2h + a_{sl} \frac{0.11d_{bL}f_y \text{ (MPa)}}{\sqrt{f_c \text{ (MPa)}}} \quad (2.46)$$

- Για μονοτονική φόρτιση δοκών, υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων, με ή χωρίς αντισεισμικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, για ϕ_u που υπολογίζεται με το προσομοίωμα περίσφιξης των εξ.(2.6), (2.8), (2.23):

$$L_{pl,mo,h} = 0.8h + a_{sl} \frac{f_y \text{ (MPa)}}{32} d_b \quad (2.47)$$

Επισημαίνεται ότι - για εκλογίκευση της εξ.(2.41) και βελτίωση της συμφωνίας με τα πειραματικά αποτελέσματα - αντί του όρου $\phi_y L_s/3$ στην εξ.(2.41) χρησιμοποιείται η πλήρης τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_y , η οποία, όπως αναφέρεται στην υποενότητα 2.3.2, δίνεται από τις σχέσεις (Fardis and Biskinis 2003):

- Για δοκούς ή υποστυλώματα:

$$\theta_y = (1.035\phi_y) \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.00135 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + a_{sl} \frac{\varepsilon_y}{d - d_1} \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad (2.48a)$$

- Για τοιχώματα:

$$\theta_y = (1.045\phi_y) \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.002 \left(1 - 0.135 \frac{L_s}{h} \right) + a_{sl} \frac{\varepsilon_y}{d - d_1} \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}} \quad (2.48b)$$

Εναλλακτικά:

- Για δοκούς ή υποστυλώματα:

$$\theta_y = (1.035\phi_y) \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + a_{sl} \frac{0.13\phi_y d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (2.49a)$$

- Για τοιχώματα:

$$\theta_y = (1.045\phi_y) \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.002 \left(1 - 0.125 \frac{L_s}{h} \right) + a_{sl} \frac{0.13\phi_y d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (2.49b)$$

Η καμπυλότητα διαρροής ϕ_y στις εξ.(2.48), (2.49) υπολογίζεται με βάση τις εξ.(2.4) και (2.26)-(2.29), ο δε διορθωτικός συντελεστής 1.035 ή 1.045 αιτιολογείται στην προ-τελευταία παράγραφο της Υποενότητας 2.2.2.1.2. Ο συντελεστής a_{VZ} που πολλαπλασιάζει το d στον 1°

όρο παίρνει την τιμή 0 αν η τέμνουσα στην καμπτική διαρροή, $V_{My}=M_y/L_s$ είναι μικρότερη της τέμνουσας που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση, V_{cr} . Η τιμή της V_{cr} μπορεί να ληφθεί ίση με την τέμνουσα αντοχής χωρίς οπλισμό διάτμησης, V_{Rc} . Η τιμή της V_{Rc} μπορεί να υπολογίζεται κατά τον Ευρωκώδικα 2, δηλαδή από την εξ.(3.5) του Κεφ. 3 (βλ. και υποσημείωση (10) στον Πιν. 4.3, Κεφ.4), με επιμέρους συντελεστή $\gamma_c=1$. Αν $V_{cr}=V_{Rc}<V_{My}$ τότε $a_v = 1$. Ο όρος a_{vz} είναι το μήκος μετάθεσης a_i για διατμητική ρηγμάτωση κατά 45° και εκφράζει την επιρροή της επέκτασης των δυνάμεων του εφελκόμενου πέλματος κατά a_i στις καμπτικές παραμορφώσεις του μέλους. Ο 2^{ος} όρος στις εξ. (2.49) εκφράζει την επιρροή της διατμητικής παραμόρφωσης. Ο τελευταίος όρος στις εξ. (2.49) εκφράζει την επιρροή της ολίσθησης των εφελκόμενων ράβδων από την αγκύρωσή τους πέραν της διατομής στήριξης, ως συγκεντρωμένη γωνία στροφής της διατομής αυτής ως προς τη στήριξη. Ο όρος αυτός παραλείπεται, αν δεν είναι δυνατή η ολίσθηση των εφελκόμενων ράβδων από την αγκύρωσή τους πέραν από την ακραία διατομή (όπως συμβαίνει π.χ. λόγω συμμετρίας, στη διατομή μέγιστης ροπής στο άνοιγμα δοκού), οπότε τίθεται $a_{sI}=0$. Στον 3^ο όρο των εξ. (2.49a), (2.49b)ό, $\varepsilon_y=f_y/E_s$ είναι η παραμόρφωση διαρροής του διαμήκους οπλισμού και $d-d_1$ ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων στην ακραία διατομή. Οι αντοχές f_y , f_c , στο τελευταίο κλάσμα εκφράζονται σε MPa.

Η διασπορά των προβλέψεων της εξ.(2.41) με εφαρμογή των εξ.(2.6), (2.8), (2.24), (2.46)-(2.49), σε σχέση με τις πειραματικές τιμές είναι αρκετά μικρότερη από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι εξ. (2.20), (2.21), (2.25). Ο συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής τιμής προς πρόβλεψη είναι 51.3% για ανακυκλιζόμενη φόρτιση μελών με αντισεισμικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, και 59.5% για μονοτονική φόρτιση (για την οποία δεν είναι εφικτή/εύκολη η εύρεση αντίστοιχης σχέσης αν η φ_u υπολογίζεται με το προσομοίωμα περίσφιγξης κατά Model Code 90). Η συνολική συμφωνία είναι πολύ καλύτερη, καθότι η απόκλιση προς την κατεύθυνση πολύ υψηλών προβλέψεων σε περιπτώσεις όπου η πραγματική τιμή είναι χαμηλή, είναι περιορισμένη και σπανιότερη. Η υπερτίμηση της γωνίας στροφής χορδής σε περιπτώσεις όπου η πραγματική τιμή στην αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη ένταση είναι χαμηλή, υποκαθίσταται από (σπανιότερη) υποτίμηση σε περιπτώσεις όπου η πραγματική αστοχία σε μονοτονική φόρτιση συμβαίνει σε υψηλή τιμή της γωνίας στροφής χορδής.

2.2.2.5 Επιρροή γεωμετρίας, αξονικής δύναμης και όπλισης στις παραμορφώσεις καμπτικής αστοχίας

Παρόλο που η καμπυλότητα αστοχίας μειώνεται με την ανακύκλιση της φόρτισης λόγω

π.χ. σταδιακής αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, περισφιγμένου ή απερίσφικτου, η μελέτη της ποσοτικής επιρροής των διαφόρων παραμέτρων του σχεδιασμού και η διατύπωση κανόνων όπλισης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης μελών γίνονται συνήθως με βάση ποσοτικές σχέσεις, όπως αυτές της υποενότητας 2.2.2.1.3 για την καμπυλότητα αστοχίας υπό μονοτονική φόρτιση και της υποενότητας 2.2.2.2 για τη διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων. Και αυτό παρά το ότι τέτοιες σχέσεις αποτελούν χονδροειδή εξιδανίκευση της πραγματικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος και δεν μπορούν να αναπαράγουν την πειραματική συμπεριφορά.

Ο μεγάλος αριθμός των ανεξάρτητων παραμέτρων που υπεισέρχονται στις σχέσεις της υποενότητας 2.2.2.1 για τις φ_{su} και φ_{cu} , καθιστά άνευ νοήματος μία παρουσίαση της ποσοτικής επιρροής κάθε μίας απ' αυτές χωριστά. Η παρατήρηση όμως των σχέσεων επιτρέπει κάποια συμπεράσματα για την επιρροή διαφόρων παραμέτρων του σχεδιασμού.

- Επιρροή της αξονικής δύναμης

Μη μηδενική αξονική δύναμη έχουμε συνήθως στα κατακόρυφα στοιχεία, ενώ στις δοκούς η αξονική δύναμη είναι πρακτικά μηδενική. Τα κατακόρυφα στοιχεία έχουν συνήθως συμμετρικό οπλισμό, $\omega_1 = \omega_2$. Έτσι, επειδή για τις συνήθεις τιμές της ανηγμένης αξονικής δύναμης, ν , ισχύει η εξ.(2.35) αλλά όχι και η (2.31) (ή και οι τροποποιήσεις τους μετά την αποφλοιώση του περισφιγμένου πυρήνα), προκύπτει από την εξ.(2.36) ή την τροποποίησή της για τον περισφιγμένο πυρήνα μετά την αποφλοιώση ότι το (ανηγμένο) ύψος της θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία είναι (περίπου) ανάλογο της ν . Επειδή δε η καμπυλότητα στην αστοχία, φ_{cu} , είναι αντιστρόφως ανάλογη του ξ_{cu} , θα είναι και αντιστρόφως ανάλογη της ν . Το συμπέρασμα αυτό πρακτικά δεν αλλάζει, αν η τιμή της ν είναι τόσο υψηλή που δεν ικανοποιείται η εξ.(2.35) ή η τροποποίησή της για τον περισφιγμένο πυρήνα. Μάλιστα, όταν η τιμή της ν είναι τόσο υψηλή που η “διαρροή” της διατομής να οφείλεται στη μη γραμμικότητα του σκυροδέματος σε θλίψη αντί στη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού και πλησιάζει αυτήν της εξ.(2.35) ή της τροποποίησής της για τον περισφιγμένο πυρήνα (πέραν από την οποία έχουμε αποφλοιώση της διατομής σκυροδέματος ή αστοχία του περισφιγμένου πυρήνα προτού διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός), τότε η τιμή της φ_{cu} από την εξ.(2.34) δεν ξεπερνά σημαντικά αυτήν της φ_y από την εξ.(2.28) και η τιμή του $\mu_{\varphi u}$ πλησιάζει το 1,0. Αν η αστοχία οφείλεται σε θραύση του εφελκόμενου οπλισμού, η καμπυλότητα αστοχίας φ_{su} είναι αντιστρόφως ανάλογη του $1 - \xi_{su}$, η τιμή του οποίου δεν είναι πολύ ευαίσθητη στην τιμή της ν . Όμως αυτού του τύπου η αστοχία συμβαίνει όταν ισχύει η εξ.(2.31) ή η τροποποίησή της για τον περισφιγμένο πυρήνα, δηλαδή για τιμές της ν που δεν συνηθίζονται σε κατακόρυφα στοιχεία.

Η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_{ϕ_u} , επηρεάζεται από την τιμή της v κατά τον ίδιο τρόπο όπως και η ϕ_u , διότι η ϕ_y δεν επηρεάζεται πολύ από τη v .

Στη μεγάλη σημασία της v για την τιμή των ϕ_u και μ_{ϕ_u} οφείλεται ο προς τα πάνω περιορισμός της τιμής της v που επιβάλλουν οι σύγχρονοι κανονισμοί (όπως ο Ευρωκώδικας 8 και ο ΕΚΟΣ 2000) για τα υποστυλώματα, με στόχο να εξασφαλίσουν μία ελάχιστη διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων γι' αυτά. Η ικανοποίηση του περιορισμού αυτού, και γενικά η μείωση της v για δεδομένη αξονική θλίψη N , επιτυγχάνεται με επιλογή μεγάλων διαστάσεων διατομής σκυροδέματος. Ακόμα και όταν η αξονική θλίψη N είναι μικρή, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν οι διαστάσεις b και d είναι μικρές, καθότι η μείωσή τους σε b_0 και d_0 μετά την αποφλοιώση μπορεί να οδηγεί σε μείωση διατομής από bd σε b_0d_0 του περισφιγμένου πυρήνα, μεγαλύτερη από την αύξηση της αντοχής από f_c σε f_c^* λόγω περίσφιξης, οπότε η $v^* = N/b_0d_0f_c^*$ μπορεί να προκύψει μεγαλύτερη της $v = N/bdf_c$.

- Επιρροή της γεωμετρίας του μέλους:

Η καμπυλότητα αστοχίας, ϕ_u , είναι αντιστρόφως ανάλογη του στατικού ύψους d . Έτσι είναι μεγαλύτερη σε μέλη με μικρό ύψος διατομής. Η θ_u , όντας περίπου ανάλογη του γινομένου $L_{pl}\phi_u$, αυξάνεται με το λόγο διάτμησης L_s/d (βλ. εξ.(2.43), (2.44), (2.46a), (2.48a), για το L_{pl} συναρτήσει του L_s). Δεν ισχύει το ίδιο με τη μ_{θ} , η οποία αυξάνεται απλώς με το μήκος διάτμησης L_s .

Προκύπτει λοιπόν ότι από την άποψη αυτή η διαθέσιμη παραμόρφωση των μελών ως απόλυτο μέγεθος (δηλαδή η ϕ_u και η θ_u , όχι όμως οι αντίστοιχοι δείκτες πλαστιμότητας), είναι αντιστρόφως ανάλογη του ύψους διατομής. Για δοκούς αυτό υπαγορεύει χαμηλό ύψος. Στα υποστυλώματα, όπου η ανάγκη μείωσης της ανηγμένης αξονικής θλίψης v υπαγορεύει μεγάλη επιφάνεια διατομής, οι τετραγωνικές διατομές πλεονεκτούν από την άποψη αυτή των ορθογωνικών, καθότι δίνουν ικανοποιητική πλαστιμότητα και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις για την ίδια επιφάνεια διατομής. Προκύπτει επίσης ότι τα τοιχώματα, λόγω μεγάλης διάστασης διατομής, έχουν χαμηλή ικανότητα παραμόρφωσης.

- Τα ποσοστά διαμήκους οπλισμού:

Επειδή η εξ.(2.31) (και η τροποποίησή της για τον περισφιγμένο πυρήνα μετά την αποφλοιώση) ισχύει πάντοτε, πλην των περιπτώσεων δοκών με εφελκόμενο οπλισμό λιγότερο του θλιβόμενου ($\omega_1 < \omega_2$) ή με πολύ ψαθυρό χάλυβα, καθοριστικό της αστοχίας της διατομής είναι συνήθως το σκυρόδεμα σε θλίψη και οι εξ.(2.36)-(2.38) (ή οι τροποποιήσεις τους για τον περισφιγμένο πυρήνα). Τότε η καμπυλότητα αστοχίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του ξ_{cu} , η τιμή του οποίου από την εξ.(2.36) ή (2.38) αυξάνεται με τα ποσοστά του

εφελκόμενου οπλισμού και του οπλισμού κορμού, ω_1 και ω_v , και μειώνεται με αυτό του θλιβόμενου οπλισμού, ω_2 . Έτσι, σε κατακόρυφα στοιχεία όπου $\omega_1 = \omega_2$, η αύξηση του κατανεμημένου οπλισμού μεταξύ των πελμάτων (οπλισμός κορμού σε τοιχώματα) μειώνει τη διαθέσιμη παραμόρφωση. Σε δοκούς η διαθέσιμη παραμόρφωση αυξάνεται όσο ο θλιβόμενος χάλυβας αυξάνεται ως προς τον εφελκόμενο (με άνω όριο το $\omega_2 = \omega_1$). Τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν και για το δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, $\mu_{\phi u}$, καθώς η ϕ_y είναι σχεδόν ανεξάρτητη των ποσοστών οπλισμού.

- Η ποσότητα οπλισμού περίσφιξης:

Οι εξ.(2.18) και (2.19), η τροποποιημένη εξ.(2.34) για τον περισφιγμένο πυρήνα μετά την αποφλοίωση και οι εξ.(2.40)-(2.42) δείχνουν ότι για τη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων όπου καθοριστικό της αστοχίας είναι το σκυρόδεμα, η καμπυλότητα και η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες πλαστιμότητας αυξάνονται (περίπου) γραμμικά με την ποσότητα οπλισμού περίσφιξης, λόγω αύξησης της βράχυνσης αστοχίας του σκυροδέματος.

2.2.3 Η ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

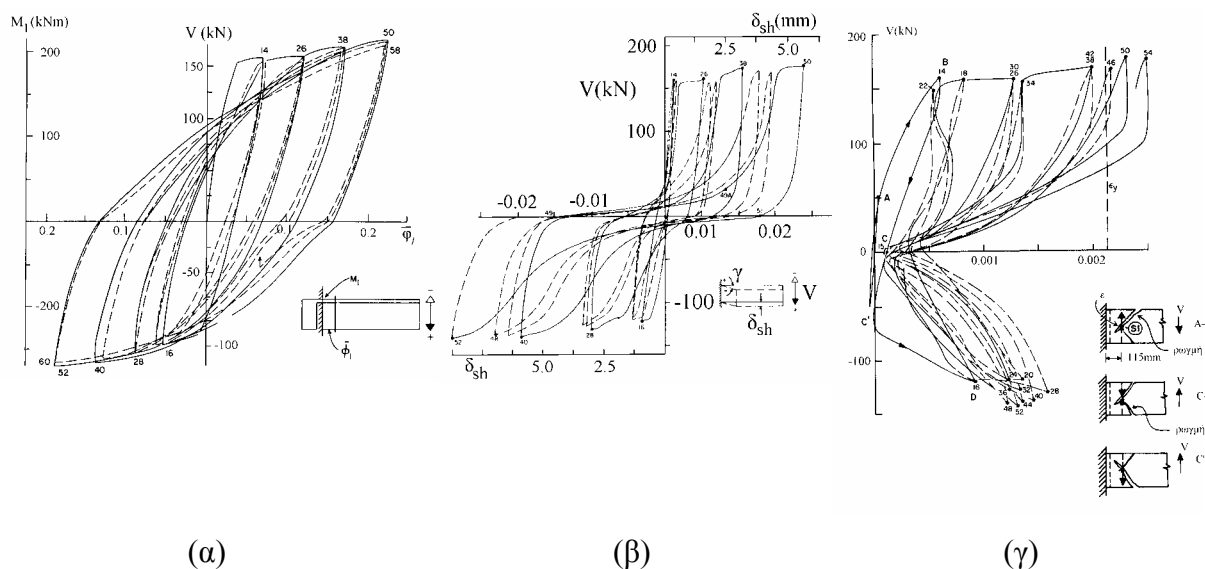
2.2.3.1 Οι ανελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις

Σε γραμμικά μέλη οπλισμένου σκυροδέματος (δοκούς, υποστυλώματα, συνήθη τοιχώματα) οι καμπτικές παραμορφώσεις που είδαμε προηγουμένως είναι αυτές που οφείλονται στη σχετική στροφή γειτονικών διατομών (η καμπυλότητα είναι η σχετική στροφή δύο διατομών δια της απόστασής τους). Το πέραν των καμπτικών τμήμα των παραμορφώσεων, αυτό δηλαδή που οφείλεται στη σχετική μετάθεση γειτονικών διατομών χωρίς σχετική στροφή τους, ονομάζεται διατμητική παραμόρφωση. Σημειωτέον ότι η διατμητική παραμόρφωση γ είναι έργο αντίστοιχη της τέμνουσας V (όπως είναι η ϕ για τη ροπή M) και το ολοκλήρωμα της $Vd\gamma$ είναι η ανά m μήκους του μέλους διατμητική ενέργεια παραμόρφωσης. Επομένως, η συμβολή της διάτμησης στην απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική απόκριση καθορίζεται από τους βρόχους V - γ των μελών.

Όταν όλα τα συστατικά ενός μέλους οπλισμένου σκυροδέματος, δηλαδή το σκυρόδεμα και οι οπλισμοί, λειτουργούν στην ελαστική περιοχή, οι διατμητικές παραμορφώσεις μπορούν να θεωρηθούν κατά ικανοποιητική προσέγγιση ότι οφείλονται μόνο στην τέμνουσα δύναμη V και οι καμπτικές μόνο στη ροπή κάμψης M . Μετά τη διαρροή των διαμήκων ράβδων λόγω κάμψης, όμως, οι ανελαστικές καμπτικές παραμορφώσεις προκαλούν και ανελαστικές διατμητικές. Μάλιστα ενώ η τέμνουσα δύναμη είναι πρακτικά σταθερή στο μήκος διάτμησης L_s , οι ανελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις εντοπίζονται μόνο στην

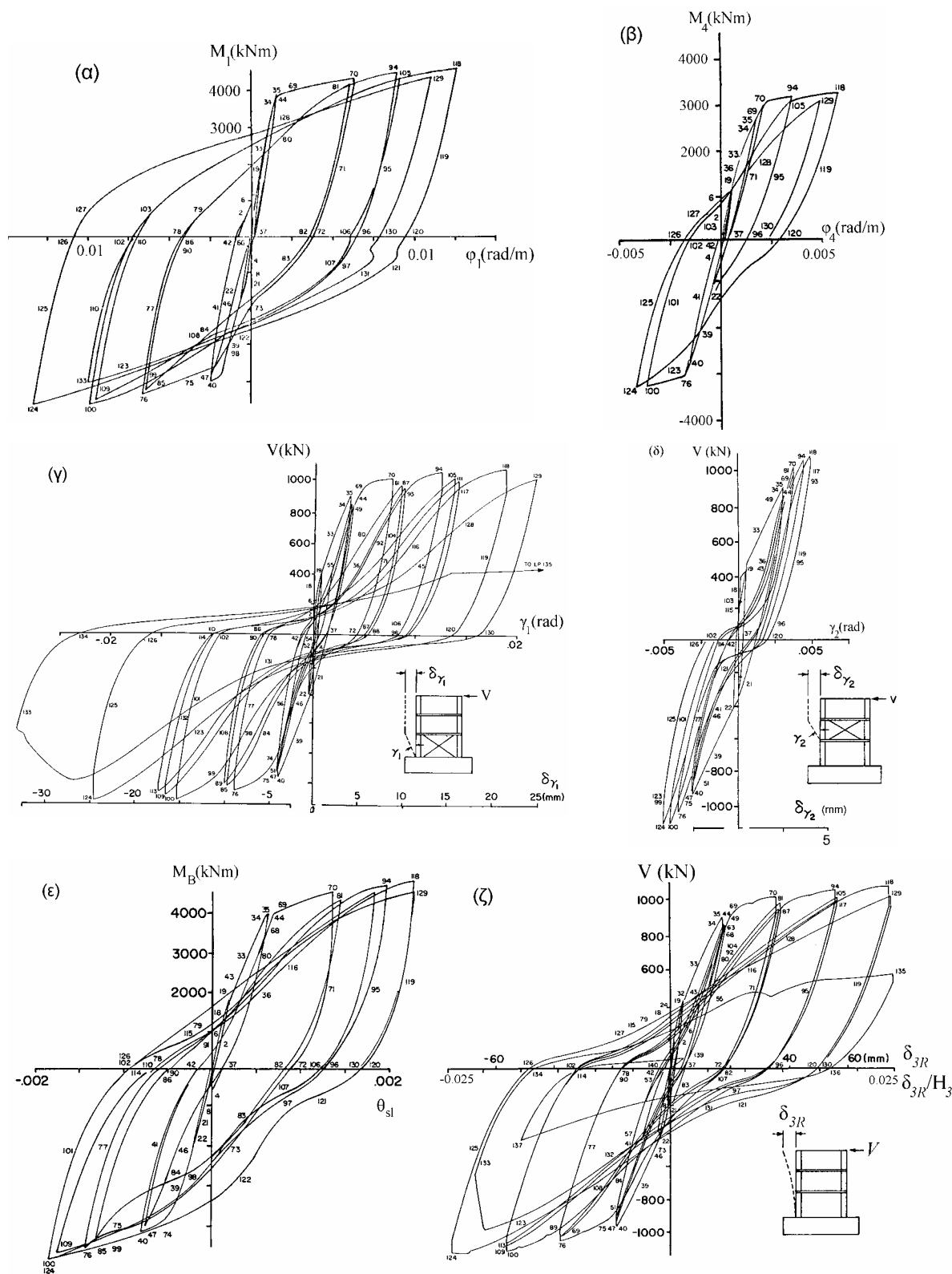
περιοχή όπου η M ξεπερνάει τη ροπή διαρροής M_y , δηλαδή στην “πλαστική άρθρωση”.

Χαρακτηριστικά είναι τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.18 για πλακοδοκό με $L_s/h=3,9$ και $L_s/d=4,3$, που υποβάλλεται σε τριάδες συμμετρικών κύκλων εγκάρσιας μετακίνησης: Το Σχήμα 2.18(α) παρουσιάζει τους βρόχους ροπής M - (μέσης) καμπυλότητας στα ακραία $d/2$ του μήκους (περιλαμβανομένης της ολίσθησης από τη ζώνη αγκύρωσης πέραν από την ακραία διατομή της δοκού), το 2.18(β) τους αντίστοιχους βρόχους τέμνουσας V - (μέσης) διατμητικής παραμόρφωσης στο τμήμα μεταξύ των διατομών σε απόσταση $0,1d$ και d από την ακραία και το 2.18(γ) τη μεταβολή της μήκυνσης ενός συνδετήρα σε απόσταση $0,3d$ από την ακραία διατομή. Η λοξή ρηγμάτωση συνέβη σε φορτίο 5kN (σημείο A στο Σχήμα 2.18(γ), μετά το οποίο ενεργοποιήθηκε ο συνδετήρας και άρχισαν να εμφανίζονται κάποιες διατμητικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.18 Πλακοδοκός σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση: (α) βρόχοι M - ϕ στο άκρο, (β) βρόχοι V - γ ακραίας περιοχής, (γ) βρόχοι V - ϵ συνδετήρα (κατά Ma et al, 1976)

Μετά την καμπτική διαρροή στο άκρο του μέλους, οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνονται ραγδαία με την ανακύκλιση του φορτίου, χωρίς (ουσιαστικά) να αυξάνεται η μέγιστη τιμή της τέμνουσας V . Μάλιστα οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνονται από τον 1ο προς τον 3ο κύκλο κάθε τριάδας κύκλων σταθερού εύρους εγκάρσιας μετακίνησης στο άκρο, με αντίστοιχη μείωση των μεγίστων καμπτικών παραμορφώσεων κάθε κύκλου της τριάδας (Σχήμα 2.18(α)). Η σταδιακή αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων με την ανακύκλιση ενεργοποιεί εντονότερα και τους συνδετήρες, με αποτέλεσμα αυτός του Σχήματος 2.18(γ) σύντομα να διαρρέει, ενώ κατά την έναρξη της πλαστικοποίησης σε κάμψη και για την ίδια τέμνουσα δύναμη η τάση του δεν ξεπερνούσε το 25% της τάσης διαρροής.



Σχήμα 2.19 Τριώροφο τοίχωμα: (α),(β) βρόχοι M-φ στη βάση 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου, (γ),(δ) βρόχοι V-γ 1^{ου} και 2^{ου} ορόφου, (ε) βρόχοι M-στροφής λόγω ολίσθησης ράβδων στη βάση, (ζ) βρόχοι V-μετακίνησης στην κορυφή τοιχώματος (από Wang et al, 1975).

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγούν τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.19, για τριώροφο τοίχωμα με ενισχυμένες περιοχές στα άκρα της διατομής του. Στα τοιχώματα η κάμψη αναλαμβάνεται (κυρίως) από τα πέλματα, ιδίως όταν αυτά είναι ενισχυμένα από απόψεως πάχους, κατακορύφων οπλισμών και περίσφιγξης σε σχέση με το υπόλοιπο της διατομής, ενώ η τέμνουσα αναλαμβάνεται από το μεταξύ τους κορμό. Βεβαίως οι κατακόρυφοι οπλισμοί του κορμού λειτουργούν όχι μόνο για τη διάτμηση αλλά και για την κάμψη (βλ. όρο ρ_v και ω_v στις εξ.(2.27)-(2.33)), ενώ και οι ενισχυμένες περιοχές των πελμάτων συμβάλλουν στη διάτμηση με λειτουργία βλήτρου των μεγάλης διαμέτρου ράβδων τους αλλά και της ενισχυμένης περιοχής ως σύνολο, μετά όμως την τυχόν διατμητική υπερκαταπόνηση ή και αστοχία του κορμού. Παρά όμως την αρκετά διακριτή λειτουργία κορμού και πελμάτων, η έναρξη της ανελαστικής συμπεριφοράς σε κάμψη στη βάση του 1ου ορόφου (Σχήμα 2.19(α)) και του 2ου (Σχήμα 2.19(β)) σηματοδοτούν και την έναρξη ανάπτυξης σημαντικών ανελαστικών διατμητικών παραμορφώσεων στο σύνολο του 1ου (Σχήμα 2.19(γ)) και του 2ου ορόφου (Σχήμα 2.19(δ)). Και τούτο παρά το ότι και στους δύο ορόφους η μέγιστη τέμνουσα υπολείπεται της αντίστοιχης θεωρητικής διατμητικής αντοχής υπό μονοτονική φόρτιση. Μάλιστα τελικά αστοχεί ο κορμός του 1ου ορόφου σε διάτμηση, προτού αστοχήσουν τα πέλματα λόγω κάμψης.

Πέραν από τη μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω των ανελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων, τα Σχήματα 2.18(β) και 2.19(γ), (δ) δείχνουν το χαρακτηριστικό σχήμα των βρόχων υστέρησης τέμνουσας-διατμητικών παραμορφώσεων: σε σύγκριση με τους καμπτικούς των Σχημάτων 2.15, 2.16, 2.18(α) και 2.19(α), (β) οι βρόχοι αυτοί έχουν εντονότερη τάση οριζοντίωσης μετά την πλήρη αποφόρτιση και επανόδου σε μεγαλύτερη δυσκαμψία με την εξέλιξη της επαναφόρτισης στην αντίθετη κατεύθυνση. Συνολικά οι βρόχοι έχουν στένωση στο μέσο και σχήμα ανάποδου S, απορροφούν δε ελάχιστη ενέργεια. Αυτό το σχήμα οφείλεται στο εξής: Λόγω μικρομετακινήσεων, αποκόλλησης αδρανών και κυρίως εξαιτίας παραμένουσας μήκυνσης στους συνδετήρες που διέρρευσαν σε εφελκυσμό, οι λοξές ρωγμές δεν κλείνουν αμέσως μετά την αντιστροφή του προσήμου της τέμνουσας. Για να κλείσουν και να επιτρέψουν ξανά τη μεταφορά θλιπτικών τάσεων κάθετων στην επιφάνειά τους, απαιτούν μία σημαντική διατμητική παραμόρφωση στην αντίθετη κατεύθυνση, παραμόρφωση που συμβαίνει χωρίς σημαντική αντίδραση από τους συνδετήρες (καθότι συνήθως το γεωμετρικό ποσοστό ρ_w των τελευταίων είναι μικρό). Η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί στο περίπου οριζόντιο τμήμα του κλάδου αποφόρτισης-επαναφόρτισης και το κλείσιμο των ρωγμών αντιστοιχεί στην αύξηση της κλίσης.

Η ασήμαντη απορρόφηση ενέργειας κατά την ανακύκλιση, μαζί με την πρακτικά

απεριόριστη βαθμιαία αύξηση του μεγέθους των διατμητικών παραμορφώσεων λόγω ανακυκλιζόμενης έντασης σταθερού εύρους, δείχνει ότι ο διατμητικός τρόπος συμπεριφοράς δεν διαθέτει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και τη σταθερότητα των βρόχων που απαιτούμε από την ανελαστική απόκριση. Επιπλέον, η αστοχία σε διάτμηση οφείλεται σε αστοχία της θλιβόμενης ζώνης από λοξό εφελκυσμό ή του κορμού σε λοξή (διαγώνια) θλίψη, χωρίς δυνατότητα βελτίωσης μέσω περισφιγξης. Επομένως είναι ψαθυρή. Γι' αυτό οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί επιδιώκουν, μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού των στοιχείων σε τέμνουσα, να εξασφαλίσουν ότι η διατμητική συμπεριφορά θα παραμείνει στην ελαστική περιοχή (βλ. ενότητα 1.3.3 κεφαλαίου 1). Με αυτό το δεδομένο, στον αντισεισμικό σχεδιασμό του οπλισμένου σκυροδέματος μας ενδιαφέρει μόνον η διατμητική αντοχή και όχι η παραμορφωσιακή συμπεριφορά των μελών σε ανακυκλιζόμενη διάτμηση.

2.2.3.2 Αντοχή σε ανακυκλιζόμενη τέμνουσα

2.2.3.2.1 Εισαγωγή: Βασικά προσομοιώματα για τη διατμητική αντοχή υπό μονοτονική ένταση

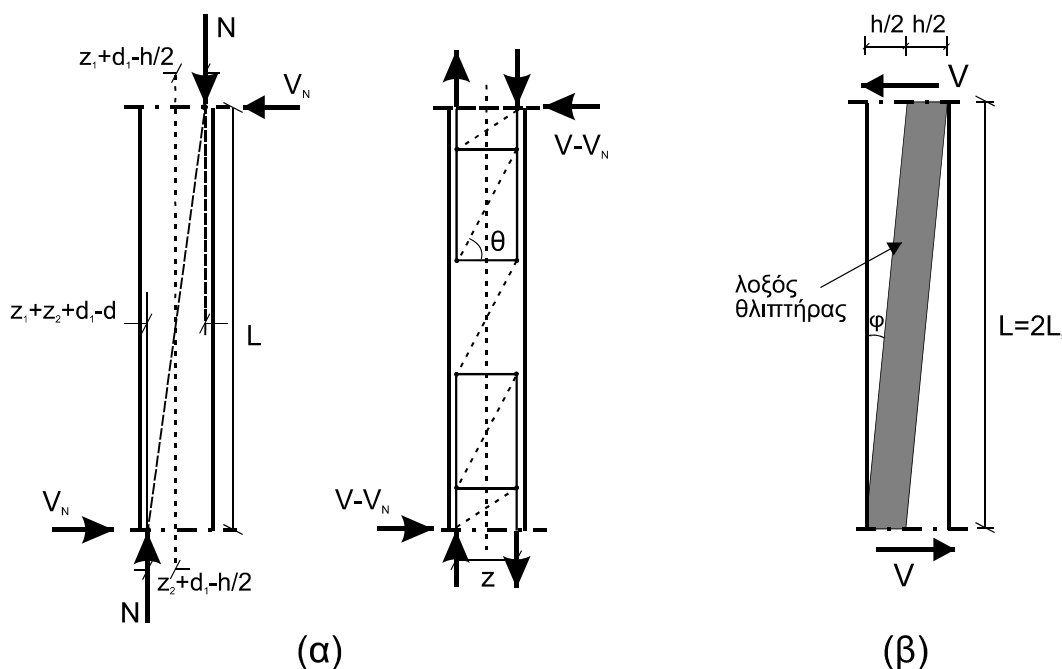
Σήμερα οι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί (ο Model Code 90 των CEB/FIP και ο Ευρωκώδικας 2) υιοθετούν για την αντοχή σε διάτμηση αποκλειστικά τη “γενική μέθοδο” μεταβλητής γωνίας θ του θλιπτικού πεδίου τάσεων σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή επιτρέπεται στον ΕΚΟΣ 2000 ως εναλλακτική. Σύμφωνα μ' αυτήν, σε μέλη με εγκάρσιους στον άξονα οπλισμούς διάτμησης (συνδετήρες), η τέμνουσα V εισάγει:

- α) στα δύο πέλματα του μέλους, εφελκυσμένο και θλιβόμενο, εφελκυστικές δυνάμεις ίσες με $0,5V \cot \theta$,
- β) στους συνδετήρες εφελκυστική δύναμη ανά m μήκους του μέλους ίση με $V \tan \theta / z$, δηλαδή τάση σ' αυτούς: $V \tan \theta / (\rho_w b_w z)$ ($\rho_w =$ γεωμετρικό ποσοστό συνδετήρων, $b_w =$ πλάτος κορμού, $z =$ απόσταση πελμάτων μέλους) και
- γ) πεδίο θλιπτικών τάσεων στο σκυροδέμα, υπό γωνία θ ως προς τον άξονα του μέλους και τιμή τάσης $\sigma_c = 2V / (b_w z \sin 2\theta)$.

Η θλιπτική τάση του σκυροδέματος δεν επιτρέπεται να υπερβεί το $n f_{cd}$. Ο συντελεστής n λαμβάνει υπόψη τη δυσμενή επιρροή των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων και παραμορφώσεων στη θλιπτική αντοχή και ισούται με: $n = \min(0,6, 0,9 - f_{ck}(\text{MPa})/200)$ κατά τον Ευρωκώδικα 2, με $n = \max(0,5, 0,7 - f_{ck}(\text{MPa})/200)$ κατά τον ΕΚΟΣ 2000, ή με $n = 0,6(1 - f_{ck}(\text{MPa})/250)$ κατά το Model Code 90. (Χρησιμοποιείται το σύμβολο n αντί του ν που χρησιμοποιεί ο Ευρωκώδικας 2 και ο Model Code 90, για αποφυγή σύγχυσης με την ανηγμένη αξονική δύναμη). Η τιμή του n κατά ΕΚΟΣ 2000 και Model Code 90 περιλαμβάνει

και το μειωτικό συντελεστή 0,85 επί του f_c , ενώ ο Ευρωκώδικας 2 έχει καταργήσει αυτή τη μείωση όχι μόνο στη διάτμηση αλλά και στην κάμψη.

Κατά το Model Code 90 και τον Ευρωκώδικα 2, σε κατακόρυφα στοιχεία η αξονική θλίψη N αναλαμβάνει με λοξό θλιπτήρα τμήμα της τέμνουσας, ίσο περίπου με N επί την εγκάρσια στον άξονα κλίση της ευθείας που ενώνει τα σημεία εφαρμογής των ορθών τάσεων σκυροδέματος στις ακραίες διατομές του στοιχείου, δηλαδή τέμνουσα $V_N = N(z_1 + z_2 + d_1 - d) / L$ (Σχήμα 2.20(α)), όπου z_1, z_2 οι μοχλοβραχίονες εσωτερικών δυνάμεων στις διατομές των άκρων, $d_1 = h - d$ και L το μήκος του στοιχείου. Η υπόλοιπη τέμνουσα, $V - V_N$, επιβαρύνει τον ανωτέρω μηχανισμό δικτυώματος με μεταβλητή γωνία θ θλιπτικού πεδίου. Όμως στη λοξή τάση θλίψης του μηχανισμού αυτού, $2(V - V_N) / (b_w z \sin 2\theta)$, προστίθεται η ομοιόμορφη ορθή τάση $N / b_w z$.



Σχήμα 2.20 Προσομοίωμα διατμητικής αντοχής (α) κατά MC90, (β) κατά AIJ

Για μονοτονική φόρτιση η ανωτέρω “γενική μέθοδος” διαθέτει θεωρητικό υπόβαθρο και πειραματική επιβεβαίωση που επιτρέπουν εκμετάλλευση της δυνατότητας ανακατανομής της έντασης μεταξύ των διαφόρων συνιστωσών της διατμητικής αντοχής για το φάσμα τιμών της κλίσης του θλιπτικού πεδίου: $22^\circ \leq \theta \leq 68^\circ$ (δηλαδή $0,4 \leq \tan \theta \leq 2,5$) κατά τον ΕΚΟΣ 2000, $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ($0,1 \leq \tan \theta \leq 1$) κατά τον Ευρωκώδικα 2 (και επομένως και τον Ευρωκώδικα 8), ή $18,5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ (δηλαδή $1/3 \leq \tan \theta \leq 1$) κατά Model Code 90.

Στον ΕΚΟΣ 2000 και στη σημερινή Ελληνική πρακτική υιοθετείται κατά κανόνα η λεγόμενη “τυπική μέθοδος”. Η μέθοδος αυτή προκύπτει από την ανωτέρω “γενική”, αν

ληφθεί $\theta=45^\circ$ ακολουθεί δηλαδή το κλασικό δικτύωμα Mörsch-Ritter. Όμως οι συνδετήρες υπολογίζονται για εφελκυστική δύναμη ανά m μήκους ίση με $(V-V_c)/z$ αντί του $V \tan \theta / z$ της “γενικής μεθόδου”. Ο όρος V_c , που αντικαθιστά την αύξηση της συμβολής των συνδετήρων λόγω κλίσης του πεδίου θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος κάτω από 45° , ονομάζεται “συμβολή του σκυροδέματος” στη διατμητική αντοχή. Από φυσική άποψη συνήθως αποδίδεται στο συνδυασμό της συμβολής: α) της θλιβόμενης ζώνης β) της αλληλοεμπλοκής αδρανών και γ) της δράσης βλήτρου των διαμήκων ράβδων, στη μεταφορά τέμνουσας. Στους μηχανισμούς αυτούς χρειάζεται να προστεθεί και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών. Δεδομένου όμως ότι η συμβολή καθενός από τους μηχανισμούς αυτούς δεν είναι εύκολο να μετρηθεί ή να ποσοτικοποιηθεί, ουσιαστικά ο όρος V_c είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής (δηλ. πειραματικής) διατμητικής αντοχής και της συμβολής των συνδετήρων σ’ αυτήν για $\theta=45^\circ$.

Για μονοτονική φόρτιση στον ΕΚΟΣ 2000 ο όρος V_c λαμβάνεται ίσος με:

$$V_c = [0,25 f_{ct} \max(1,6 - d(m), 1) \min(1,2 + 40 \rho_1, 2) + 0,15 N / A_c] b_w d \quad (2.50)$$

όπου f_{ct} είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και η μέση αξονική τάση, N/A_c , λαμβάνεται θετική για θλίψη. Στη διαστασιολόγηση των συνδετήρων όμως χρησιμοποιείται η μειωμένη τιμή σχεδιασμού, V_{cd} , η οποία υπολογίζεται με βάση την τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, $f_{ctd} = f_{ctk,0,05} / \gamma_c = 0,21 f_{ck}^{2/3} / \gamma_c$, με $\gamma_c = 1,5$ και τάσεις σε MPa.

Σημειώνεται ότι και οι Αμερικανικοί Κανονισμοί υιοθετούν την ανωτέρω “τυπική” μέθοδο με $\theta=45^\circ$ και όρο V_c , χωρίς καμία αναφορά στη γενική μέθοδο με μεταβλητή γωνία θλιβόμενων διαγωνίων.

2.2.3.2.2 Μείωση διατμητικής αντοχής στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης με την ανακύκλιση των παραμορφώσεων

Είναι σαφές από τη συζήτηση για τη συμπεριφορά που παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.18 και 2.19 ότι η ανάπτυξη ανελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων προκαλεί ανάπτυξη και αντίστοιχων διατμητικών καθώς και μεγαλύτερη ενεργοποίηση των συνδετήρων και αύξηση του τμήματος της τέμνουσας που αναλαμβάνουν αυτοί. Αυτό συμβαίνει πάντοτε μέσα στην περιοχή του μέλους που πλαστικοποιείται σε κάμψη, ιδιαίτερα όταν έχουμε ανακύκλιση των ανελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων. Μάλιστα μπορεί η τελευταία να οδηγήσει σε

διατμητική αστοχία, πριν την εξάντληση της διαθέσιμης καμπτικής ικανότητας παραμόρφωσης του μέλους. Επειδή μάλιστα η αστοχία αυτή συμβαίνει αρκετά μετά τη διαρροή σε κάμψη και μετά από σημαντική ανελαστική παραμόρφωση, συχνά ονομάζεται “πλάστιμη διατμητική αστοχία”, σε διάκριση από την ψαθυρή, η οποία συμβαίνει σε χαμηλές παραμορφώσεις πριν την καμπτική διαρροή. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται συνήθως με μείωση της διατμητικής αντοχής μέσα στην ακραία περιοχή του μέλους που πλαστικοποιείται από κάμψη. Η μείωση αυτή εκφράζεται με διάφορους τρόπους, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Η ανακύκλιση της έντασης προκαλεί σταδιακή υποβάθμιση των μηχανισμών αντίστασης σε τέμνουσα, ιδίως αυτών που σχετίζονται με τη θεωρούμενη ως συμβολή του σκυροδέματος (δηλαδή τον όρο V_c). Η μείωση της αντίστασης αυξάνεται με το μέγεθος της μέγιστης ανελαστικής παραμόρφωσης του μέλους. Έτσι ο ΕΚΟΣ 2000 λαμβάνει τη συμβολή του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή κρισίμων περιοχών δοκών ή υποστυλωμάτων με μικρό αξονικό φορτίο στο 30% της πλήρους τιμής που ισχύει απουσία ανακυκλιζόμενων ανελαστικών παραμορφώσεων, και υποστυλωμάτων με μεγαλύτερο αξονικό φορτίο στο 90% αυτής. Στους Ευρωκώδικες, όπου δεν λαμβάνεται χωριστά η συμβολή του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή, το φαινόμενο αυτό λαμβάνεται υπ’ όψιν στη διαστασιολόγηση μέσω κάτω ορίων στη γωνία θ των λοξών θλιβομένων διαγωνίων της “γενικής” μεθόδου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής.

Οι μηχανισμοί οι οποίοι οδηγούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση της φόρτισης είναι πολλοί:

- Η σταδιακή μείωση της αλληλεμπλοκής των αδρανών κατά μήκος των διαγωνίων ρωγμών καθώς οι δύο επιφάνειες εκατέρωθεν της ρωγμής γίνονται πιο λείες με την ανακύκλιση.
- Η σταδιακή μείωση της δράσης βλήτρου καθώς και η ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων στο διαμήκη οπλισμό.
- Η ανάπτυξη διαμπερών καμπτικών ρωγμών στο μέλος και η μείωση της συνεισφοράς της θλιβόμενης ζώνης στην διατμητική αντοχή που αυτή συνεπάγεται.
- Η σταδιακή μείωση της αλληλεμπλοκής των αδρανών κατά μήκος των διαγωνίων ρωγμών καθώς το πλάτος (άνοιγμά) τους μεγαλώνει με την ανακύκλιση λόγω της ολίσθησης που συνοδεύει τη συνάφεια μεταξύ συνδετήρων και σκυροδέματος και των πλαστικών παραμορφώσεων στους συνδετήρες.
- Η μείωση της αντοχής και δυσκαμψίας του σκυροδέματος σε διαγώνια θλίψη λόγω της

μήκυνσης που συνοδεύει το εφελκυστικό πεδίο τάσεων στην εγκάρσια διεύθυνση.

Οι πρώτοι τέσσερις λόγοι μείωσης της διατμητικής αντοχής αφορούν την συνεισφορά του σκυροδέματος στην διατμητική αντοχή, δηλαδή τον όρο V_c που προστίθεται στην τιμή της συνεισφοράς των συνδετήρων V_w που υπολογίζεται με προσομοίωμα δικτύωματος 45° . Οι δύο τελευταίοι μηχανισμοί εμπλέκουν επίσης και την συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στην διατμητική αντοχή του μέλους V_w .

Επειδή η μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακυκλιζόμενη φόρτιση αφορά κυρίως μέλη ΟΣ τα όποια αναπτύσσουν πλαστικές αρθρώσεις με καμπτική διαρροή προτού εξαντληθεί η διατμητική τους αντοχή, το φαινόμενο εκφράζεται ποσοτικά ως μείωση της διατμητικής αντοχής με ανακύκλιση πλαστικών παραμορφώσεων, έως ότου η διατμητική αντοχή του μέλους, V_R , μειωθεί κάτω απ' την τιμή της τέμνουσας που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή, $V_y = M_y/L_s$ (όπου M_y η ροπή διαρροής στην ακραία διατομή του μέλους και L_s το μήκος διάτμησης σ' αυτό το σημείο). Η τιμή της παραμόρφωσης του μέλους όπου θα συμβεί αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ικανότητα παραμόρφωσης του μέλους κατά την εμφάνιση “πλάστιμης” διατμητικής αστοχίας.

Οι Οδηγίες του Ιαπωνικού Αρχιτεκτονικού Ινστιτούτου (AIJ) αποτελούν την πιο θεμελιώδη αντιμετώπιση του θέματος της διατμητικής αντοχής υπό ανακυκλιζόμενη ένταση από κανονισμούς. Κατά τις οδηγίες αυτές, στη διατμητική αντοχή θεωρείται ότι συμβάλλουν δύο μηχανισμοί: α) αυτός του δικτύωματος με μεταβλητή γωνία θ του πεδίου θλιπτικών τάσεων σκυροδέματος (αυτός δηλαδή της “γενικής μεθόδου” του Ευρωκώδικα 2, του ΕΚΟΣ 2000 και του Model Code 90 των CEB/FIP) και β) ένας μηχανισμός λοξού θλιπτήρα μεταξύ των ακραίων διατομών του μέλους. Με βάση τη δύναμη διαρροής των συνδετήρων, ο μηχανισμός δικτύωματος μπορεί να αναλάβει τέμνουσα ίση με $V_w = \rho_w f_{yw} b_w z \cot \theta$, εξαντλώντας τμήμα της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος υπό γωνία θ ως προς τον άξονα ίσο με $2V_w / (b_w z \sin 2\theta) = \rho_w f_{yw} / \sin^2 \theta$. Το υπόλοιπο της αντοχής, ίσο με $\eta f_c - \rho_w f_{yw} / \sin^2 \theta$ (όπου ο μειωτικός συντελεστής η μπορεί να ληφθεί ίσος με αυτόν του Ευρωκώδικα 2, ή του ΕΚΟΣ 2000, ή του Model Code 90), θεωρείται διαθέσιμο για το λοξό θλιπτήρα. Αυτός λαμβάνεται κατά τις Ιαπωνικές Οδηγίες ότι έχει κλίση ως προς τον άξονα $\tan \varphi \approx h/2L$ για το σύνολο L του μήκους ή $\approx h/4L_s$ για το μήκος διάτμησης L_s και πλάτος (μέσα στο επίπεδο του ύψους h) $h/(2\cos \varphi)$ (Σχήμα 2.20(β)). Επιπλέον για απλοποίηση αγνοείται η διαφορά μεταξύ των διευθύνσεων της θλίψης στο λοξό θλιπτήρα και στο μηχανισμό δικτύωματος, οπότε η αντοχή σε θλίψη του θλιπτήρα ισούται με $0,5b_w h (\eta f_c - \rho_w f_{yw} / \sin^2 \theta) / \cos \varphi$ και η συμβολή του στη διατμητική αντοχή με $0,5b_w h (\eta f_c - \rho_w f_{yw} / \sin^2 \theta) \tan \theta$. Συνολικά η τέμνουσα αντοχής είναι:

$$V = \rho_w f_{yw} b_w z \cot \theta + 0,5 b_w h (n f_c - \rho_w f_{yw} (1 + \cot^2 \theta)) \tan \phi \quad (2.51)$$

Η άνω οριακή τιμή της $\cot \theta$ είναι η μικρότερη από τις τιμές: (α) $\cot \theta = 2$ (δηλ. $\theta \geq 26,5^\circ$) και (β) $\cot \theta = (n f_c / \rho_w f_{yw} - 1)^{1/2}$ τιμή για την οποία ο δεύτερος όρος της εξ.(2.51) μηδενίζεται. Για τη μικρότερη από αυτές τις δύο άνω οριακές τιμές της $\cot \theta$ προκύπτει και η διατμητική αντοχή, εκτός εάν $0,5 \tan \phi (\approx h/2L_s = h/L) \geq 2z/h$ (συνθήκη που ικανοποιείται μόνο σε στοιχεία με μικρό λόγο διάτμησης), οπότε η τέμνουσα της εξ.(2.51) γίνεται μέγιστη για $\cot \theta = z/(h \tan \phi) \approx 4L_s z/h^2$ και ίση με:

$$V_u = 0,5 b_w h [n f_c \tan \phi + \rho_w f_{yw} (\zeta^2 - \tan^2 \phi)] \quad (2.52)$$

όπου $\zeta = z/h$. Ο λόγος L_s/h , που υπεισέρχεται στην κλίση $\tan \phi \approx h/4L_s$ του λοξού θλιπτήρα, ισούται με το λόγο διάτμησης.

Η επιρροή των ανελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων στη διατμητική αντοχή λαμβάνεται υπόψη ως εξής: Αν θ_{pl} είναι η πλαστική γωνία στροφής, η $\cot \theta$ στον πρώτο μόνο όρο της εξ.(2.51) λαμβάνεται: $\cot \theta \leq \max(2-50\theta_{pl}, 1)$, ενώ ο όρος $n f_c$ πολλαπλασιάζεται επί το μειωτικό συντελεστή: $\max(0,25, 1-15\theta_{pl})$. Η θ_{pl} αναφέρεται στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης και μπορεί να εκτιμηθεί ως $(\mu_\theta - 1)\theta_y$, όπου μ_θ είναι η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής χορδής ή μετακινήσεων.

Οι άλλες προσεγγίσεις του θέματος της μείωσης της διατμητικής αντοχής με το μέγεθος των ανελαστικών καμπτικών παραμορφώσεων είναι απλούστερες και συνήθως ημι-εμπειρικές. Ως αφετηρία τους έχουν κατά κανόνα την ανάλυση της διατμητικής αντοχής V_u σε άθροισμα: α) αυτής που οφείλεται στους συνδετήρες, $\rho_w f_{yw} b_w z \cot \theta$, και β) της “συμβολής του σκυροδέματος”, V_c , η οποία όμως λαμβάνεται μειωμένη, ανάλογα με την απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας.

Στα πλαίσια της “τυπικής” μεθόδου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής (δηλ. για $\theta = 45^\circ$), ο ΕΚΟΣ 2000 επιβάλλει στις ακραίες κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων “με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας” μείωση στο 30% ή στο 90% της V_{cd} για ανηγμένη αξονική θλίψη ν μικρότερη ή μεγαλύτερη από 0,1, αντίστοιχα. (Η αξονική θλίψη βοηθάει να διατηρηθεί κλειστό ένα τμήμα των διαμπερών ρωγμών και μειώνει την εξασθένιση της συμβολής της θλιβόμενης ζώνης και της αλληλοεμπλοκής αδρανών στη διάτμηση. Μειώνει επίσης και τη γωνία θ του θλιπτικού πεδίου του σκυροδέματος ως προς τον άξονα). Για την κρίσιμη περιοχή της βάσης τοιχωμάτων με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, οι

αντίστοιχες τιμές της συμβολής σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή είναι κατά τον ΕΚΟΣ 2000 ίσες με $0,25V_{cd}$ και $0,7V_{cd}$.

Προσομοιώματα για τη μείωση της διατμητικής αντοχής μελών οπλισμένου σκυροδέματος με την ανακύκλιση της φόρτισης είναι αυτά του Priestley και των συνεργατών του (π.χ. Kowalsky & Priestley 2000) και του Moehle και των συνεργατών του (π.χ. Ascheim and Moehle 1992, Moehle κ.α. 2001). Τα προσομοιώματα αυτά λαμβάνουν την συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού V_w σύμφωνα με το ισοδύναμο δικτύωμα των Ritter-Mörsch, καθώς και χωριστή συνεισφορά του σκυροδέματος V_c .

Όπως και στο CEB/FIP Model Code 90 έτσι και η «οικογένεια» προσομοιωμάτων του Priestley και συνεργατών λαμβάνει την συνεισφορά της αξονικής θλίψης του μέλους στην διατμητική αντοχή ως ξεχωριστό μηχανισμό. Η πιο πρόσφατη μορφή αυτού του προσομοιώματος παρουσιάζεται από τους Kowalsky and Priestley (2000) ως “Revised UCSD model” για κυκλικά υποστυλώματα (μονάδες: MN, m):

$$V_R = \sqrt{f_c} k(\mu_\theta) \min\left(1.5, \max\left(1, 3 - \frac{L_s}{h}\right)\right) \min(1, 0.5 + 20\rho_{tot})(0.8A_c) + N \frac{h-x}{2L_s} + V_w \quad (2.53)$$

Στην εξ.(2.53) ρ_{tot} είναι το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού, η επιφάνεια σκυροδέματος A_c είναι ίση με $\pi D_c^2/4$ (D_c = διάμετρος πυρήνα διατομής εντός των συνδετήρων), h είναι το ύψος της διατομής (ίσο με την διάμετρο D στις κυκλικές διατομές), N το αξονικό φορτίο (θετικό για θλίψη), x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης και L_s το μήκος διάτμησης. Ο συντελεστής $k(\mu_\theta)$, ο οποίος επηρεάζει μόνο τον όρο που αφορά στην συνεισφορά του σκυροδέματος V_c , εκφράζει τη μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω ανακύκλισης ως συνάρτηση του δείκτη πλαστιμότητας μ_Δ , και είναι ίσος με:

$$0.05 \leq k(\mu_\theta) \leq 0.28, \quad k(\mu_\theta) = \frac{1.07 - 0.115\mu_\theta}{3} \quad (2.54)$$

Η εξ.(2.53) εφαρμόστηκε και για ορθογωνικές διατομές με αντικατάσταση του όρου $0.8A_c$ με $b_w d$ (b_w : πλάτος διατομής, d : στατικό ύψος). Για διατομές αυτού του τύπου η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού, V_w , λαμβάνεται ως:

$$V_w = \rho_w b_w (d - x) f_{yw} \cot \theta \quad (2.55)$$

όπου ρ_w είναι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού. Για κυκλικές διατομές:

$$V_w = \frac{\pi A_{sw}}{2s} f_{yw} (D - c - x) \cot \theta \quad (2.56)$$

όπου A_{sw} είναι το εμβαδόν της διατομής ενός κυκλικού συνδετήρα, s η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων και c η επικάλυψη του οπλισμού. Η κλίση των θλιπτήρων του ισοδύναμου δικτυώματος λαμβάνεται ίση με $\theta=30^\circ$ στις εξ.(2.55), (2.56).

Το προσομοίωμα των εξ. (2.53)-(2.56), αναπτύχθηκε με βάση 18 δοκίμια κυκλικής διατομής που αστόχησαν σε διάτμηση μετά από καμπτική διαρροή.

Η πιο πρόσφατη σχέση της άλλης «οικογένειας» προσομοιωμάτων (π.χ. Ascheim and Moehle, 1992) είναι αυτή των Moehle et al (2001) που και αναπτύχθηκε για ορθογωνικές διατομές. Σύμφωνα με αυτή τη σχέση η συνεισφορά του αξονικού φορτίου στην διατμητική αντοχή του μέλους λαμβάνεται εντός του όρου V_c , και όχι ως ανεξάρτητος όρος όπως στην εξ.(2.53). Πιο σημαντικό είναι ότι σύμφωνα με αυτό το προσομοίωμα η μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση θεωρείται ότι επηρεάζει τόσο τον όρο V_c του σκυροδέματος όσο και τον όρο V_w του εγκάρσιου οπλισμού, με τον ίδιο συντελεστή $k(\mu_\theta)$ (Moehle κ.α. 2001):

$$V_R = k(\mu_\theta)(V_w + V_c); \quad V_c = 0.5\sqrt{f_c} \left(\sqrt{1 + \frac{N}{0.5\sqrt{f_c} A_c}} \right) A_c \frac{d}{L_s} \quad (2.57)$$

$$0.7 \leq k(\mu_\theta) \leq 1.0, \quad k(\mu_\theta) = 1.15 - 0.075\mu_\theta$$

(μονάδες: MN, m; $A_c=b_w h$: εμβαδόν διατομής). Η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού, V_w , λαμβάνεται σύμφωνα με την εξ.(2.55) με την διαφορά ότι στην θέση του όρου $(d-x)$ λαμβάνεται ο μοχλοβραχίονας $z \approx d-d' \approx 0.9d$ και η κλίση των θλιπτήρων θ λαμβάνεται $\theta=45^\circ$ (όπως και στο κλασικό προσομοίωμα δικτυώματος των Ritter-Mörsch). Για υποστυλώματα κυκλικής διατομής ο όρος V_w λαμβάνεται σύμφωνα με την εξ.(2.56) αλλά με $\theta = 45^\circ$ και αντί για $(D-c-x)$ με $(D-2c)$.

Αξιοποιώντας μία βάση δεδομένων 239 πειραμάτων (53 υποστυλώματα κυκλικής διατομής και 161 δοκοί ή υποστυλώματα ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής, 6 τοιχώματα με ορθογωνική διατομή με ή χωρίς ορθογωνικές ενισχύσεις στα άκρα της, 19 κοίλα ορθογωνικά βάρη) που αστόχησαν σε διάτμηση μετά από καμπτική διαρροή, οι Biskinis et al (2004) πρότειναν δύο νέα προσομοιώματα για τον υπολογισμό της μείωσης της διατμητικής αντοχής V_R , ως συνάρτηση του πλαστικού τμήματος του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων: $\mu_\theta^{pl} = \mu_\theta - 1$, που υπολογίζεται από το λόγο του πλαστικού

μέρους της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία (συνολική γωνία μείον γωνία στην διαρροή) προς την υπολογιζόμενη γωνία στροφής στην διαρροή θ_y σύμφωνα με τα παρακάτω. Η τιμή του θ_y υπολογίζεται από τις εξ. (2.49), που δόθηκαν ήδη στην υποενότητα 2.2.2.4. (Η εξ.(2.49) εφαρμόζεται και για υποστυλώματα κυκλικής διατομής).

Η συνεισφορά της αξονικής θλίψης N στην διατμητική αντοχή λαμβάνεται και στα δύο προσομοιώματα όπως στην εξ.(2.53) καθώς η φυσική σημασία της είναι σαφής. Αξονικός εφελκυσμός θεωρείται ότι δεν έχει επιρροή στη διατμητική αντοχή. Η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού λαμβάνεται για μεν τα μέλη ορθογωνικής διατομής κατά την εξ.(2.55), με την διαφορά ότι αντί του όρου $(d-x)$ λαμβάνεται ο μοχλοβραχίονας $z \approx d-d' \approx 0.9d$, ενώ για μέλη κυκλικής διατομής λαμβάνεται σύμφωνα με την εξ.(2.56) αλλά αντί του όρου $(D-c-x)$ λαμβάνεται ο $(D-2c)$. Όσον αφορά την κλίση των διαγώνιων θλιπτήρων, λαμβάνεται $\theta = 45^\circ$, όπως στο κλασικό προσομοίωμα δικτυώματος των Ritter-Mörsch.

Το 1^ο απ' τα δύο προσομοιώματα ακολουθεί την μορφή του προσομοιώματος των Kowalsky & Priestley 2000 ως προς το ότι μόνον ο όρος V_c λαμβάνεται να μειώνεται με την ανακύκλιση των πλαστικών παραμορφώσεων. Σε μονάδες MN και m τα προσομοίωμα αυτό είναι:

$$V_R = \frac{h-x}{2L_s} \min(N, 0.55A_c f_c) + 0.16 \cdot \left(1 - 0.095 \min(4.5, \mu_\theta^{pl})\right) \max(0.5, 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5, \frac{L_s}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \quad (2.58a)$$

Το 2^ο προσομοίωμα ακολουθεί την μορφή του προσομοιώματος των Moehle et al 2001, υπό την έννοια ότι τόσο ο όρος V_c όσο και ο V_w μειώνονται σταδιακά με την ανακύκλιση και μάλιστα με τον ίδιο ρυθμό. Έτσι, με μονάδες MN και m, έχουμε:

$$V_R = \frac{h-x}{2L_s} \min(N, 0.55A_c f_c) + \left(1 - 0.05 \min\left(5, \mu_\theta^{pl}\right)\right) \left[0.16 \max(0.5, 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5, \frac{L_s}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c + V_w\right] \quad (2.58b)$$

Από τα δύο προσομοιώματα, αυτό της εξ.(2.58b) που δέχεται μείωση όχι μόνον της συνεισφοράς του σκυροδέματος αλλά και αυτής του εγκάρσιου οπλισμού με την ανακύκλιση (όροι V_c και V_w αντίστοιχα) δίνει κάπως καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Παρόλο που τα πειραματικά δεδομένα για μεγάλες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων είναι λίγα, η διατμητική αντοχή φαίνεται να μη μειώνεται περαιτέρω για τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων μ_θ μεγαλύτερες του 5.5 έως 6. Για $\mu_\theta = 6$ κατά την εξ.(2.58b) το τμήμα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στο σκυρόδεμα και στον εγκάρσιο οπλισμό (όρος V_c και V_w) έχει μειωθεί με την ανακύκλιση στο 75% της αρχικής

τιμής (για $\mu_\theta=1$), ενώ, αν ληφθεί ότι μόνο ο όρος V_c μειώνεται με το μ_θ (εξ.(2.58a)), το μειωμένο V_c δεν υπολείπεται του 57% της αρχικής τιμής.

Η συμφωνία που επιτυγχάνουν τα δύο προσομοιώματα των εξ.(2.58) που αναπτύχθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ καλύτερη από την αντίστοιχη προηγούμενων προσομοιωμάτων (δηλαδή των Kowalsky and Priestley, 2000 και Moehle et al 2001), τα οποία είχαν προσαρμοστεί σε πολύ λιγότερα δεδομένα και σε μέλη είτε μόνο κυκλικής είτε μόνο ορθογωνικής διατομής. Τα παλαιότερα προσομοιώματα δίνουν καλή συμφωνία κατά μέσο όρο για τις διατομές για τις οποίες αναπτύχθηκαν, με μεγαλύτερη όμως διασπορά τιμών από τα δύο προσομοιώματα των εξ.(2.58) αλλά ασυμφωνία για διατομές του άλλου τύπου.

Η ευαισθησία της διατμητικής αντοχής στις πλαστικές μετακινήσεις δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει την αντιστροφή των προτεινόμενων προσομοιωμάτων για τον προσδιορισμό της ικανότητας παραμόρφωσης μελών ΟΣ που αστοχούν σε διάτμηση μετά από καμπτική διαρροή. Λόγω της μεγάλης διασποράς τιμών η πρόβλεψη που προκύπτει από την αντιστροφή δεν έχει πρακτική χρησιμότητα.

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.3.2.1, η πρόσφατη γενιά Ευρωπαϊκών κανονισμών (ο CEB/FIP Model Code 90 και ο Ευρωκώδικας 2: EN1992-1-1:2003) υιοθετεί το προσομοίωμα της μεταβλητής κλίσης των διαγώνιων θλιπτήρων για την διατμητική αντοχή των μελών (τη «γενική» μέθοδο της παρ. 11.2.5 του ΕΚΟΣ 2000). Σε αυτή τη θεώρηση δεν υπάρχει όρος V_c για τη συνεισφορά του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή, και η διαφορά μεταξύ της διατμητικής αντοχής V_R και αυτής που οφείλεται στον εγκάρσιο οπλισμό, V_w , κατά το κλασικό προσομοίωμα δικτυώματος των Ritter-Mörsch με κλίση 45° , καλύπτεται θεωρώντας κλίση θ των διαγώνιων θλιπτήρων μικρότερη των 45° .

Για λόγους συμβατότητας με το παραπάνω πλαίσιο Ευρωπαϊκών κανονισμών, η πρόσφατη (2003) έκδοση του Ευρωκώδικα 8 για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό (EN1998-1:2003) δεν περιλαμβάνει όρο V_c . Περιέχει μόνο όρο V_w σύμφωνα με τις εξ.(2.55) και (2.56), με κλίση των διαγώνιων θλιπτήρων που λαμβάνει τιμές διάφορες των 45° , αλλά όχι πάντα τόσο χαμηλές (22°) όπως στον Ευρωκώδικα 2 για μονοτονική φόρτιση. Συγκεκριμένα, δοκοί κτιρίων ΟΣ Υψηλής Κατηγορίας Πλαστιμότητας (DC H), οι οποίες σχεδιάζονται για τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων μεταξύ 5 και 6, πρέπει να υπολογίζονται με $\theta = 45^\circ$. Υποστυλώματα και τοιχώματα της Υψηλής Κατηγορίας Πλαστιμότητας, καθώς και οποιαδήποτε μέλη Μέσης Κατηγορίας Πλαστιμότητας (DC M) – τα οποία σχεδιάζονται για συντελεστές πλαστιμότητας μετακινήσεων μεταξύ 3 και 4 –, μπορούν να υπολογισθούν σε διάτμηση με κλίση θ των διαγώνιων θλιπτήρων έως και 22° ($\cot\theta=2.5$).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των εξ.(2.58) μπορούν να αξιοποιηθούν και για τον υπολογισμό της απαιτούμενης κλίσης των θλιβόμενων διαγωνίων σύμφωνα με το προσομοίωμα μεταβλητής κλίσης διαγωνίων, για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ως συνάρτηση του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_θ . Προκύπτει έτσι μία τάση της κλίσης των διαγώνιων θλιπτήρων θ να αυξάνει κατά μέσο όρο με το μ_Δ , από τιμές μικρότερες απ' το όριο των 22° του Ευρωκώδικα 2 για $\mu_\theta = 1$, μέχρι τιμές γύρω στο $\theta = 45^\circ$ για μ_θ περίπου 7. Επειδή όμως αυτή η προσέγγιση αγνοεί την επιρροή σημαντικών παραμέτρων, όπως τα L_s/h , f_c και ρ_{tot} (που έχουν επιρροή στον όρο V_c της συνεισφοράς του σκυροδέματος στις εξ.(2.53), (2.57), (2.58)), η διασπορά των τιμών είναι πολύ μεγάλη. Το κάτω όριο του 5% των τιμών ξεκινάει απ' το όριο των 22° του Ευρωκώδικα 2 για $\mu_\theta=1$ και καταλήγει σε $\theta = 45^\circ$ για $\mu_\theta=2.5$. Αυτή η γραμμή θα πρέπει να θεωρείται ως ένα πολύ συντηρητικό κάτω όριο για τις ανάγκες του σχεδιασμού.

Ετσι δεν έχει νόημα η προσπάθεια για την εξαγωγή σχέσης που να συνδέει την κλίση των διαγώνιων θλιπτήρων θ με την πλαστιμότητα μετακινήσεων μ_θ . Το συμπέρασμα είναι ότι ενώ για μονοτονική φόρτιση το προσομοίωμα της μεταβλητής κλίσης των διαγώνιων θλιπτήρων είναι ικανοποιητικό, για σεισμικά φορτία είναι προτιμότερη η χρήση του κλασικού προσομοιώματος δικτυώματος με κλίση των 45° , σε συνδυασμό με όρο V_c ο οποίος εξαρτάται από τον δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων. Δηλαδή, η προσέγγιση της διατμητικής αντοχής μελών στα πλαίσια που προτείνουν οι Ευρωκώδικες με εφαρμογή του προσομοιώμα μεταβλητής κλίσης των διαγώνιων θλιπτήρων χωρίς όρο V_c , δεν δίνει καλά αποτελέσματα για σχεδιασμό έναντι σεισμικής δράσης. Το κλασικό προσομοίωμα δικτυώματος με κλίση 45° των διαγώνιων σε συνδυασμό με όρο V_c που εξαρτάται από τον δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων οδηγεί σε πιο επιτυχή σχεδιασμό μελών ΟΣ σε διάτμηση λόγω σεισμικής δράσης.

Οι εξ.(2.53), (2.57), (2.58) δείχνουν ότι η συμβολή του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή είναι ανάλογη της ρίζας του f_c , που είναι με τη σειρά της περίπου ανάλογη με την εφελκυστική αντοχή, f_{ct} του όρου V_c κατά τον ΕΚΟΣ 2000 (εξ.(2.35)). Επιπλέον, στις εξ.(2.53), (2.58) η συμβολή του σκυροδέματος στην αντοχή σε τέμνουσα λαμβάνεται να αυξάνεται με το ποσοστό διαμήκους χάλυβα, όπως δηλαδή και στην εμπειρική σχέση του ΕΚΟΣ 2000, εξ.(2.35).

Για $\mu_\theta=1$, οι εξ.(2.53), (2.57), (2.58) δίνουν αποτελέσματα παρόμοια με την τιμή του V_c κατά την εξ.(2.50). Οι απλοί κανόνες του Ευρωκώδικα 8 και του ΕΚΟΣ 2000 για τη μείωση της συμβολής του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή στις κρίσιμες περιοχές δοκών,

υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων είναι ποιοτικά συμβατοί με τα ανωτέρω προσομοιώματα. Απλώς οι προβλέψεις τους φαίνεται να είναι πολύ συντηρητικές (ιδίως αυτές του ΕΚΟΣ 2000).

2.2.3.2.3. Αστοχία τοιχωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη διάτμηση λόγω λοξής θλίψης στον κορμό

Η μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση της έντασης κατά την προηγούμενη Υποενότητα 2.2.3.2.2 αναφερόταν στο μηχανισμό διατμητικής αντοχής που προέρχεται από τους συνδετήρες και την αξονική δύναμη, με συμπληρωματική συμβολή του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης, της δράσης βλήτρου και της αλληλοεμπλοκής αδρανών κατά μήκος των λοξών ρωγμών. Επιπλέον αφορούσε μόνο την περιοχή πλαστικών αρθρώσεων σε άκρα μελών που διαρρέουν σε κάμψη.

Τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος σπανίως αστοχούν διατμητικά λόγω διαρροής των συνδετήρων μετά την καμπτική διαρροή. Γι' αυτό και στα πειραματικά δεδομένων με βάση τα οποία αναπτύχθηκαν οι εξ.(2.58) υπάρχουν μόνο 6 πειράματα σε τοιχώματα (βεβαίως, και τα 19 βάρη κοίλης ορθογωνικής διατομής έχουν διατμητική συμπεριφορά παρόμοια με τοιχωμάτων διατομής διπλού-T). Η διατμητική αστοχία τοιχωμάτων συμβαίνει συχνότερα λόγω αστοχίας του κορμού τους σε λοξή (διαγώνια) θλίψη. Το ενδεχόμενο αυτό είναι πιο πιθανό σε τοιχώματα με χαμηλό λόγο διάτμησης, καθώς και σε τοιχώματα με ισχυρά πέλματα (με διατομή T, ή διπλού-T), ή που καταλήγει σε ισχυρά υποστύλωματα με πλάτος αρκετά μεγαλύτερο αυτού του κορμού).

Πειραματικά αποτελέσματα από 45 τοιχώματα που αστόχησαν υπό ανακυκλιζόμενη διάτμηση λόγω λοξής θλίψης του κορμού έδειξαν ότι η διατμητική αντοχή, V_R , του τοιχώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη, $V_{R,max}$, η οποία, υπό ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις, ελαστικές ή μετελαστικές, δίνεται από τη σχέση (μονάδες: MN, m):

$$V_{R,max} = 0.85 \left(1 - 0.06 \min \left(5, \mu_{\theta}^{pl} \right) \right) \left(1 + 1.8 \min \left(0.15, \frac{N}{A_c f_c} \right) \right) \left(1 + 0.25 \max \left(1.75, 100 \rho_{tot} \right) \right) \left(1 - 0.2 \min \left(2, \frac{L_s}{h} \right) \right) \sqrt{f_c (MPa)} b_w z \quad (2.59)$$

Επισημαίνεται ότι, σε αντίθεση με τις εξ.(2.58) που αφορούν τη διατμητική αντοχή της πλαστικής άρθρωσης μετά την καμπτική διαρροή, η εξ.(2.59) ισχύει και πριν την καμπτική διαρροή: 10 από τα 45 τοιχώματα αστόχησαν λόγω διαγώνιας θλίψης προτού σχηματισθεί πλαστική άρθρωση σε κάμψη. Η τιμή της $V_{R,max}$ πριν την καμπτική διαρροή υπολογίζεται από την Εξ. (2.59) με $\mu_{\theta}^{pl}=0$.

Σημειώνεται ότι η εξ.(2.59) δίνει πολύ χαμηλές τιμές της διατμητικής αντοχής σε σύγκριση με την τιμή της $V_{R,max}$ κατά τον Ευρωκώδικα 2 (που αντιστοιχεί στη $V_{Rd,2}$ του ΕΚΟΣ 2000): Για το λόγο αυτό ο Ευρωκώδικας 8 μειώνει την τιμή της $V_{R,max}$ τοιχωμάτων Κατηγορίας Πλαστιμότητας Υψηλής (DC H) στο 40% της τιμής που δίνει ο Ευρωκώδικας 2 για τη διατμητική αντοχή λόγω διαγώνιας θλίψης στον κορμό υπό μονοτονική φόρτιση.

2.2.3.3 Στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης

Υποστυλώματα με μικρό καθαρό ύψος και δοκοί με μικρό καθαρό άνοιγμα σε σχέση με το ύψος h της διατομής τους καθώς και τοιχώματα με χαμηλό ύψος H_w (συνολικό και όχι μεταξύ ορόφων) σε σύγκριση με τη μεγάλη διάσταση της διατομής τους, L_w , έχουν μικρό λόγο διάτμησης, M/Vh . Ο σεισμός προκαλεί σε τέτοιες δοκούς και υποστυλώματα περίπου αντιμετρική κάμψη, δηλαδή ίσες και αντίθετες ροπές στα δύο άκρα (σε δοκούς μικρού μήκους η λόγω κατακορύφων φορτίων ένταση είναι ασήμαντη μπροστά στη σεισμική). Έτσι ο λόγος διάτμησης τους, M/Vh , ισούται με $L/2h$ και το μήκος διάτμησης L_s με $L/2$. Στα κοντά τοιχώματα η τυχόν σύνδεση με δοκούς ελάχιστα επηρεάζει το διάγραμμα ροπών και ο λόγος διάτμησης κυμαίνεται μεταξύ $0.5H_w/L_w$ και $2/3H_w/L_w$.

Για δεδομένη διατομή και διαμήκεις οπλισμούς και επομένως για δεδομένη ροπή αντοχής, η τέμνουσα αυξάνεται με τη μείωση του λόγου διάτμησης και τείνει να γίνει καθοριστική της τελικής αστοχίας του μέλους. Περαιτέρω, σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης δεν μπορεί να ξεχωρίσουν κάποιες ακραίες περιοχές όπου κυριαρχεί η κάμψη από το σύνολο του μήκους που καταπονείται από τη (σταθερή κατά μήκος) τέμνουσα. Μάλιστα, αν αγνοήσει κανείς το ότι το μικρό τους μήκος (διάτμησης) δημιουργεί αμφιβολίες για το αν ισχύει η υπόθεση επιπεδότητας διατομών και εφαρμόσει τις γνωστές σχέσεις για την κάμψη, θα οδηγηθεί σε παράδοξα συμπεράσματα: Επί παραδείγματι, η γνωστή σχέση: $F_t = M/z + 0,5V \cot \theta$ για τη δύναμη του εφελκόμενου χάλυβα δίνει ως αποτέλεσμα (θεωρώντας ότι η συνήθης ριπδοειδής λοξή ρηγμάτωση και διάταξη του θλιπτικού πεδίου τάσεων της ακραίας περιοχής φθάνει μέχρι το μέσο του μήκους L , οπότε μέχρις εκεί η $\cot \theta$ ισούται με την απόσταση από την ακραία διατομή δια z), ότι η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα μηδενίζεται όχι στο μέσο του μήκους L αλλά στην απέναντι ακραία διατομή. Το συμπέρασμα αυτό είναι ασυμβίβαστο με τις θλιπτικές τάσεις που δίνει στη διατομή αυτή για τον οπλισμό η υπόθεση επιπεδότητας διατομών. Επίσης, το καθαρό μήκος L ενός κοντού στοιχείου είναι συχνά μικρό σε σχέση με το μήκος αγκύρωσης και δεν επαρκεί για να μειωθεί μέσω συνάφειας η τάση των οπλισμών από f_y στο ένα άκρο σε μηδέν (ή και σε θλιπτική) τάση στο άλλο.

Τα Σχήματα 1.1(γ) και 1.1(δ) του κεφαλαίου 1 δείχνουν την τυπική συμπεριφορά

στοιχείων με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2,0 σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα. Σε μονοτονική φόρτιση η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης φθάνει στην κορυφή της (στην οριακή αντοχή) σύντομα αφότου καμπυλωθεί. Ακολουθεί κατόπιν ένα σχετικά απότομο φθίνοντα κλάδο. Δηλαδή η παραμόρφωση αστοχίας είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την παραμόρφωση “διαρροής” και ο διαθέσιμος δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων ή γωνιών στροφής δεν ξεπερνά κατά πολύ το 1,0. Σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση οι βρόχοι υστέρησης είναι στενοί, με έντονη στένωση (σχήμα ανάποδου S) και τάση συρρίκνωσης και κατάρρευσης με την επανάληψη των κύκλων, ιδίως αν η μέγιστη παραμόρφωση ξεπεράσει αυτήν που αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή (κορυφή του διαγράμματος) σε μονοτονική φόρτιση. Είναι λοιπόν προφανές ότι τα στοιχεία αυτά έχουν ψαθυρή συμπεριφορά και επομένως πρέπει η απόκρισή τους στο σεισμό να διατηρείται στην ελαστική περιοχή. Για το λόγο αυτό μας ενδιαφέρει η αντοχή τους και όχι η (ασήμαντη) ικανότητα παραμόρφωσης τους.

Σε στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης οι μηχανισμοί μεταφοράς δυνάμεων με κάμψη και με διάτμηση ταυτίζονται ουσιαστικά σε έναν, στον οποίο κυρίαρχο ρόλο παίζει η λοξή θλίψη του σκυροδέματος. Χρήσιμο σημείο εκκίνησης για την κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων και του τρόπου αστοχίας είναι το προσομοίωμα των Οδηγιών του Ιαπωνικού Ινστιτούτου Αρχιτεκτόνων για τη διατμητική αντοχή. Επισημαίνεται όμως ότι στο προσομοίωμα αυτό εντοπίζονται ατέλειες ως προς τα εξής:

- α) θεωρεί ότι ο λοξός θλιπτήρας σκυροδέματος καταλαμβάνει πάντοτε το 50% του ύψους h της διατομής,
- β) αθροίζει απευθείας τις τάσεις του λοξού θλιπτήρα με αυτές του θλιπτικού πεδίου σκυροδέματος, παρ' ότι δρουν υπό διαφορετικές γωνίες, φ και θ αντίστοιχα, και
- γ) αγνοεί την επιρροή της αξονικής δύναμης.

Ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να συγκρατήσει κανείς από το προσομοίωμα αυτό είναι ότι ο διαγώνιος θλιπτήρας σκυροδέματος που ενώνει τις θλιβόμενες ζώνες στις δύο ακραίες διατομές μεταφέρει ένα τμήμα της τέμνουσας μέσω της κλίσης του προς τον άξονα (πρβλ. και όρο $N(h-x)/2L_s$ στις εξ. (2.53), (2.58)). Το υπόλοιπο αναλαμβάνεται από το γνωστό ισοδύναμο δικτύωμα που σχηματίζουν: οι συνδετήρες, τα δύο πέλματα (εφελκόμενο και θλιβόμενο) και το λοξό θλιπτικό πεδίο σκυροδέματος υπό γωνία θ . Επειδή δε η τέμνουσα που μεταφέρεται από το διαγώνιο θλιπτήρα ισούται με την παράλληλη στον άξονα δύναμη της θλιβόμενης ζώνης της ακραίας διατομής επί την κλίση του θλιπτήρα προς τον άξονα, $\tan\varphi$, που είναι περίπου ανάλογη του h/L_s , όσο μειώνεται ο λόγος διάτμησης L_s/h , τόσο αυξάνεται η συμβολή του θλιπτήρα στην ανάληψη της τέμνουσας. Η λόγω θλιπτήρα

τέμνουσα αυξάνεται επίσης και με τη δύναμη της θλιβόμενης ζώνης, δηλαδή με το μέγεθος της αξονικής θλίψης N . Αυτή όμως συμβάλλει και στην αστοχία του στοιχείου λόγω (λοξής) τάσης θλίψης του σκυροδέματος, ξεκινώντας από τις περιοχές όπου αυτή η τάση είναι μέγιστη, δηλαδή από τις θλιβόμενες ζώνες των δύο ακραίων διατομών.

Το προσομοίωμα των Οδηγιών του Ιαπωνικού Αρχιτεκτονικού Ινστιτούτου (AIJ) για τη διατμητική αντοχή στοιχείων με μεσαίο ή υψηλό λόγο διάτμησης μπορεί να γενικευθεί και γι' αυτά με χαμηλό L_s/h , ώστε να λάβει υπόψη:

- α) την αξονική δύναμη N (θετική για θλίψη).
- β) λοξό θλιπτήρα που να περιορίζεται στο ύψος x της θλιβόμενης ζώνης των δύο ακραίων διατομών, αντί στο $0,5h$. Η κλίση του ως προς τον άξονα είναι $\tan\phi=(h-x)/L=(h-x)/2L_s$ και το πλάτος του ισούται με $\chi\cos\phi$.

Όπως και στο προσομοίωμα των Ιαπωνικών Οδηγιών το στοιχείο θεωρείται ότι αστοχεί εξαιτίας του αθροίσματος:

- α) της ορθής θλιπτικής τάσης σκυροδέματος του λοξού θλιπτήρα (θεωρούμενης ομοιόμορφης στο πλάτος $\chi\cos\phi$ ακόμα και στις ακραίες διατομές) και
- β) αυτής του ισοδύναμου δικτύωματος που δρα υπό γωνία θ ως προς τον άξονα και κατανέμεται ομοιόμορφα στο σύνολο της απόστασης $z=\zeta h$ των πελμάτων του στοιχείου.

Αγνοείται η διαφορά κλίσης των δύο αυτών συστημάτων τάσεων και η αστοχία θεωρείται ότι συμβαίνει, όταν το άθροισμά τους φθάσει ένα ποσοστό n της f_c . Το n μπορεί να ληφθεί ίσο με το μειωτικό συντελεστή της αντοχής λόγω εγκάρσιου εφελκυσμού κατά τον Ευρωκώδικα 2, τον ΕΚΟΣ 2000 ή το Model Code 90. Για την εκτίμηση της αντοχής του στοιχείου για δεδομένες αντοχές υλικών, η τιμή του n κατά τον ΕΚΟΣ 2000 ή το Model Code 90 χρειάζεται να διαιρεθεί με το γνωστό συντελεστή 0,85.

Με τις υποθέσεις αυτές προκύπτουν τα εξής για την καμπτοδιατμητική αντοχή του στοιχείου με άνοιγμα διάτμησης L_s :

Στο διάστημα τιμών της N :

$$N_1=0,5bhnf_c-A_{s,tot}f_y+\rho_w b_w f_{yw}[\cot\theta(2L_s+(z-0,5h)\cot\theta)-0,5h] \leq N \leq N_2=0,5bhnf_c+A_{s,tot}f_y-\rho_w b_w f_{yw}[\cot\theta(2L_s-(z-0,5h)\cot\theta)+0,5h] \quad (2.60)$$

η διατμητική αντοχή είναι ανεξάρτητη της N και της συνολικής διατομής $A_{s,tot}$ του διαμήκους οπλισμού. Δίνεται δε από την εξ.(2.51) με τιμή της $\tan\phi$:

$$\tan\phi = \sqrt{\left(\frac{2L_s}{h}\right)^2 + 1} - \frac{2L_s}{h} \quad (2.61)$$

Σ' αυτό το διάστημα τιμών της N η αστοχία είναι ψαθυρή, γιατί παράλληλα με τη διαρροή

των συνδετήρων αστοχεί μόνο το σκυρόδεμα, ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί παραμένουν ελαστικοί.

$$\text{Για: } N_1 \geq N \geq -A_{s,\text{tot}}f_y \quad (2.62)$$

η αντοχή είναι:

$$V_u = (N + A_{s,\text{tot}}f_y)\tan\phi + \rho_w f_{yw} b_w \cot\theta [z - (2L_s + z \cot\theta)\tan\phi] \quad (2.63)$$

$$\text{με: } \tan\phi = \min\left(\sqrt{\left(\frac{L_s}{\eta h}\right)^2 + \frac{1-\eta}{\eta}} - \frac{L_s}{\eta h}, \frac{h}{2L_s}\right) \quad (2.64)$$

$$\text{όπου: } \eta = \frac{N + A_{s,\text{tot}}f_y - \rho_w f_{yw} b_w (2L_s + z \cot\theta)\cot\theta}{b_w h (nf_c - \rho_w f_{yw} (1 + \cot^2\theta))} \quad (2.65)$$

Στο διάστημα αυτό της N η αστοχία του σκυροδέματος και η διαρροή των συνδετήρων συνοδεύεται από διαρροή του οπλισμού του εφελκόμενου πέλματος και είναι περισσότερο πλάστιμη.

$$\text{Για: } nf_c b_w h + A_{s,\text{tot}}f_y \geq N \geq N_2 \quad (2.66)$$

η αντοχή είναι:

$$V_u = (N - A_{s,\text{tot}}f_y)\tan\phi + \rho_w f_{yw} b_w \cot\theta [z + (2L_s - z \cot\theta)\tan\phi] \quad (2.67)$$

με $\tan\phi$ πάλι από την εξ.(2.64) αλλά με:

$$\eta = \frac{(N - A_{s,\text{tot}}f_y) + \rho_w f_{yw} b_w (2L_s - z \cot\theta)\cot\theta}{b_w h (nf_c - \rho_w f_{yw} (1 + \cot^2\theta))} \quad (2.68)$$

Εδώ η αστοχία είναι κάπως λιγότερο ψαθυρή απ' ό,τι στο διάστημα της εξ.(2.60), καθότι διαρρέει επίσης και ο οπλισμός θλιβόμενου πέλματος.

Το άνω όριο για την $\cot\theta$ είναι πάλι: $\cot\theta \leq (nf_c/\rho_w f_{yw} - 1)^{1/2}$. Κοντά στη φυσική εικόνα της ρηγμάτωσης είναι η επιλογή $\cot\theta = L_s/h$. Σημειωτέον ότι η περιοχή της σταθερής διατμητικής αντοχής κατά τις εξ.(2.51), (2.60) υπάρχει εφόσον $N_2 > N_1$, που σημαίνει:

$$\cot\theta \leq \frac{\omega_{\text{tot}}}{\omega_w} \frac{h}{2L_s} \quad (2.69)$$

Δεδομένου ότι η ροπή M στις ακραίες διατομές ισούται με $M = VL_s$, οι εξ.(2.51) και (2.60)-(2.68) μπορούν να μετασχηματισθούν σε διαγράμματα αλληλεπίδρασης μεταξύ αδιάστατης ροπής: $\mu = M/bh^2 f_c = (V/bhf_c)(L_s/h)$ και αξονικής: $\nu = N/bhf_c$. Για υψηλές τιμές του L_s/h , το διάγραμμα μ - ν τείνει ασυμπτωτικά σε ένα απλοποιημένο διγραμμικό διάγραμμα που δίνεται από τις σχέσεις:

$$\mu = 0,5\zeta(\nu + \omega_{\text{tot}}) \quad \text{για} \quad 0,5n > \nu \geq -\omega_{\text{tot}} \quad (2.70a)$$

$$\mu = 0,5\zeta(n + \omega_s - \nu) \quad \text{για} \quad n + \omega_{\text{tot}} \geq \nu \geq 0,5n \quad (2.70b)$$

Η διατμητική αντοχή, V_R , κοντού υποστυλώματος με λόγο διάτμησης $L_s/h \leq 2.0$ δεν μπορεί να ξεπεράσει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος κατά τη διαγώνιο του στοιχείου, $V_{R,max}$, η οποία, υπό ανακυκλιζόμενες μετελαστικές παραμορφώσεις, μειώνεται με το μέγεθος του πλαστικού τμήματος του δείκτη πλαστιμότητας γωνίας στροφής χορδής, $\mu_\theta^{pl} = \mu_\theta - 1$, ως (μονάδες: MN, m):

$$V_{R,max} = \frac{4}{7} \left(1 - 0.02 \min(5, \mu_\theta^{pl}) \right) \left(1 + 1.35 \frac{N}{A_c f_c} \right) \left(1 + 0.45 (100 \rho_{tot}) \right) \sqrt{\min(40, f_c \text{ (MPa)})} b_w z \sin 2\phi \quad (2.71)$$

όπου ϕ η γωνία της διαγωνίου του στοιχείου ως προς τον άξονά του: $\tan\phi = h/(2L_s)$.

Η εξ.(2.71) αναπτύχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα 44 υποστυλωμάτων με λόγο διάτμησης $L_s/h \leq 2$, τα οποία αστόχησαν από θλίψη κατά την ανωτέρω διαγώνιο. Επισημαίνεται ότι ενώ, όπως και η εξ.(2.59), η εξ.(2.71) αφορά μόνον ανακυκλιζόμενη τέμνουσα (όχι μονοτονική), σε αντίθεση με την εξ.(2.59), που ισχύει και πριν τη καμπτική διαρροή, η εξ.(2.71) αφορά κοντά υποστυλώματα που έχουν ήδη διαρρεύσει από το συνδυασμό M-N-V.

Επειδή τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης υποφέρουν και αστοχούν κυρίως κατά τη διαγώνιο, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα η όπλισή τους με χιαστί δισδιαγώνιο οπλισμό διατομής A_{sd} ανά διεύθυνση, σε μερική αντικατάσταση ή συμπλήρωση του συμβατικού διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού. Ο οπλισμός αυτός αναλαμβάνει εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις κατά τη διεύθυνσή του, αυξάνοντας την αντοχή σε τέμνουσα κατά:

$$V_d = 2A_{sd}f_y \sin\phi \quad (2.72a)$$

και την αντίστοιχη ροπή αντοχής κατά:

$$M_d = zA_{sd}f_y \cos\phi \quad (2.72b)$$

όπου z η απόσταση μεταξύ των οπλισμών αυτών στην ακραία διατομή και:

$$\phi = \arctan(z/L) = \arctan(z/2L_s) \quad (2.73)$$

η γωνία που σχηματίζουν αυτοί ως προς τον άξονα του μέλους.

Η τοποθέτηση δισδιαγώνιων οπλισμών είναι σχετικά εύκολη σε κοντές δοκούς (π.χ. σε δοκούς σύζευξης τοιχωμάτων), ή ακόμα και σε τοιχώματα (όπου αποτρέπουν κυρίως τη διατμητική ολίσθηση στη βάση και μπορεί να μη διατάσσονται χιαστί στον όροφο, αλλά να

τέμνονται στο κέντρο της διατομής βάσης σχηματίζοντας V). Είναι όμως δυσχερές η τοποθέτησή τους σε υποστυλώματα που έχουν πολλαπλούς συνδετήρες και/ή σ' αυτά που χρειάζονται χιαστί οπλισμούς και κατά τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Σε υποστυλώματα που είναι κοντά μόνον προς τη μία οριζόντια διεύθυνση (π.χ. αν σ' αυτήν εφάπτονται κατά τμήμα μόνον του ύψους τους με τοίχο, ιδίως αν αυτό συμβαίνει και στις δύο απέναντι πλευρές του υποστυλώματος), έχει νόημα να τοποθετηθούν μόνο σ' αυτήν χιαστί οπλισμοί κατά τις διαγωνίους του τμήματος όπου το υποστυλώμα είναι κοντό.

Η σημαντικότερη βελτίωση της συμπεριφοράς λόγω των δισδιαγωνίων οπλισμών είναι όχι στην αντοχή αλλά στην πλαστιμότητα, την ικανότητα παραμόρφωσης και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Οι οπλισμοί αυτοί προσδίδουν στο στοιχείο χαρακτηριστικά πλαστιμότητας και (υστερητικής) απορρόφησης ενέργειας που θυμίζουν αυτά του χάλυβα, αλλά και της κάμψης μελών με υψηλό λόγο διάτμησης. Η παραμόρφωση αστοχίας του δισδιαγώνια οπλισμένου στοιχείου φαίνεται να καθορίζεται κυρίως απ' αυτήν της (εκάστοτε) θλιβόμενης διαγωνίου του: η γωνία στροφής χορδής του μέλους στην αστοχία, θ_u , είναι περίπου ίση με τη βράχυνση της θλιβόμενης διαγωνίου στην αστοχία, ϵ_u , δια $\sin\phi\cos\phi$, δηλαδή επί $(L/z+z/L)$. Για αύξηση της ϵ_u , είναι σκόπιμη, εάν είναι εφικτή, η διάταξη των δισδιαγωνίων οπλισμών με μορφή καλά περισφιγμένων κρυφών υποστυλωμάτων. Στα υποστυλώματα αυτά, που έχουν πλάτος όσο και το στοιχείο, διατάσσονται τέσσερις γωνιακές ράβδοι που περιβάλλονται από πυκνούς συνδετήρες, οι οποίοι συγκρατούν τις ράβδους έναντι λυγισμού και περισφίγγουν το σκυρόδεμα.

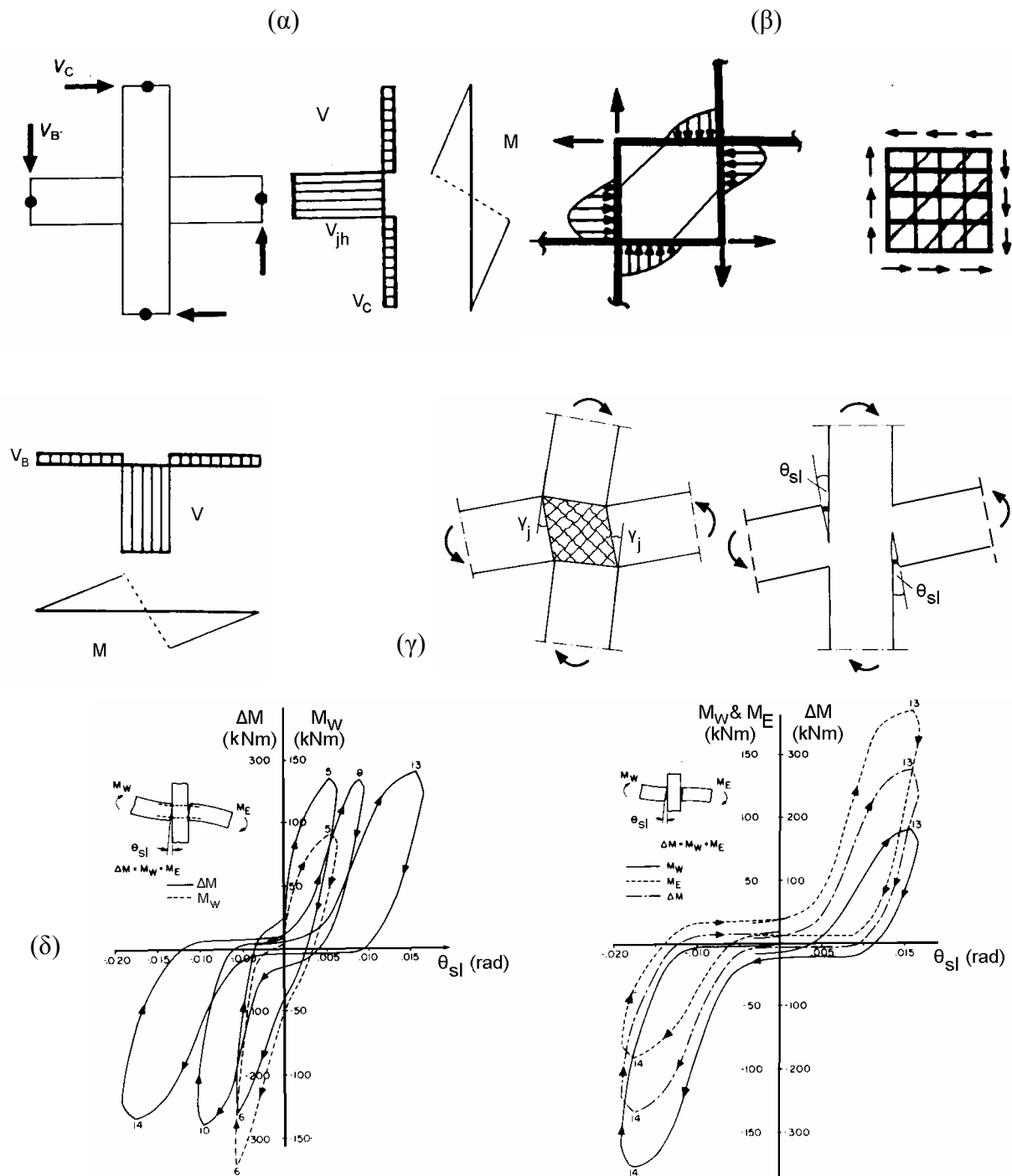
Στις εμπειρικές σχέσεις που παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.3.2 για τη γωνία στροφής χορδής στην αστοχία του μέλους, λαμβάνεται υπόψη η θετική επιρροή του δισδιαγώνιου οπλισμού, ανάλογα με το ποσοστό του.

2.3 ΚΟΜΒΟΙ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.3.1 ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΚΟΜΒΟΥΣ

Στον πυρήνα των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων (ή γενικότερα μεταξύ οριζοντίων και κατακορύφων στοιχείων) αναπτύσσεται λόγω της σεισμικής δράσης πολύ υψηλή διατμητική ένταση. Το μεγάλο μέγεθος της έντασης αυτής είναι σαφές από το Σχήμα 2.22(α): Αν θεωρηθεί ο κόμβος ως τμήμα του υποστυλώματος μέσα στο ύψος του (δηλαδή στο ύψος h_b της δοκού), τότε στο τμήμα αυτό μεταβάλλεται η ροπή του υποστυλώματος από θετική, π.χ. στην κορυφή του κάτω υποστυλώματος, σε αρνητική στη βάση του πάνω. Αν θεωρηθεί πάλι

ο κόμβος ως τμήμα της δοκού, τότε μέσα στο πλάτος του (δηλαδή στη διάσταση ύψους h_c της διατομής του υποστυλώματος) μεταβάλλεται η ροπή κάμψης από θετική στη μία πλευρά στήριξης της δοκού στον κόμβο, σε αρνητική στην απέναντι. Αυτό σημαίνει ότι αναπτύσσεται μέσα στο σώμα του κόμβου:



Σχήμα 2.22 Εσωτερικός κόμβος δοκών-υποστυλώματος: (α) διατημητική ένταση κόμβου, (β) μηχανισμός διατημητικής αντοχής, (γ) παραμορφώσεις κόμβου, (δ) πειραματικοί βρόχοι ροπής-γωνίας στροφής λόγω ολίσθησης ράβδων

- μία “οριζόντια τέμνουσα δύναμη”, V_{jh} , ίση περίπου με τη μέση σεισμική τέμνουσα V_C του υποστύλωματος πάνω και κάτω από τον κόμβο, επί το λόγο του καθαρού ύψους ορόφου h_{stin} προς το h_b , και
- μία κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη, V_{jv} , ίση περίπου με τη σεισμική τέμνουσα V_b των εκατέρωθεν δοκών επί το μέσο καθαρό άνοιγμά τους, L_{bn} , δια του h_c .

Αν υποθεθεί ότι ο κόμβος αποτελείται από ομοιογενές υλικό, αυτές οι τέμνουσες προκαλούν στον πυρήνα του κόμβου ονομαστικές διατμητικές τάσεις σε οριζόντια και σε κατακόρυφα επίπεδα, ίσες (περίπου) με το άθροισμα των σεισμικών ροπών στη δοκό ή στο υποστύλωμα, $\Sigma M_c = \Sigma M_b$, προς τον όγκο (του πυρήνα) του κόμβου.

Το μεγαλύτερο τμήμα των δυνάμεων που δημιουργούν τη διατμητική ένταση εισέρχονται στον πυρήνα του κόμβου μέσω τάσεων συνάφειας των ράβδων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την οριζόντια τέμνουσα V_{jh} και τις (άνω κυρίως) ράβδους της δοκού, καθότι η διαρροή των δοκών πριν τα υποστυλώματα (ως αποτέλεσμα του ικανοτικού σχεδιασμού) και η απουσία αξονικής θλίψης οδηγούν σε διαρροή τους σε εφελκυσμό στη μία πλευρά του κόμβου, με ταυτόχρονη ανάληψη του συνόλου σχεδόν της δύναμης του θλιβόμενου πέλματος στην απέναντι, καθότι εκεί η ρωγή παραμένει ανοικτή (βλ. Σχήμα 2.6 και υποενότητα 2.2.2.2, σημείο 2). Έτσι ο κόμβος μπορεί να θεωρηθεί ως εν σειρά σύστημα δύο μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων:

- με συνάφεια από τις ράβδους στον πυρήνα του κόμβου και αντίστροφα και
- με διάτμηση από τη μία πλευρά του κόμβου στην απέναντι (Σχήμα 2.22(β)).

Αυτό σημαίνει ότι:

- όταν ο ένας από τους δύο μηχανισμούς φθάσει την οριακή του αντοχή, το ίδιο συμβαίνει και για τον κόμβο και
- οι συνολικές παραμορφώσεις του κόμβου ισούνται με το άθροισμα αυτών που οφείλονται στους δύο επιμέρους μηχανισμούς (Σχήμα 2.22(γ)).

2.3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΟΜΒΟ ΜΕ ΣΥΝΑΦΕΙΑ

Αντίθετα με το τι συμβαίνει στο καθ' εαυτό μήκος των δοκών ή των υποστυλωμάτων, όπου η αστοχία της συνάφειας εκδηλώνεται με διάρρηξη της επικάλυψης σκυροδέματος κατά μήκος της ράβδου, στους κόμβους αυτή εκδηλώνεται με σημαντική ολίσθηση των ράβδων ως προς τον πυρήνα του κόμβου. Λόγω της υψηλής εσωτερικής και εξωτερικής υπερστατικότητας του κόμβου, το μέγεθος της ολίσθησης είναι πεπερασμένο και περιορισμένο, εκδηλώνεται δε εξωτερικά ως συγκεντρωμένη γωνία στροφής, θ_{sl} , της ακραίας

διατομής του μέλους που συντρέχει στον κόμβο και στο οποίο ανήκουν οι ράβδοι που ολισθαίνουν. Όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχήματος 2.22(δ), οι βρόχοι υστέρησης της γωνίας αυτής και της ροπής που επιβάλλεται στον κόμβο έχουν τα χαρακτηριστικά των βρόχων συνάφειας-ολίσθησης (βλ. Σχήμα 2.14): μικρό εύρος, σχήμα ανάποδου S και απουσία σταθερότητας στην ανακύκλιση. Παρόμοια στροφή λόγω ολίσθησης των ράβδων από την αγκύρωσή τους πέραν του άκρου του μέλους παρατηρείται και στο τοίχωμα του Σχήματος 2.18(ε).

Όπως αναπτύσσεται και στην υποενότητα 2.3.2, η συγκεντρωμένη γωνία στροφής στο άκρο του μέλους, θ_{sl} , λόγω ολίσθησης των ράβδων πέραν από τη διατομή άκρου του, εμφανίζεται μακροσκοπικά σαν αύξηση των παραμορφώσεων και της φαινόμενης ευκαμψίας του μέλους. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλήρους ροπής διαρροής της ακραίας διατομής του μέλους, λόγω αδυναμίας των ράβδων να αναπτύξουν την τάση διαρροής τους, f_y . Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο σε εσωτερικούς κόμβους, όπου οι ράβδοι των δοκών συνεχίζονται ευθύγραμμες από το ένα άνοιγμα στο άλλο. Αν υποθεθεί ότι (α) η συνάφεια καταλύεται στα τμήματα εισόδου και εξόδου της ράβδου στον κόμβο (λόγω διείδυσης της διαρροής στο τμήμα αυτό της ράβδου, περιορισμένου εγκιβωτισμού της από το περιβάλλον σκυρόδεμα αλλά και ρηγμάτωσης σε οριζόντιο επίπεδο από τη ροπή κάμψης του υποστυλώματος) και (β) ότι ενεργό είναι μόνο ένα μήκος $0,8h_c$ (ο πυρήνας του κόμβου), οι μέσες τάσεις συνάφειας σ' αυτό φθάνουν από $0,3f_y\Phi/h_c$, αν στην παρειά όπου η ροπή της δοκού είναι θετική (εφελκυσμός κάτω) η τάση θλίψης στη ράβδο είναι μηδέν, έως $0,6f_y\Phi/h_c$ για διαρροή της ράβδου σε θλίψη στην παρειά αυτή. (Σε εξωτερικούς κόμβους όπου οι ράβδοι της δοκού αγκυρώνονται και με κάμψη του άκρου τους κατά 90° , οι τάσεις συνάφειας δεν ξεπερνούν τα $0,2f_y\Phi/h_c$). Για τις συνήθεις τιμές των Φ και h_c , οι τάσεις αυτές κυμαίνονται από 5 έως 15MPa και ξεπερνούν την αντοχή σε συνάφεια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ιδίως αν ληφθεί υπόψη ότι η μεταφορά των δυνάμεων με συνάφεια χρειάζεται να γίνει μονόπλευρα, δηλαδή προς τον πυρήνα του κόμβου και όχι προς τα έξω. Εντούτοις τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι (οριακά) εφικτή η ανάπτυξη τόσο υψηλών τάσεων συνάφειας σε κόμβους, χωρίς απαράδεκτα μεγάλη ολίσθηση των ράβδων. Φαίνεται λοιπόν να παίζουν σημαντικό θετικό ρόλο, αφενός μεν η αξονική θλίψη του υποστυλώματος, που θέτει το μήκος αγκύρωσης της ράβδου υπό κατακόρυφη θλίψη, αφετέρου δε ο υψηλός εγκιβωτισμός του πυρήνα στην οριζόντια διεύθυνση από τις εγκάρσιες δοκούς και την πλάκα (ιδίως στο πάνω πέλαμα, όπου παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα).

Επειδή: (α) τα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος σχεδιάζονται εν γένει ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται στις δοκούς, και στα υποστυλώματα, και (β) λόγω

της παρουσίας της αξονικής δύναμης στα υποστυλώματα, το μέγεθος των τάσεων στις ράβδους τους (κυρίως των εφελκυστικών) περιορίζεται σε χαμηλότερα επίπεδα απ' ότι στις δοκούς, οι ράβδοι δοκών που διαπερνούν τους κόμβους είναι εν γένει περισσότεροι κρίσιμοι ως προς τη συνάφεια, σε σχέση με αυτές των υποστυλωμάτων. Έτσι, η εισαγωγή διατμητικής έντασης στον κόμβο μέσω τάσεων συνάφειας κατά μήκος των ράβδων που τον διαπερνούν, καθορίζεται από τις ράβδους των δοκών.

Αν ο δείκτης 1 χρησιμοποιείται για την πλευρά (παρειά) του κόμβου όπου η ράβδος της δοκού που μας ενδιαφέρει είναι σε εφελκυσμό, και ο 2 για την πλευρά όπου η ράβδος είναι σε θλίψη, οι τάσεις της ράβδου στις παρειές αυτές συμβολίζονται με σ_{s1} και σ_{s2} και θεωρούνται – χάριν απλότητας – και οι δύο θετικές. Η συνολική δύναμη που μεταφέρεται στον πυρήνα του κόμβου μέσω συνάφειας ισούται με $(\sigma_{s1} + \sigma_{s2})\pi\Phi_L^2/4$, όπου Φ_L (ή d_{bL}) είναι η διάμετρος της ράβδου. Η δύναμη αυτή θεωρείται ότι μεταφέρεται με συνάφεια μόνο μέσω εκείνου του τμήματος της παράπλευρης επιφάνειας της ράβδου που βρίσκεται μέσα στον πυρήνα του κόμβου, δηλαδή μέσα από τους οριζόντιους συνδετήρες που περικλείουν τις κατακόρυφες ράβδους του υποστυλώματος μέσα στον κόμβο. Εξω από τους συνδετήρες αυτούς, η μεταφορά τάσεων με συνάφεια είναι περιορισμένη, επειδή: (α) η διαρροή των ράβδων της δοκού προχωράει πέραν από την παρειά της δοκού στο υποστυλώμα προς το εσωτερικό του κόμβου και, ως γνωστόν, στο τμήμα της ράβδου που είναι σε διαρροή η ολίσθηση μεταξύ της ράβδου και του περιβάλλοντος σκυροδέματος είναι μεγάλη και οι τάσεις συνάφειας μικρές (στην ουρά του διαγράμματος τάσεων συνάφειας τ-ολίσθησης s), και (β) δεν υπάρχει η ευεργετική για τη συνάφεια επιρροή του εγκιβωτισμού των ράβδων από το περιβάλλον σκυρόδεμα και τον κλωβό οπλισμών που περικλείει τον κόμβο. Το μήκος της ράβδου μέσα στον πυρήνα του κόμβου ισούται με τη διάσταση του περισφιγμένου πυρήνα του υποστυλώματος, h_{cor} , που ορίζεται από τον άξονα του περιμετρικού συνδετήρα. Άρα η μέση τάση συνάφειας στο μήκος αυτό είναι:

$$\tau_b = \frac{\pi\Phi_L^2 (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})}{4 \pi\Phi_L h_{co}} = \frac{\Phi_L (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})}{4 h_{co}} \quad (2.74a)$$

Αν πρόκειται για κάτω ράβδο δοκού, τότε, όταν σχηματίζεται πλαστική άρθρωση στις δοκούς και στις δύο πλευρές 1 και 2 του κόμβου, οι τάσεις σ_{s1} και σ_{s2} φθάνουν την τάση διαρροής, f_y . Και τούτο διότι το πάνω πέλμα της δοκού είναι κατά κανόνα αρκετά ισχυρότερο από το κάτω, τόσο όταν είναι σε εφελκυσμό (επειδή οι πάνω οπλισμοί της δοκού είναι περισσότεροι από τους κάτω και επιπλέον συνεπικουρούνται και από αρκετές από τις

παράλληλες στη δοκό ράβδους της πλάκας μέχρι σημαντική απόσταση από τη δοκό) όσο και όταν είναι σε θλίψη (λόγω του συνεργαζόμενου σε θλίψη πλάτους της πλάκας, αλλά και της μεγαλύτερης ποσότητας οπλισμού πάνω πέλματος). Ετσι, για την εξισορρόπηση της μεγάλης δύναμης (εφελκυσμού ή θλίψης) που αναπτύσσει το πάνω πέλμα στη διαρροή της δοκού, οι οπλισμοί του κάτω πέλματος αναγκάζονται να διαρρεύσουν (βλ. Σχ. 2.5). Ετσι, αν με τόνο συμβολίζεται το κάτω πέλμα της δοκού, οι τάσεις συνάφειας κατά μήκος του τμήματος των ράβδων του μέσα στον κόμβο ισούνται:

$$\tau'_b = \frac{\Phi'_L}{2h_{co}} f_y \quad (2.74b)$$

Για το πάνω πέλμα, ας υποθέσουμε ότι οι πάνω ράβδοι είναι σε εφελκυσμό στην παρειά 1 του κόμβου. Στην απέναντι παρειά (που συμβολίζεται με το δείκτη 2) οι ράβδοι κάτω πέλματος, με διατομή A_{s2}' , διαρρέουν σε εφελκυσμό για να εξισορροπήσουν τη συνολική θλιπτική δύναμη $A_{s2}\sigma_{s2} + F_{c2}$ του πάνω πέλματος, όπου F_{c2} συμβολίζει τη θλιπτική δύναμη που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα του πάνω πέλματος. Αρα:

$$\sigma_{s2} = \frac{A'_{s2}}{A_{s2}} f_y - \frac{F_{c2}}{A_{s2}} = \frac{\rho'}{\rho} f_y \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{\omega} \right) \quad (2.75)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση ρ' και ρ είναι τα ποσοστά οπλισμού κάτω και πάνω πέλματος στην παρειά 2 του κόμβου, ανηγμένα στο bd της δοκού, $\omega = \rho f_y / f_c$ το μηχανικό ποσοστό που αντιστοιχεί στο ρ και ξ_{eff} το ανηγμένο στο d βάθος μίας πλασματικής θλιβόμενης ζώνης που χρειάζεται για την ανάπτυξη της f_c μέσα στο πλάτος b της δοκού (χωρίς συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας) με σταθερή θλιπτική τάση σκυροδέματος f_c (αν δεν υπάρχει συνεργαζόμενο πλάτος της δοκού, τότε $\xi_{eff} = \xi(1 - \epsilon_{co} / 3\epsilon_{cu})$). Η τιμή του ξ_{eff} δεν μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια. Γίνεται όμως αρκετά μεγάλη (πλησιάζει το ω), όταν οι υψηλές τάσεις συνάφειας κατά μήκος των πάνω ράβδων προκαλέσουν συνολική ολίσθηση της ράβδου μέσα στον κόμβο, από την πλευρά που η ράβδος θλίβεται προς αυτήν που εφελκύεται, οπότε η τιμή της σ_{s2} μειώνεται σημαντικά. Ετσι, η σ_{s2} τελικώς είναι μικρότερη από την f_y ακόμα και όταν $\rho' = \rho$ (βλ. Σχ. 2.6).

Με βάση τα ανωτέρω, η εξ. (2.74a) δίνει για τις πάνω ράβδους:

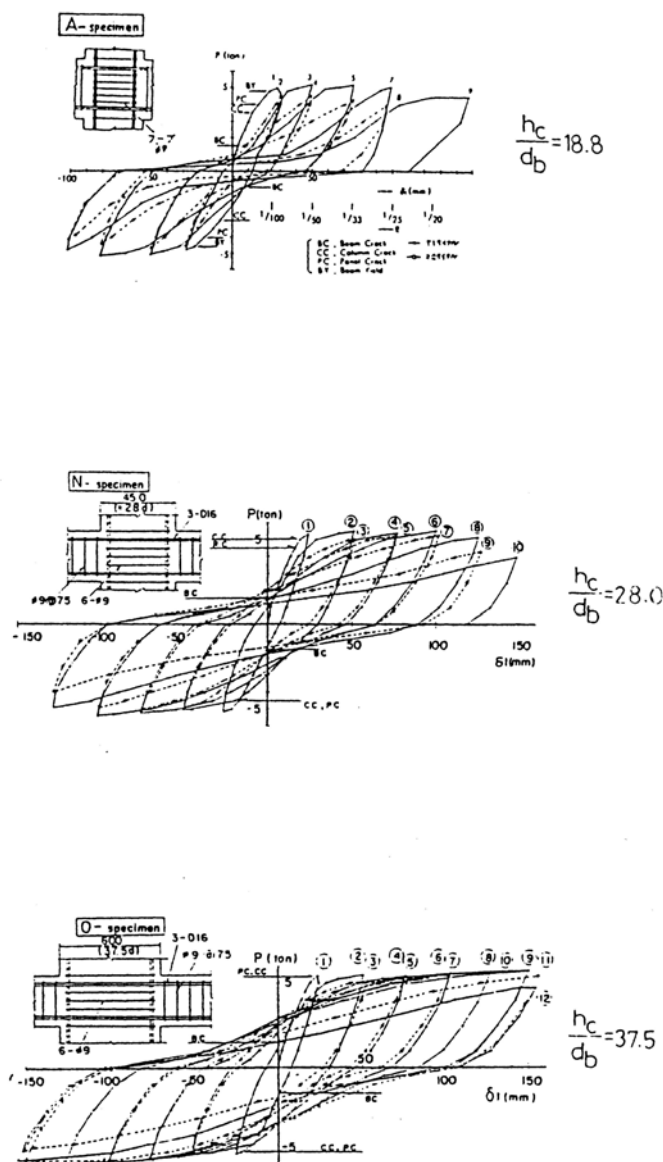
$$\tau_b = \frac{\Phi_L}{4h_{co}} f_y \left[1 + \frac{\rho'}{\rho} \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{\omega} \right) \right] \quad (2.76)$$

Εκ πρώτης όψεως, από τις εξ.(2.74b) και (2.76) προκύπτει το συμπέρασμα ότι κρισιμότερη είναι η συνάφεια στις κάτω ράβδους. Ομως, οι τάσεις συνάφειας δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στην περίμετρο της ράβδου: Είναι υψηλότερες στην πλευρά της ράβδου που βλέπει προς το εσωτερικό του κόμβου, καθότι προς τα εκεί κατευθύνεται τελικώς η διατμητική ένταση που εισάγουν στο σκυρόδεμα. Για τις πάνω ράβδους της δοκού η πλευρά αυτή είναι η κάτω, όπου όμως μπορεί να έχει σχηματισθεί κατά τη συμπύκνωση τον σκυροδέματος ένας θύλακας κενός από σκυρόδεμα, ή γεμάτος με σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής και πυκνότητας. Αντίθετα, η πυκνότητα του σκυροδέματος πάνω από τις κάτω ράβδους είναι πολύ ικανοποιητική. Επιπλέον, αν οι δοκοί σκυροδετούνται χωριστά από τα υποστυλώματα, τότε η πυκνότητα του σκυροδέματος και η συνάφεια είναι ικανοποιητική ακόμα και κάτω από τις κάτω ράβδους (οι κάτω ράβδοι έχουν ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας). Έτσι, η συνάφεια μπορεί να είναι τελικά κρισιμότερη στις πάνω ράβδους, παρά τη διαφορά στο δεύτερο μέλος των εξ.(2.74b) και (2.76).

Η τάση συνάφειας, t_b ή t_b' , από τις εξ.(2.74b), (2.76) περιορίζεται από την αντοχή σε συνάφεια μέσα στον πυρήνα του κόμβου. Λόγω του εγκιβωτισμού του πυρήνα από το περιβάλλον σκυρόδεμα και τον κλωβό των ράβδων που τον περικλείουν (κατακόρυφες ράβδοι υποστυλώματος και οριζόντια σκέλη συνδετήρων και στις τέσσερις κατακόρυφες παρειές του, ράβδοι δοκών στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις στην πάνω και την κάτω οριζόντια παρειά του κόμβου), οι συνθήκες συνάφειας είναι παρόμοιες με αυτές που συναντώνται σε πειράματα εξόλκευσης (pull-out), στα οποία, όπως αναφέρθηκε ήδη στην Υποενότητα 2.1.3, λόγω εγκιβωτισμού η αντοχή σε συνάφεια είναι διπλάσια αυτής που ισχύει για απερίσφιγκτο σκυρόδεμα. Χρειάζεται βεβαίως να ληφθεί υπόψη και η επιρροή της ανακύκλισης της έντασης στη συνάφεια, η οποία, όπως αναπτύχθηκε στην Παρ. 2.1.3 (βλ. Σχ. 2.14) είναι εξαιρετικά δυσμενής. Από την άλλη πλευρά, ευνοϊκή επιρροή στη συνάφεια έχει η εγκάρσια στη διεπιφάνεια ράβδων-σκυροδέματος τάση θλίψης, λόγω αξονικής δύναμης N του υποστυλώματος. Έτσι, η μέση τάση θλίψης στο υποστυλώμα, $\sigma=N/A_c$, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυξάνει την αντοχή συνάφειας κατά μέσο όρο κατά $0.5\mu\sigma=0.5\mu n f_c$, όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια, $\nu=N/A_c f_c$ και ο μειωτικός συντελεστής 0.5 προκύπτει από την ολοκλήρωση της ορθής τάσης $\sigma \cos^2 \phi$ κάθετα στη διεπιφάνεια ράβδου-σκυροδέματος, στην ημι-περίμετρο της ράβδου.

Το Σχ.2.23 δείχνει την επιρροή του μήκους που διατίθεται μέσα στον κόμβο για την ανάπτυξη της συνάφειας των ράβδων της δοκού, στους βρόχους υστέρησης επιβαλλόμενης δύναμης-συνολικής μετατόπισης ενός σταυροειδούς κόμβου δοκού-υποστυλώματος (Kaku and Asakusa, 1991). Όταν η διάσταση του υποστυλώματος είναι σχετικά μικρή ($h_c=18.7\Phi_L$),

οι βρόχοι υστέρησης έχουν τη μορφή ανάποδου S που χαρακτηρίζει τη σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων (πρβλ. Σχ. 2.14). Για μεγαλύτερες διαστάσεις υποστυλώματος, το σχήμα των βρόχων προσεγγίζει αυτό που χαρακτηρίζει την καμπτική συμπεριφορά της δοκού. Είναι αξιοσημείωτο ότι όταν η διάσταση του υποστυλώματος είναι σχετικά μικρή, η αντίσταση του κόμβου δεν μειώνεται με την ανακύκλιση των παραμορφώσεων (δηλαδή δεν αστοχεί ο κόμβος). Απλώς η δυσκαμψία στην επαναφόρτιση είναι πολύ μικρότερη, οπότε οι μετακινήσεις αυξάνονται ταχύτερα με την ανακύκλιση και η απορροφούμενη ενέργεια είναι μικρότερη.



Σχήμα 2.23 Βρόχοι υστέρησης σταυρού δοκού-υποστυλώματος για διάφορες διαστάσεις υποστυλώματος (από Kaku and Asakusa, 1991)

Συμπερασματικά, ενώ δεν μπορούμε να παράσχουμε μέσα στο ύψος h_c της διατομής του υποστυλώματος το μήκος αγκύρωσης που θεωρητικά χρειάζονται οι (άνω κυρίως) οριζόντιες ράβδοι της δοκού για να αναπτύξουν την πλήρη τάση διαρροής τους ταυτόχρονα και στα δύο άκρα, ουσιαστικό πρόβλημα φαίνεται να υπάρχει μόνο για μεγάλες τιμές του λόγου της διαμέτρου Φ των διαμήκων ράβδων της δοκού προς το ύψος διατομής υποστυλώματος, h_c . Αν για τον άνω οπλισμό δοκών, όπου το πρόβλημα είναι εντονότερο, προτιμήσουμε μικρές διαμέτρους ράβδων το πρόβλημα αμβλύνεται. Βεβαίως η επιλογή αυτή αντιστρατεύεται την επιδίωξη αποφυγής λυγισμού των ράβδων μέσω υψηλού λόγου διαμέτρου προς απόσταση συνδετήρων. Ευτυχώς στο άνω πέλμα το ενδεχόμενο λυγισμού των ράβδων της δοκού είναι λιγότερο πιθανό και λόγω της ιστορίας των παραμορφώσεων (πρβλ. Σχήμα 2.5 και 2.6) και λόγω της παρεμπόδισης από την πλάκα του λυγισμού μέσα σε οριζόντιο επίπεδο.

2.3.3 ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΜΒΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

2.3.3.1 Διατμητική ένταση στον κόμβο

Όπως αναφέρθηκε στην Υποενότητα 2.3.1, η διατμητική ένταση στον πυρήνα του κόμβου συνίσταται σε ονομαστικές διατμητικές τάσεις σε οριζόντια και σε κατακόρυφα επίπεδα, ίσες (περίπου) με το άθροισμα των σεισμικών ροπών που αναπτύσσονται κατά την απόκριση στη δοκό ή στο υποστυλώμα, $\Sigma M_c = \Sigma M_b$, προς τον όγκο (του πυρήνα) του κόμβου. Ως διατμητική, αυτή η ένταση προκαλεί ψαθυρή αστοχία. Η αστοχία αυτή επιδιώκεται να αποφεύγεται μέσω ικανοτικού σχεδιασμού του κόμβου σε διάτμηση, γιά διατμητικές τάσεις που υπολογίζονται με βάση τις ροπές των πλαστικών αρθρώσεων που σχηματίζονται στα μέλη που συντρέχουν στον κόμβο. (Ακόμα και οι πλαστικές αρθρώσεις στα υποστυλώματα είναι πιό πλαστικές από τη διατμητική αστοχία του κόμβου).

Σε κτίρια που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις, τα υποστυλώματα είναι συνήθως επαρκώς ισχυρά σε σύγκριση με τις δοκούς (ακόμα και αν δεν έχουν σχεδιασθεί γιά να πληρούν τον κανόνα ικανοτικού σχεδιασμού υποστυλωμάτων σε κάμψη με το συντελεστή υπεραντοχής γ_{Rd} των κανονισμών) ώστε να μην σχηματίζουν πρώτα πλαστικές αρθρώσεις (δηλαδή, $\Sigma M_{Rc} > \Sigma M_{Rb}$). Τότε, καθοριστική της συνολικής σεισμικής ροπής που εισάγεται στον κόμβο είναι η συνολική αντοχή των δοκών, ΣM_{Rb} . Με την προϋπόθεση ότι η συνάφεια στις οριζόντιες ράβδους είναι επαρκής, η οριζόντια τέμνουσα που μεταφέρεται στον πυρήνα του κόμβου υπολογίζεται ως το άθροισμα της δύναμης $A_{sb} f_y$ του εφελκόμενου άνω πέλματος της δοκού στη μία πλευρά του κόμβου, συν τη δύναμη θλίψης του άνω θλιβόμενου πέλματος στην απέναντι, μείον την τέμνουσα V_C του υπερκείμενου υποστυλώματος. Ασχετα από το πως κατανέμεται μεταξύ θλιβόμενης ζώνης

σκυροδέματος και πάνω οπλισμού, η δύναμη θλίψης στο θλιβόμενο άνω πέλμα ισούται με τη δύναμη εφελκυσμού στο εφελκυόμενο κάτω πέλμα, $A_{sb2}f_y$. Τέλος, εφόσον καθοριστική της συνολικής σεισμικής ροπής που εισάγεται στον κόμβο είναι η συνολική αντοχή των δοκών: $\Sigma M_{Rb} \approx (A_{sb1} + A_{sb2})f_y z_b$ με $z_b \approx 0,8h_b$, η τέμνουσα V_c του υποστυλώματος ισούται με τη ροπή αυτή, ανηγμένη στο κέντρο του κόμβου (δηλαδή $\Sigma M_{Rb}/(L_b/L_{bn})$, όπου L_b και L_{bn} το μέσο θεωρητικό και το μέσο καθαρό άνοιγμα της δοκού εκατέρωθεν του κόμβου), δια του μέσου ύψους ορόφου, h_{st} . Άρα:

$$V_{jh} = (A_{sb1} + A_{sb2})f_y - V_c = (A_{sb1} + A_{sb2})f_y - \frac{\Sigma M_{Rb}}{h_{st}} \frac{L_b}{L_{bn}} = \Sigma M_{Rb} \left(\frac{1}{z_b} - \frac{1}{h_{st}} \frac{L_b}{L_{bn}} \right)$$

$$V_{jh} \approx (A_{sb1} + A_{sb2})f_y \left(1 - 0,8 \frac{h_b}{h_{st}} \frac{L_b}{L_{bn}} \right) \quad (2.77)$$

όπου το άθροισμα των οπλισμών αναφέρεται σε απέναντι παρειές του κόμβου και ο τελευταίος όρος σε παρένθεση ισούται περίπου με 0,85.

Η οριζόντια τέμνουσα δύναμη V_{jh} , μεταφράζεται σε ονομαστική διατμητική τάση v_j , ίση με:

$$v_j = \frac{V_{jh}}{b_j h_c} \quad (2.78)$$

όπου b_j είναι το πλάτος του κόμβου κάθετα στη διάσταση h_c του υποστυλώματος, το οποίο συμβατικά λαμβάνεται ίσο με:

$$b_j = \min(\max(b_c, b_w), \min(b_c, b_w) + 0.5h_c) \quad (2.79)$$

όπου b_c , b_w το πλάτος της διατομής υποστυλώματος και δοκού.

Στη σπανιότερη σε κτίρια που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις περίπτωση να είναι οι δοκοί που συντρέχουν στον κόμβο ισχυρότερες από τα υποστυλώματα, (δηλαδή να είναι: $\Sigma M_{Rb} > \Sigma M_{Rc}$), καθοριστική της συνολικής σεισμικής ροπής και της διατμητικής έντασης που εισάγονται στον κόμβο είναι η συνολική αντοχή των υποστυλωμάτων, ΣM_{Rc} . Κατά κανόνα, οι κατακόρυφες ράβδοι των υποστυλωμάτων είναι οι ίδιες πάνω και κάτω από τον κόμβο. Αν με $A_{sc,tot}$ συμβολίσουμε τη συνολική διατομή κατακορύφων ράβδων στο κάθε άκρο της διατομής του υποστυλώματος και του πυρήνα του κόμβου, η κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη, V_{jv} , στον πυρήνα του κόμβου είναι:

$$V_{jv} = f_y A_{sc,tot} + N_{top} - V_{b,min} \quad (2.80)$$

όπου N_{top} : η αξονική δύναμη στο από πάνω υποστύλωμα και $V_{b,min}$: η ελάχιστη τέμνουσα δοκού ανάμεσα στις δύο απέναντι παρειές του κόμβου, που ισούται με:

$$V_{b,min} \approx \min \left(\frac{\sum M_{Rc}}{L_b} \frac{h_{st}}{h_{st,n}} - V_{g+\psi_{2q,b}} \right) \quad (2.81)$$

Στην εξ.(2.81) h_{st} και $h_{st,n}$ είναι το θεωρητικό και το καθαρό μέσο ύψος ορόφου πάνω και κάτω από τον κόμβο και $V_{g+\psi_{2q,b}}$ η τέμνουσα στο άκρο της δοκού λόγω κατακορύφων φορτίων. Η $V_{b,min}$ μπορεί να έχει και αρνητική τιμή. Επειδή:

$$\sum M_{Rc} \approx f_y A_{s,tot} z_c + 0.5 h_c (N_{top} (1 - v_{top}) + N_{bot} (1 - v_{bot})) \quad (2.82)$$

όπου $v = N/A_c f_c$ και $z_c \approx 0.9d \approx 0.8h_c$ ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων του υποστυλώματος, η εξ. (2.82) δίνει:

$$V_{jv} \approx \sum M_{yc} \left(\frac{1}{z_c} - \frac{1}{L_b} \frac{h_{st}}{h_{st,n}} \right) + \max V_{g+\psi_{2q,b}} \quad (2.83)$$

Οπότε η ονομαστική διατμητική τάση, v_j , στον κόμβο προκύπτει ίση με:

$$v_j = \frac{V_{jv}}{b_j h_b} \quad (2.84)$$

όπου h_b : το ύψος της δοκού.

2.3.3.2 Αντοχή κόμβων σε διάτμηση

Ο πυρήνας του κόμβου ρηγματώνεται λοξά, όταν η κύρια εφελκυστική τάση που προκύπτει από τη μέση ορθή τάση θλίψης στην κατακόρυφη διεύθυνση (ίση περίπου με τη μέση τάση, $N/A_c = v f_c$, στο υποστύλωμα) και την ονομαστική διατμητική τάση, v_j , ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, f_{ct} :

$$v_j > f_{ct} \sqrt{1 + \frac{v f_c}{f_{ct}}} \quad (2.85)$$

Στη συνέχεια ο πυρήνας του κόμβου αναπτύσσει τη διατμητική αντοχή του, v_{ju} .

Ενώ το πρόβλημα της διατμητικής αντοχής κόμβων μελετάται πειραματικά και αναλυτικά από πριν τη δεκαετία του '60, η κατανόησή του είναι ακόμα ανεπαρκής. Ως αποτέλεσμα, δεν έχουν αναπτυχθεί προσομοιώματα που να είναι διεθνώς αποδεκτά και να ποσοτικοποιούν ικανοποιητικά τη διατμητική αντοχή που παρατηρείται στα πειράματα κόμβων.

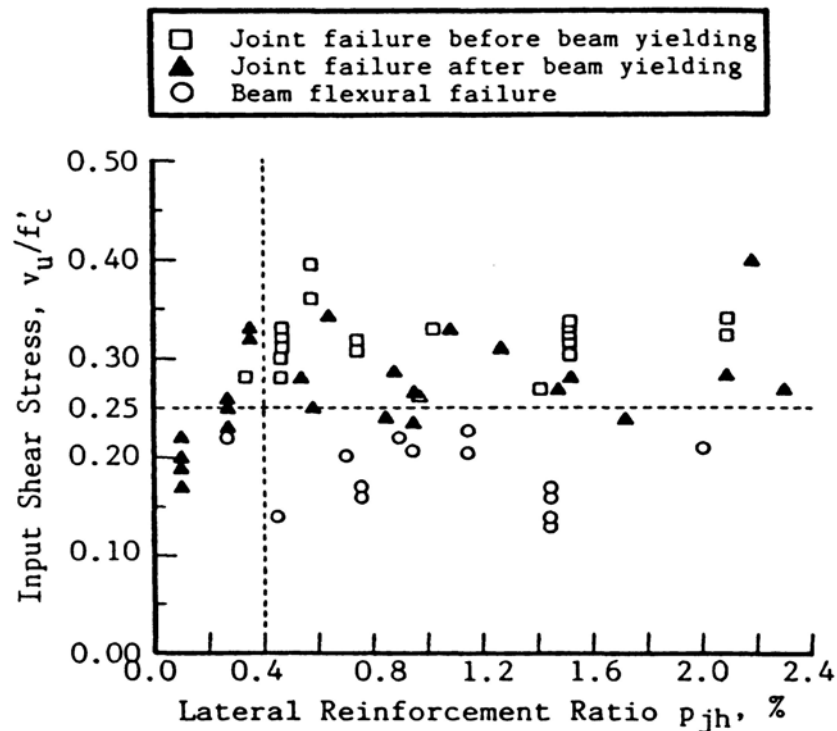
Στη δεκαετία του '70 αναπτύχθηκε στη Νέα Ζηλανδία από τους Park και Paulay ένα φυσικό προσομοίωμα της συμπεριφοράς κόμβων σε διάτμηση, το οποίο – σε διάφορες παραλλαγές – αποτελεί τη βάση κανόνων ακόμη και σύγχρονων Κανονισμών. Το φυσικό αυτό προσομοίωμα περιγράφεται στο Σχ. 2.21(β). Αποτελείται από:

- 1) ενός διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος μεταξύ των θλιβομένων ζωνών των στοιχείων που συντρέχουν σε δύο απέναντι γωνίες του κόμβου, και
- 2) ενός δικτύωματος, που αποτελείται από:
 - α) τους οριζόντιους οπλισμούς (συνδετήρες) που τοποθετούνται στο σώμα του κόμβου,
 - β) τις ενδιάμεσες κατακόρυφες ράβδους των πλευρών του υποστυλώματος (εφόσον υπάρχουν) και
 - γ) ένα θλιπτικό πεδίο σκυροδέματος, υπό γωνία θ ως προς την κατακόρυφο.

Η δύναμη του θλιπτήρα προέρχεται από: 1) τις δυνάμεις σκυροδέματος στις θλιβόμενες ζώνες δοκού και υποστυλώματος που συντρέχουν στα άκρα του θλιπτήρα και 2) τις τάσεις συνάφειας των οριζοντίων ράβδων της δοκού και των ακραίων κατακορύφων του υποστυλώματος που αναπτύσσονται μέσα στο ίδιο το πλάτος του θλιπτήρα. Αν δεν αστοχήσει μερικώς η συνάφεια των ράβδων της δοκού, με αποτέλεσμα το θλιβόμενο άκρο τους να ολισθήσει προς το εσωτερικό του κόμβου, στις διατομές στήριξης των δοκών στον κόμβο το μέγεθος της θλιβόμενης ζώνης περιορίζεται πολύ με την ανακύκλιση της ροπής, επειδή η ρωγμή ανοίγει σ' όλο σχεδόν το ύψος και η δύναμη θλίψης αναλαμβάνεται τελικά, στο σύνολό της σχεδόν, από το θλιβόμενο οπλισμό. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβάλλει στη δύναμη του θλιπτήρα η θλιβόμενη ζώνη της δοκού. Έτσι το πλάτος του θλιπτήρα ορίζεται από το ύψος x της θλιβόμενης ζώνης των υποστυλωμάτων πάνω και κάτω από τον κόμβο. Όμως, ενώ με την ανακύκλιση της φόρτισης φαίνεται να μειώνεται από τον παραπάνω λόγο η εισαγωγή δυνάμεων στο θλιπτήρα απευθείας από τις θλιβόμενες ζώνες των μελών, αυξάνεται αντίθετα η εισαγωγή δυνάμεων με συνάφεια, καθώς με την ανακύκλιση εξασθενεί ο μηχανισμός συνάφειας και οι τάσεις συνάφειας μεταφέρονται στο τμήμα των ράβδων που βρίσκεται υπό εγκάρσια θλίψη, δηλαδή στο πλάτος του λοξού θλιπτήρα. Έτσι φαίνεται να διατηρείται η λειτουργία του θλιπτήρα, ακόμα και αφού εξασθενήσει η συνάφεια στο μεγαλύτερο τμήμα των οριζοντίων ράβδων, συνάφεια η οποία είναι απαραίτητη για την πλήρη λειτουργία του μηχανισμού δικτύωματος.

Η οριζόντια προβολή της λοξής δύναμης του θλιπτήρα συμβάλλει στη διατμητική αντοχή του κόμβου, δηλαδή στην ανάληψη της οριζόντιας τέμνουσας δύναμης V_{jh} . Η υπόλοιπη διατμητική αντοχή, κατά το προσομοίωμα των Park και Paulay, προέρχεται από τους οριζόντιους οπλισμούς (συνδετήρες) που διαθέτει ο κόμβος μεταξύ των οπλισμών πάνω και κάτω πέλματος της δοκού. Δυστυχώς, όμως, δεν είναι εφικτή η αξιόπιστη ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς του λοξού θλιπτήρα στη διατμητική αντοχή.

Για τον υπολογισμό της δύναμης που καλείται να αναλάβει ο μηχανισμός δικτυώματος, οι Paulay and Priestley (1992) κάνουν την υπόθεση ότι, λόγω των πλαστικών μηκύνσεων που συγκεντρώνονται με την ανακύκλιση στις πάνω ράβδους της δοκού, στην παρειά 2 του κόμβου η ρωγμή στο πάνω πέλμα δεν κλείνει υπό τη μέγιστη θετική ροπή (εφελκυσμός κάτω) και δεν αναπτύσσεται θλιβόμενη ζώνη στο σκυρόδεμα (οπότε $\xi_{eff}=0$ στην εξ.(2.76)). Η υπόθεση αυτή αγνοεί την προς το εσωτερικό του κόμβου ολίσθηση των θλιβόμενων ράβδων πάνω πέλματος στην παρειά 2. Τότε το πλάτος (οριζόντια διάσταση) του λοξού θλιπτήρα ορίζεται μόνο από το βάθος x της θλιβόμενης ζώνης του υποστυλώματος. Επιπλέον, στην οριζόντια συνιστώσα της λοξής δύναμης του θλιπτήρα δεν συμβάλλει η δύναμη σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης της δοκού, καθότι θεωρείται μηδενική. Επομένως αυτή η οριζόντια συνιστώσα αποτελείται μόνον από το τμήμα της δύναμης συνάφειας που μεταφέρεται από τις ράβδους της δοκού μέσα στο πλάτος του θλιπτήρα, μείον την τέμνουσα V_C του υποστυλώματος. Περαιτέρω, οι Paulay and Priestley (1992) υποθέτουν ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων συνάφειας στο τμήμα των ράβδων της δοκού μέσα στον πυρήνα του κόμβου, οπότε το κλάσμα της δύναμης συνάφειας που πηγαίνει στο λοξό θλιπτήρα ισούται με το πλάτος του θλιπτήρα ως ποσοστό της οριζόντιας διάστασης του πυρήνα, δηλαδή με $x/h_{co}=\xi_c h_c/h_{co}$, όπου ξ_c είναι το ανηγμένο στο h_c πλάτος της θλιβόμενης ζώνης του υποστυλώματος. Το κλάσμα της οριζόντιας τέμνουσας V_{jh} που αναλαμβάνεται από το μηχανισμό δικτυώματος είναι τότε το υπόλοιπο, δηλαδή το $1-\xi_c h_c/h_{co}$. Επειδή δε, σύμφωνα με την υπόθεση μηδενικής θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος στη δοκό, όλο το κατακόρυφο ύψος των παρειών του κόμβου καταλαμβάνεται από το μηχανισμό δικτυώματος, χρειάζονται οριζόντιες ράβδοι (συνδετήρες) στον κόμβο με συνολική διατομή A_{jh} για να αναλάβουν τη δύναμη $(1-\xi_c h_c/h_{co})V_{jh}$.



Σχήμα 2.24 Επιρροή ποσοστού οριζόντιου οπλισμού εσωτερικών κόμβων στη διατμητική τους αντοχή, από Kitayama et al (1991). Τετράγωνα: Κόμβοι που αστόχησαν πριν τη διαρροή της δοκού. Μαύρα τρίγωνα: Κόμβοι που αστόχησαν μετά τη διαρροή της δοκού. Κύκλοι: Αστοχία της δοκού και όχι του κόμβου.

Πειραματικά αποτελέσματα σε εσωτερικούς κόμβους που συγκέντρωσε οι Kitayama et al (1991) και παρουσιάζονται στο Σχ. 2.24, δείχνουν ότι η διατμητική αντοχή του κόμβου αυξάνεται με το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού του κόμβου, ρ_{jh} , από μία μη-μηδενική τιμή της τάξεως του $0.15f_c$ – η οποία συμφωνεί ως τάξη μεγέθους με τη διατμητική τάση που προκαλεί τη λοξή ρηγμάτωση κατά την εξ.(2.85) – έως μία μέγιστη τιμή, που κυμαίνεται μεταξύ $0.24f_c$ και $0.40f_c$ (με μέση τιμή $0.32f_c$) και δεν εξαρτάται από το ποσοστό οπλισμού ρ_{jh} για τιμές του τελευταίου πάνω από 0.4%. Φαίνεται ότι μεγαλύτερα ποσοστά οπλισμού δεν μπορούν να αποτρέψουν την αστοχία του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη (η οποία εν γένει προέρχεται από την επαλληλία του θλιπτήρα και του θλιπτικού πεδίου τάσεων που συνοδεύει απαραίτητα το μηχανισμό δικτυώματος).

Το συμπέρασμα από τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχ. 2.24, καθώς και λεπτομερείς μετρήσεις των μηκύνσεων των συνδετήρων, μέσα στους κόμβους, όπως αυτές εξελίσσονται με την ιστορία και το εύρος της ανακύκλισης των σχετικών μετακινήσεων ορόφου, οδηγούν

στα εξής συμπεράσματα:

1. Η ανακύκλιση των παραμορφώσεων και της έντασης προκαλεί σταδιακή μείωση της συνάφειας στο αρχικό τμήμα της ράβδου μέσα στον κόμβο από το εφελκόμενο άκρο της και οδηγεί τελικά στη συγκέντρωση του συνόλου σχεδόν της δύναμης συνάφειας της ράβδου στο τελικό τμήμα της μέσα στον κόμβο, κοντά στο θλιβόμενο άκρο της, δηλαδή μέσα στο πλάτος του λοξού θλιπτήρα.
2. Επειδή για τη λειτουργία του μηχανισμού δικτυώματος είναι απαραίτητη η συνάφεια κατά μήκος των ράβδων των δοκών, η κατάλυσή της στο τμήμα των ράβδων εκτός του λοξού θλιπτήρα οδηγεί στον πρακτικό μηδενισμό της συμβολής του δικτυώματος στη διατμητική αντοχή και στην ανάληψη του συνόλου της διατμητικής έντασης από το λοξό θλιπτήρα. Επισημαίνεται ότι στο στάδιο αυτό το σύνολο της οριζόντιας τέμνουσας V_{jh} της εξ.(2.77) αποτελεί την οριζόντια συνιστώσα της λοξής δύναμης του θλιπτήρα, καθόσον η V_{jh} μεταφέρεται σ' αυτόν είτε με θλίψη από τη θλιβόμενη ζώνη της δοκού, είτε με συνάφεια μέσα στο πλάτος του θλιπτήρα.
3. Η διατμητική ένταση που μπορεί να μεταφέρει ο μηχανισμός θλιπτήρα καθορίζεται από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στη λοξή διεύθυνση του θλιπτήρα, εξαρτάται δε από την παρουσία και την ποσότητα των συνδετήρων μέσα στον κόμβο μόνο στο βαθμό που αυτοί βελτιώνουν την αντοχή του μέσω περίσφιξης. Έτσι στο στάδιο της τελικής διατμητικής αστοχίας του κόμβου, τα σκέλη των συνδετήρων που είναι παράλληλα στην τέμνουσα (δηλαδή μέσα στο επίπεδο του πλαισίου) και τα οποία θεωρούνται ότι αναλαμβάνουν την τέμνουσα του κόμβου κατά το μηχανισμό δικτυώματος, καταπονούνται και συνεισφέρουν όσο και τα σκέλη τους που είναι στην εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση. Μάλιστα, τον ίδιο ρόλο – αυτόν της περίσφιξης – παίζουν και οι πάνω και κάτω οπλισμοί της δοκού που συντρέχει στον κόμβο στην εγκάρσια διεύθυνση: οι ράβδοι αυτές μπορεί να φθάσουν στη διαρροή τους λόγω σεισμικής απόκρισης μέσα στο κάθετο προς αυτές επίπεδο, σχεδόν ταυτόχρονα με τα σκέλη των συνδετήρων του κόμβου που είναι παράλληλα στο επίπεδο του πλαισίου και της σεισμικής απόκρισης.
4. Η αξονική δύναμη στο υποστύλωμα, όπως αυτή μετράται μέσω της ανηγμένης αξονικής του δύναμης $v=N/A_c f_c$, δεν φαίνεται να έχει αισθητή επιρροή, ούτε στην συνάφεια-ολίσθηση των ράβδων της δοκού, ούτε στη τιμή της διατμητικής τάσης v_{ju} στη διατμητική αστοχία του κόμβου.

Η αστοχία του πυρήνα του κόμβου είναι ψαθυρή, με εξάντληση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στη διαγώνια διεύθυνση, συνήθως μετά τη διαρροή των οριζοντίων ή και κατακορύφων ράβδων που διασχίζουν τον πυρήνα (διαρροή που μειώνει τη λοξή θλιπτική

αντοχή του σκυροδέματος, καθώς περιορίζει την περίσφιγξη και αυξάνει την εγκάρσια στη διεύθυνση της θλίψης μήκυνση).

Δυστυχώς δεν υπάρχουν ακόμη πλήρη προσομοιώματα για την αντοχή, που να λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση των μηχανισμών και όλες τις παραμέτρους που τους επηρεάζουν. Ένα από τα λίγα προσομοιώματα που βασίζονται αποκλειστικά σχεδόν σε αρχές της Μηχανικής αντί σε εμπειρικούς κανόνες, είναι αυτό των Pantazopoulou και Bonacci (1992). Αυτό θεωρεί ότι ο κόμβος βρίσκεται σε ομοιόμορφη επίπεδη ένταση (αγνοεί δηλαδή τη διακριτή φύση του θλιπτήρα) και καταλήγει στο συμπέρασμα, ότι ο κόμβος θα αστοχήσει όταν η μέση διατμητική τάση του κόμβου, v_j , ξεπεράσει την εξής τιμή:

$$v_{ju} = \min\left(\sqrt{(n - \omega_h)\omega_h}, \sqrt{(n - \omega_v)(\omega_v + v)}, \sqrt{\omega_h(\omega_v + v)}\right)f_c \quad (2.86)$$

Στην εξ.(2.86) v είναι η ανηγμένη αξονική θλίψη του υποστυλώματος, n ο συντελεστής μείωσης της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος λόγω της εγκάρσιας μήκυνσης (βλ. υποενότητες 2.2.3.2 και 2.2.3.3) και ω_h , ω_v τα μηχανικά ποσοστά των (καλά αγκυρωμένων) οριζοντίων και κατακορύφων ράβδων που διαπερνούν τον πυρήνα του κόμβου μεταξύ των άνω και κάτω οπλισμών της δοκού και των ακραίων του υποστυλώματος (κλειστοί συνδετήρες μέσα στον κόμβο, ενδιάμεσες ράβδοι στις πλευρές του υποστυλώματος). Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος σημαίνουν διαγώνια θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος μετά από διαρροή των οριζοντίων ράβδων ή των κατακορύφων ράβδων αντίστοιχα και ο τελευταίος (και λιγότερο καθοριστικός) σημαίνει διαρροή οριζοντίων και κατακορύφων ράβδων. Επισημαίνεται ότι κατά την εξ.(2.86), ο κόμβος δεν διαθέτει αντοχή αν δεν υπάρχουν οριζόντιες ράβδοι (συνδετήρες), δηλαδή αν $\omega_h=0$.

Ένα εναλλακτικό προσομοίωμα, που έχει αρχίσει να επικρατεί κατόπιν της ασυμφωνίας των πειραματικών αποτελεσμάτων με το προσομοίωμα συνδυασμού λοξού θλιπτήρα και μηχανισμού δικτυώματος, είναι αυτό της ομοιόμορφης επίπεδης έντασης στον πυρήνα του κόμβου – όπως δηλαδή θεωρείται και για την εξ.(2.86) – αλλά με βάση τις κύριες τάσεις του σκυροδέματος. Με βάση τη θεώρηση αυτή προκύπτει και η εξ.(2.85) για τη διατμητική τάση που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του κόμβου κάθετα στη διεύθυνση της εφελκυστικής κύριας τάσης, σ_1 . Για την αστοχία του σκυροδέματος σε θλίψη, εξισώνεται η θλιπτική τάση σ_{II} με τη – μειωμένη σε nf_c λόγω εγκάρσιων μηκύνσεων – θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Με αυτή τη θεώρηση προκύπτει η εξής εκτίμηση της οριακής διατμητικής τάσης (αντοχής) του κόμβου:

$$v_{ju} = n f_c \sqrt{1 - \frac{v_{top}}{n}} \quad (2.87)$$

όπου v_{top} η αξονική δύναμη του πάνω υποστυλώματος, ανηγμένη στην οριζόντια επιφάνεια του κόμβου, $b_j h_c$.

Ομως η εξ.(2.87) ισχύει μόνο στο βαθμό που μπορεί να αναπτυχθεί ταυτόχρονα και η κύρια εφελκυστική τάση σ_1 , που προκύπτει από τη δράση της v_j ως διατμητικής τάσης και της v_{top} ως κατακόρυφης ορθής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι δεν εξαντλείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος στη διεύθυνση της σ_1 . Αυτό είναι εξαιρετικά απίθανο, εκτός εάν συμβάλλουν στην ανάληψη των εφελκυστικών τάσεων και οι οριζόντιοι οπλισμοί του κόμβου (όρος ω_h στην εξ.(2.86)). Θεωρώντας ότι αυτοί οι οριζόντιοι οπλισμοί φθάνουν στην τάση διαρροής τους f_{yw} όταν αστοχήσει σε θλίψη ο πυρήνας του κόμβου στη διεύθυνση της σ_{II} , ασκούν στο σκυρόδεμα ως τάση περίσφιγξης στην οριζόντια διεύθυνση ομοιόμορφη θλιπτική τάση $\rho_{jh} f_{yw}$, όπου ρ_{jh} το γεωμετρικό ποσοστό των οριζοντίων οπλισμών ανηγμένο στην κατακόρυφη διάσταση, $b_j h_{bo}$, του πυρήνα του κόμβου. Ο οριζόντιος οπλισμός που απαιτείται για την αποφυγή ρηγμάτωσης στη διεύθυνση της κύριας τάσης σ_1 , προκύπτει έτσι ότι πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\rho_{jh} f_{yw} \geq \frac{v_j^2}{f_{ct} + v f_c} - f_{ct} \quad (2.88)$$

όπου f_{ct} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και τα v , f_c έχουν το ίδιο νόημα όπως στην εξ.(2.87), οπότε η διατμητική τάση που προκαλεί διαγώνια ρηγμάτωση ισούται με:

$$v_j = f_{ct} \sqrt{\left(1 + \frac{v f_c}{f_{ct}}\right) \left(1 + \rho_{jh} \frac{f_{yw}}{f_{ct}}\right)} \quad (2.85a)$$

Για να ισχύει η εξ.(2.87), πρέπει η τιμή της v_j από την εξ.(2.85a) να ξεπερνά την οριακή διατμητική αντοχή, v_{ju} . Αν δεν συμβαίνει αυτό, μετά τη ρηγμάτωσή του ο κόμβος λειτουργεί σαν το σκυρόδεμα να μη διαθέτει εφελκυστική αντοχή ($f_{ct}=0$), οπότε η οριακή αντοχή του δίνεται από την εξ.(2.86).

Επισημαίνεται ότι οι κόμβοι έχουν κοινά σημεία με τα στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης: ταυτόχρονη λειτουργία λοξού θλιπτήρα και μηχανισμού δικτύωματος, τελική αστοχία λόγω ταυτόχρονης εξάντλησης της αντοχής του σκυροδέματος σε διαγώνια θλίψη

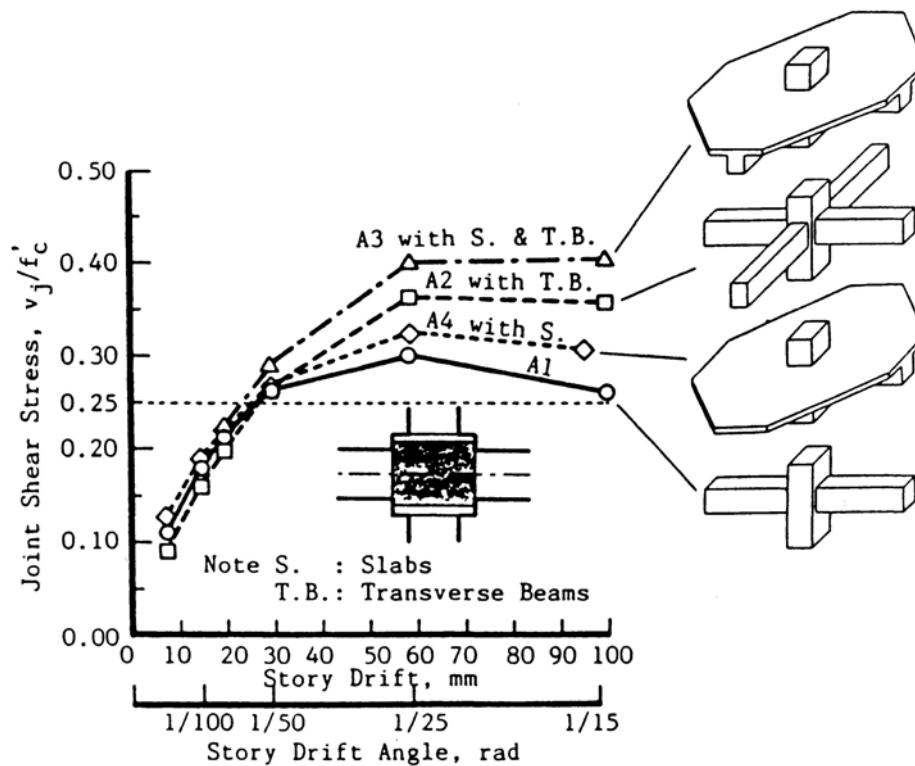
και διαρροής των οριζοντίων (και κατακορύφων) ράβδων κ.α. Έτσι το προσομοίωμα της υποενότητας 2.2.3.3 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής τους, αν ως μήκος διάτμησης L_s ληφθεί το μισό του ύψους του πυρήνα του κόμβου, δηλαδή του $z_b \approx 0,8h_b$ και ως οριζόντιες διαστάσεις διατομής αυτές του πυρήνα του. Από τον τρόπο εξαγωγής του προσομοιώματος της υποενότητας 2.2.3.3 προκύπτει ότι τότε στο ποσοστό κατακόρυφου οπλισμού ω_{tot} πρέπει να προσμετρηθούν μόνον αυτές των άκρων (ή των ακραίων τρίτων) της διατομής του υποστυλώματος. Τέλος, η γωνία θ του δικτυώματος μπορεί να ληφθεί ίση με αυτήν της διαγωνίου του κόμβου ως προς την κατακόρυφο ($\cot\theta \approx h_b/h_c$).

Δοκοί που συντρέχουν στον κόμβο στην εγκάρσια διεύθυνση εγκιβωτίζουν το σκυρόδεμα του πυρήνα του και αυξάνουν σημαντικά τη διατμητική αντοχή του, ιδίως αν οι εγκάρσιες δοκοί είναι δύο (κόμβοι που είναι εσωτερικοί και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις). Αυτό φαίνεται να ερμηνεύει και την πρακτική απουσία διατμητικών αστοχιών εσωτερικών κόμβων σε πραγματικούς σεισμούς, παρά την προφανή ανεπάρκεια της όπλισής τους. Από την άλλη πλευρά βεβαίως, κόμβοι δύο διευθύνσεων μπορεί να καταπονηθούν διατμητικά σε διαγώνια οριζόντια διεύθυνση, ιδίως αν διαρρεύσουν ταυτόχρονα οι δοκοί και των δύο οριζοντίων διευθύνσεων.

Πάντως τα πειράματα των Takiyama et al (1991) που φαίνονται στο Σχ.2.25 έδειξαν ότι η παρουσία εγκάρσιων δοκών αυξάνει τη διατμητική αντοχή v_{ju} του κόμβου από $0.3f_c$ σε $0.36f_c$. Ακόμα και η πλάκα στο πάνω πέλμα αυξάνει στη συγκεκριμένη περίπτωση την τιμή της v_{ju} σε $0.32f_c$ χωρίς εγκάρσιες δοκούς, ή σε $0.4f_c$ με εγκάρσιες δοκούς (αύξηση 33% έναντι του επιπέδου κομβου, ο οποίος αποτελεί τη βάση όλων σχεδόν των πειραμάτων).

Η γωνιακή παραμόρφωση, γ_j , του πυρήνα του κόμβου (Σχήμα 2.22(γ)) προστίθεται στην παραμόρφωση λόγω γωνιών στροφής θ_{sl} από την ολίσθηση των ράβδων και αυξάνει περαιτέρω τη φαινόμενη ευκαμψία των μελών που συντρέχουν στον κόμβο. Και αυτό παρά το ότι η διαγώνιος του κόμβου που βραχύνεται είναι παράλληλη στη διαγώνιο του φατνώματος του πλαισίου που επιμηκύνεται και αντίστροφα (Σχήμα 2.22(γ)) – που σημαίνει ότι αν ο κόμβος και η τυχόν τοιχοπλήρωση του φατνώματος ρηγματωθούν ή αστοχήσουν στον ίδιο ημικύκλο της σεισμικής απόκρισης, αυτό θα συμβεί όχι κατά τις παράλληλες διαγωνίους τους αλλά σε ορθογωνική περίπου διεύθυνση. Η διατμητική παραμόρφωση του κόμβου κατά την αστοχία του σε διαγώνια θλίψη με παράλληλη διαρροή των οριζοντίων ή των κατακορύφων ράβδων ισούται περίπου με $0,005\text{rad}$ (0,5%). Αυτή όμως η τιμή παραμόρφωσης μπορεί να επιτευχθεί ή να ξεπερασθεί μόνον, αν η συνάφεια των ράβδων

διατηρηθεί αρκετά υψηλή, ώστε η ολίσθησή τους και η εξαιτίας της γωνία στροφής θ_{sl} να είναι περιορισμένη. Όπως σ' όλα τα εν σειρά συστήματα, η ευκαμψία του μηχανισμού συνάφειας προστίθεται στη διατμητική του κόμβου και οι μεγάλες παραμορφώσεις του ενός μηχανισμού περιορίζουν το μέγεθος αυτών του άλλου.



Σχήμα 2.25 Επιρροή εγκάρσιων δοκών και πλάκας στο πάνω πέλμα στη διατμητική αντοχή εσωτερικών κόμβων, από Takiyama et al (1991). 1^η καμπύλη από πάνω: εγκάρσιες δοκοί και πλάκα στο πάνω πέλμα. 2^η καμπύλη από πάνω: μόνον εγκάρσιες δοκοί. 3^η καμπύλη από πάνω: μόνον πλάκα στο πάνω πέλμα. Κάτω καμπύλη: επίπεδος κόμβος.

2.4 ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟ

Σκοπός της ενότητας 2.4 είναι να παρουσιάσει τη συνολική συμπεριφορά ενός μέλους οπλισμένου σκυροδέματος από απόψεως αντοχής, παραμορφώσεων και απορρόφησης ενέργειας, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων με κάμψη, διάτμηση και συνάφεια/αγκύρωση και να δείξει πως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθενός από τους μηχανισμούς αυτούς επηρεάζουν τη συνολική συμπεριφορά.

2.4.1 Η ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΜΕΛΟΥΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη μπορούμε να θεωρήσουμε ένα πρισματικό μέλος οπλισμένου σκυροδέματος (ή ακριβέστερα το μήκος διάτμησης L_s κοντά στο κάθε άκρο του μέλους) ως εν σειρά σύστημα τριών (σχεδόν) ανεξάρτητων μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων: ενός καμπτικού, ενός διατμητικού και ενός τρίτου με συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος. Ο ασθενέστερος από τους τρεις αυτούς μηχανισμούς καθορίζει τη συνολική αντοχή του μέλους (ακριβέστερα του μήκους διάτμησης) και κυριαρχεί ποιοτικά και ποσοτικά στη μακροσκοπική σχέση δυνάμεων (δηλαδή ροπής ή τέμνουσας) – συνολικών παραμορφώσεών του. Και τούτο διότι ο ασθενέστερος κρίκος του συστήματος είναι αυτός που θα μπει πρώτος στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς και θα αναπτύξει μεγάλες παραμορφώσεις, την ώρα που οι δύο άλλοι θα λειτουργούν ακόμη στην ελαστική περιοχή και οι παραμορφώσεις τους είναι (και θα είναι) μικρές. Με βάση αυτό το σκεπτικό ο ικανοτικός σχεδιασμός επιλέγει τον πιο πλαστικό από τους τρεις μηχανισμούς, δηλαδή την κάμψη, ως αυτόν που θα διαστασιολογηθεί, ώστε να μπει πρώτος στην ανελαστική περιοχή. Οι άλλοι δύο, όντας εν σειρά με τον πρώτο, δεν μπορούν να αναπτύξουν υψηλότερη ένταση και αναγκαστικά μένουν στην ελαστική περιοχή.

Σε πρισματικά μέλη με λόγο διάτμησης, L_s/h , μεγαλύτερο του 2,0 ή 2,5, η αντοχή των επιμέρους μηχανισμών υπολογίζεται κατά τα γνωστά: Η αντοχή σε κάμψη, με τα ευρέως γνωστά και διαθέσιμα βοηθήματα (εξισώσεις, διαγράμματα, πίνακες) για τη διαστασιολόγηση διατομών σε κάμψη με ορθή δύναμη (βλ. τελευταία παράγραφο υποενότητας 2.2.2.1). Η αντοχή σε ανακυκλιζόμενη τέμνουσα κατά την υποενότητα 2.2.3.2 κλπ. Η αντοχή των αγκυρώσεων και ενώσεων σε συνάφεια εκφράζεται κατά κανόνα έμμεσα, μέσω του διαθέσιμου μήκους αγκύρωσης ή ένωσης, $l_{b,prov}$, ως πολλαπλάσιο ή κλάσμα του απαιτούμενου με βάση την αντοχή σε συνάφεια, $l_{b,req}$, για ασφαλή μεταφορά της τάσης διαρροής του χάλυβα, f_y . Αν $l_{b,prov} < l_{b,req}$, μπορεί η καμπτική αντοχή των ακραίων (διατομών) που χρησιμοποιούν τις πλημμελώς αγκυρωμένες (ή ενωμένες) ράβδους να υπολογισθεί με τάση χάλυβα $f_y l_{b,prov} / l_{b,req}$ αντί f_y .

Εννοείται ότι η αντιστοίχιση μεταξύ των ανεξάρτητα υπολογισμένων αντοχών επιτυγχάνεται μέσω του μήκους διάτμησης L_s : π.χ. η ροπή της ακραίας διατομής που αντιστοιχεί στη διατμητική αντοχή V_u ισούται με $L_s V_u$ και (κανονικά, λόγω του ικανοτικού σχεδιασμού) πρέπει να ξεπερνά τη ροπή αντοχής M_u του μέλους.

Όπως αναπτύχθηκε στην υποενότητα 2.2.3.2, αν ο λόγος διάτμησης του μέλους είναι μικρότερος του 2,0, η καμπτική και η διατμητική αντοχή είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους και δεν μπορούν να υπολογισθούν ανεξάρτητα. Η επιρροή της αντοχής της συνάφειας

μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά τα ανωτέρω, μειώνοντας τη διαθέσιμη διατομή του διαμήκους χάλυβα, π.χ., σε $A_{s,tot} I_{b,prov} / I_{b,req}$ αν $I_{b,prov} < I_{b,req}$.

2.4.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΛΟΥΣ

2.4.2.1 Η γωνία στροφής χορδής ως μέτρο των συνολικών παραμορφώσεων μέλους στο άνοιγμα διάτμησης

Με τη θεώρηση του μέλους (ακριβέστερα του μήκους διάτμησης) ως σύστημα τριών μηχανισμών εν σειρά, οι συνολικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις του είναι το άθροισμα αυτών των επιμέρους μηχανισμών. Για να αξιοποιήσουμε το γεγονός αυτό χρειάζεται να εκφράσουμε τις μετακινήσεις ή παραμορφώσεις του κάθε μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων, μέσω του ίδιου μεγέθους παραμόρφωσης (π.χ. βέλος κάμψης, γωνία στροφής κλπ.). Βολεύει για το σκοπό αυτό η γωνία στροφής χορδής, θ_A , στο άκρο A του μήκους διάτμησης όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή, M_A . Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Κεφάλαιο 1, για την κάμψη η γωνία στροφής χορδής στο A ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον άξονα του μέλους στο A με τη χορδή που ενώνει τα άκρα A και B στο παραμορφωμένο μέλος (αντίστοιχα για τη θ_B στο άκρο B), είναι δε το έργο-αντίστοιχο μέγεθος της ροπής M_A και ο βαθμός ελευθερίας που συνδέεται με τις ροπές M_A , M_B μέσω του ελαστικού μητρώου δυσκαμψίας: $M_A = (2EI/L)(2\theta_A + \theta_B)$, $M_B = (2EI/L)(2\theta_B + \theta_A)$.

Ειδικά για τη σεισμική ένταση – η οποία προκαλεί στο μέλος ακόμα και σε συνδυασμό με κάποια ενδιάμεση εγκάρσια φόρτιση (στις δοκούς) περίπου ευθύγραμμο διάγραμμα ροπών κάμψης με ένα το πολύ σημείο καμψής μεταξύ των άκρων A και B – ο ορισμός της γωνίας στροφής χορδής μπορεί να γενικευθεί ώστε να περιλάβει τις παραμορφώσεις λόγω διάτμησης και λόγω ολίσθησης των οπλισμών από την αγκύρωσή τους πέραν του άκρου A του μέλους. Για το σκοπό αυτό η γωνία θ_A ορίζεται ως αυτή που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής που ενώνει τα άκρα A και B και της καθέτου στην παρειά του κόμβου όπου συντρέχει το μέλος στο A. Έτσι περιλαμβάνεται σ' αυτήν, πέραν της καθαρά καμπτικής γωνίας στροφής χορδής, θ_{Π} και η (μέση) διατμητική παραμόρφωση, $\theta_{sh} = \gamma$, μεταξύ των A και B (που δεν προκαλεί σχετική στροφή των διατομών στα A και B αλλά μόνο σχετική μετακίνησή τους) καθώς και η συγκεντρωμένη γωνία στροφής, θ_{sl} , μεταξύ παρειάς κόμβου και ακραίας διατομής μέλους, που οφείλεται στην ολίσθηση των οπλισμών από την αγκύρωσή τους στον κόμβο (βλ. Σχήμα 2.19(ε) και Σχήμα 2.22(γ), (δ)).

Αν το διάγραμμα ροπών κάμψης είναι περίπου ευθύγραμμο στο μήκος διάτμησης $L_s = M_A/V$ του άκρου A, στην ελαστική περιοχή (δηλαδή μετά τη ρηγμάτωση αλλά πριν την ανάπτυξη ανελαστικών παραμορφώσεων σε κανέναν από τους τρεις μηχανισμούς μεταφοράς

δυνάμεων) η γενικευμένη ως άνω γωνία στροφής χορδής στο A ισούται με:

$$\theta_A = \theta_{fl} + \theta_{sh} + \theta_{sl} = \frac{1}{2} \phi_A L \left(1 - \frac{L}{3L_s} \right) + \theta_{sh} + \theta_{sl} \quad (2.89)$$

όπου ϕ_A η καμπυλότητα στο A και L το μήκος του μέλους. Το L είναι συνήθως μεγαλύτερο του L_s (σε δοκούς, υποστυλώματα), αλλά μπορεί να είναι και μικρότερο (π.χ. σε τοιχώματα, αν ως L ληφθεί το ύψος ενός ορόφου). Για αντισυμμετρική κάμψη είναι $L=2L_s$ και η θ_{fl} ισούται με $\phi_A L_s/3$. Σε μέλη όπου η ανελαστικότητα οφείλεται αποκλειστικά στην κάμψη (όπως άλλωστε επιβάλλει και ο ικανοτικός τους σχεδιασμός), μετά τη διαρροή στο άκρο A όταν $\phi_A = \phi_y$, στον όρο θ_{fl} η ϕ_A αντικαθίσταται με ϕ_y και προστίθεται η γωνία στροφής της πλαστικής άρθρωσης, ίση με $(\phi_A - \phi_y)L_{pl}(L - 0,5L_{pl})$.

Στα συνήθη πειραματικά δοκίμια που έχουν μορφή απλού προβόλου ή αμφίπακτου υποστυλώματος, η (γενικευμένη) γωνία στροφής χορδής ισούται με την ανηγμένη στο ύψος του δοκιμίου σχετική μετάθεση των δύο άκρων. Σε πλαισιακού τύπου δομικά συστήματα μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η σχετική οριζόντια μετακίνηση διαδοχικών πατωμάτων, δ , ανηγμένη στην αντίστοιχη διαφορά ύψους, δηλαδή στο ύψος ορόφου H_{op} . Ο λόγος δ/H_{op} ονομάζεται σχετική (ανηγμένη) μετάθεση ορόφων ή γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (drift). Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.1, οι αντισεισμικοί κανονισμοί θέτουν συνήθως κάποιο ανώτατο όριο στο μέγεθος του δ/H_{op} υπό το “συχνό” ή τον “ενδεχόμενο” σεισμό για λόγους προστασίας των μη φερόντων στοιχείων πλήρωσης των φατωμάτων του δομικού συστήματος (τοιχων, υαλοστασιών κ.α). Επίσης, ο λόγος της συνολικής έντασης δευτέρας τάξης στον όροφο προς την πρώτη τάξης υπό το σεισμό σχεδιασμού, ισούται με το γινόμενο του δ/H_{op} επί το λόγο N/V της συνολικής κατακόρυφης προς τη συνολική οριζόντια δύναμη (την τέμνουσα ορόφου V) από την στάθμη του ορόφου και πάνω. Από απλή γεωμετρία προκύπτει ότι η τιμή του δ/H_{op} στον όροφο ισούται με το άθροισμα:

- α) της μέσης γωνίας στροφής χορδής στα δύο άκρα των δοκών των δύο πατωμάτων που περικλείουν τον όροφο,
- β) της μέσης γωνίας στροφής χορδής στα δύο άκρα των υποστυλωμάτων του ορόφου και
- γ) της μέσης διατμητικής (γωνιακής) παραμόρφωσης γ_j των κόμβων των δύο πατωμάτων πάνω και κάτω από τον όροφο. Μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού των υποστυλωμάτων σε κάμψη και των κόμβων σε διάτμηση, ο αντισεισμικός σχεδιασμός επιδιώκει να αναθέσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα μιας δεδομένης τιμής του δ/H_{op} στις δοκούς, αντί στα υποστυλώματα και στους κόμβους.

2.4.2.2 Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή του μέλους σε κάμψη

Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην (καμπτική συνήθως) διαρροή του μέλους, θ_y . Ακόμα και σε στοιχεία με λόγο διάτμησης μικρότερο του 2,0 (μέχρι και $L_s/h \approx 1,0$) η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή ισούται περίπου με την τιμή που δίνεται από τις εξ.(2.48) ή (2.49), που χρησιμοποιηθήκε ήδη στις Υποενότητες 2.2.2.4 και 2.2.3.2.2.

Με βάση την τιμή της θ_y από τις εξ.(2.48) ή (2.49), και τη ροπή διαρροής M_y από την εξ.(2.30) μπορεί να υπολογισθεί η ενεργός δυσκαμψία του ρηγματωμένου μέλους μέχρι τη διαρροή του, ως:

$$(EI)_{ef} = \frac{M_y}{3\theta_y} L_s \quad (2.90)$$

Η τιμή αυτή της $(EI)_{ef}$ είναι μικρότερη του M_y/ϕ_y που αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.2.1 ως ενεργός δυσκαμψία διατομής, καθ' ότι η θ_y περιλαμβάνει παραμορφώσεις και από πηγές πέραν της κάμψης.

Σε μέλη με διαφορετικό οπλισμό στα δύο πέλαμα η εξ.(2.90) δίνει διαφορετικές τιμές της $(EI)_{ef}$ για θετική ή για αρνητική κάμψη: η ενεργός δυσκαμψία είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη, όταν το πέλαμα με τον περισσότερο οπλισμό εφελκύεται. Αν χρειαζόμαστε μία και μοναδική τιμή του $(EI)_{ef}$ για το μέλος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μέσο όρο των δύο άκρων και για τα δύο πρόσημα της κάμψης.

Η αναλογία μεταξύ των τριών συνιστωσών της συνολικής γωνίας στροφής χορδής μεταβάλλεται κάπως από τη διαρροή μέχρι την αστοχία. Αν ο λόγος διάτμησης είναι σχετικά χαμηλός ή αν η αστοχία συμβαίνει τελικά λόγω διάτμησης (βλ. Υποενότητα 2.2.3.2.2), οι διατμητικές παραμορφώσεις να αυξάνονται ταχύτερα από τις δύο άλλες.

2.4.2.3 Γωνία στροφής χορδής στην καμπτική αστοχία

Η ικανότητα παραμόρφωσης του μέλους εκφράζεται κατά κανόνα μέσω της παραμόρφωσής του στην αστοχία, στην προκειμένη περίπτωση δηλ. μέσω της θ_u . Αν οι ανελαστικές παραμορφώσεις είναι αποκλειστικά καμπτικής φύσεως, η θ_u θα μπορούσε να υπολογισθεί από την εξ.(2.41), με αντικατάσταση του όρου $\phi_y L_s/3$ με την θ_y από την εξ.(2.48) ή (2.49) και με τιμή του L_{pl} που ισχύει για το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ϕ_u . Όμως, όπως αναφέρθηκε ήδη στην υποενότητα 2.2.3.2.2, ακόμα και σε μέλη που διαρρέουν ξεκάθαρα λόγω κάμψης, αναπτύσσονται – ιδιαίτερα με την ανακύκλιση της έντασης και της παραμόρφωσης – περαιτέρω διατμητικές παραμορφώσεις,

που δεν καλύπτονται από το δεύτερο όρο της εξ.(2.48) ή (2.49). Το ίδιο ισχύει σε κάποιο βαθμό και για τις παραμορφώσεις λόγω ολίσθησης στην αγκύρωση. Επιπλέον, στα μέλη με χαμηλό λόγο διάτμησης τα διατμητικά φαινόμενα δεν μπορούν να διαχωρισθούν από τα καμπτικά. Έτσι η γωνία στροφής χορδής, θ_u , στο μήκος διάτμησης ενός μέλους που αστοχεί λόγω κάμψης προβλέπεται πιο αποτελεσματικά από καθαρά εμπειρικές σχέσεις. Τέτοια σχέση είναι η εξής:

$$\theta_u = \alpha_{st}(1-0.42a_{cy})(1+0.5a_{sl})\left(1-\frac{3}{8}a_{wall}\right)\left(0.3^v\left[\frac{\max(0.01,\omega)}{\max(0.01,\omega)}\right]f_c\right)^{0.225}\left(\frac{L_s}{h}\right)^{0.35}25^{\left(\alpha_{ps}\frac{f_{yw}}{f_c}\right)}1.25^{100\rho_d} \quad (2.91)$$

Στην εξ.(2.91):

- Ο συντελεστής α_{st} ισούται με:
 - ο $\alpha_{st} = 0,0185$ για πολύ όλκιμους χάλυβες με υψηλό λόγο κράτυνσης, f_t/f_y , και μήκυνσης θραύσης ε_{su} , - όπως ήταν οι χάλυβες S220 ή StI και S400 ή StIII που παράγονταν και χρησιμοποιούνταν στην Ελλάδα μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 - καθώς και για χάλυβες τύπου tempcore - όπως οι S500s και S400s που κυριαρχούν σήμερα στην Ελληνική και την Ευρωπαϊκή αγορά,
 - ο με $\alpha_{st} = 0,0115$ για τους πολύ ψαθυρούς χάλυβες ψυχρής κατεργασίας, που χρησιμοποιούνται σήμερα και στο παρελθόν στη Βόρειο και Κεντρική Ευρώπη (αλλά και στην Ελλάδα με τη μορφή δομικών πλεγμάτων), οι οποίοι ικανοποιούν οριακά τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 2 για χάλυβα τύπου A, όχι όμως και αυτές για το χάλυβα τύπου B που επιτρέπεται στις αντισεισμικές κατασκευές.
- Η μεταβλητή a_{cyc} ισούται με 1 για μονοτονική φόρτιση και με 0 για ανακυκλιζόμενη με πολλούς κύκλους, του τύπου που συνήθως επιβάλλεται στα πειράματα ή αναμένεται σε ισχυρό σεισμό μεγάλης διάρκειας.
- Η μεταβλητή a_{sl} ισούται με 0, αν δεν είναι δυνατή η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων από τη ζώνη αγκύρωσης πέραν της ακραίας διατομής, ή με 1 αν είναι δυνατή.
- Η μεταβλητή a_{wall} ισούται με 1 για τοιχώματα και με 0 για γραμμικά πρισματικά μέλη (δοκούς, υποστυλώματα).
- ω_1, ω_2 είναι τα μηχανικά ποσοστά εφελκόμενου και θλιβόμενου χάλυβα, ανηγμένα στο γινόμενο του πλάτους του θλιβόμενου πέλματος b επί το πλήρες ύψος h . Σε μέλη υπό ανακυκλιζόμενη κάμψη με $\omega_1 \neq \omega_2$, ως ω_1 λαμβάνεται πάντοτε το μεγαλύτερο από τα δύο μηχανικά ποσοστά οπλισμού ($\omega_1 > \omega_2$). Το μηχανικό ποσοστό του οπλισμού κορμού, ω_v , περιλαμβάνεται (μαζί με αυτό του εφελκόμενου πέλματος) στο ω_1 .
- $v = N/bhf_c$ είναι η αξονική δύναμη (θετική για θλίψη), ανηγμένη όχι στη συνολική επιφάνεια

διατομής, A_c , αλλά στο γινόμενο του πλάτους του θλιβόμενου πέλματος b επί το πλήρες ύψος h .

- Ο λόγος διάτμησης, $L_s/h=M/Vh$, αναφέρεται στο μήκος διάτμησης L_s .
- Η αντοχή σκυροδέματος f_c είναι σε MPa.
- Το ποσοστό οπλισμού συνδετήρων, ρ_s , αφορά μόνο τα σκέλη τους που είναι παράλληλα στη διεύθυνση της κάμψης.
- Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης, α , δίνεται από την εξ.(2.18), με εφαρμογή των εξ.(2.14)-(2.18).
- Ο τελευταίος όρος αφορά μέλη με δισδιαγώνιο οπλισμό, το ποσοστό $\rho_d=A_{sd}/b_w h$ του οποίου αφορά τους οπλισμούς της μίας διεύθυνσης μόνο.

Οι τάσεις αύξησης ή μείωσης της ικανότητας παραμόρφωσης με τις διάφορες παραμέτρους του σχεδιασμού είναι οι αναμενόμενες: αύξηση με τα ω_2 , f_c , L_s/h , ρ_s , ρ_d και την ολκιμότητα του χάλυβα, μείωση με τα ω_1 , ω_v , ν και με την ανακύκλιση.

Η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής μ_θ (ή μετακινήσεων) του μήκους διάτμησης ισούται με $\mu_\theta=\theta_u/\theta_y$, με θ_u και θ_y από τις εξ.(2.91), (2.48) ή (2.49).

Εναλλακτικά, μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά μόνο το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής, $\theta_u^{pl} = \theta_u - \theta_y$, του μήκους διάτμησης ενός μέλους που αστοχεί λόγω κάμψης:

$$\theta_u^{pl} = \alpha_{st}^{pl} (1 - 0.52a_{cy}) (1 + a_{sl}/1.6) (1 - 0.4a_{wall}) (0.25)^\nu \left(\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} \right)^{0.3} f_c^{0.2} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha_{\rho_s} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} 1.275^{100\rho_d} \quad (2.92)$$

Η μόνη διαφορά στην περίπτωση αυτή ως προς όσα ορίζονται για την εξ.(2.91) είναι η τιμή του συντελεστή α_{st}^{pl} , ο οποίος ισούται με:

- $\alpha_{st}^{pl} = 0,0185$ για πολύ όλκιμους χάλυβες με υψηλό λόγο κράτυνσης, f_t/f_y , και μήκυνσης θραύσης ε_{su} , - καθώς και για χάλυβες τύπου tempcore,
- $\alpha_{st}^{pl} = 0,009$ για ψαθυρούς χάλυβες ψυχρής κατεργασίας, που ικανοποιούν οριακά τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 2 για χάλυβα τύπου A, όχι όμως αυτές για χάλυβα τύπου B.

Η τιμή της θ_y που χρειάζεται να προστεθεί στην θ_u^{pl} της εξ.(2.92) για τον υπολογισμό της θ_u είναι αυτή που δίνεται από τις εξ.(2.48) ή (2.49).

Τα ανωτέρω ισχύουν για στοιχεία που κατασκευάζονται με κατασκευαστικές λεπτομέρειες σύμφωνες με τους σύγχρονους αντισεισμικούς Κανονισμούς (π.χ. στην Ελλάδα, μετά το 1985). Για στοιχεία που δεν έχουν κατασκευασθεί σύμφωνα με τέτοιες διατάξεις, για υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (δηλ. όταν το $a_{cyc}=1$), το δεξιό μέλος της εξ.(2.91) χρειάζεται να πολλαπλασιασθεί περαιτέρω επί 0,85 και αυτό της εξ.(2.92) επί 0,9.

Αυτό είναι ισοδύναμο με πολλαπλασιασμό του συντελεστή a_{cyc} επί ένα επιπλέον συντελεστή a_{old} με τιμή $a_{old}=1,1$ για την εξ.(2.91), ή $a_{old}=1,2$ για την εξ.(2.92).

2.4.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΕΝΩΣΗΣ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ (ΜΑΤΙΣΜΑΤΟΣ) ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΑΚΡΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΜΕ ΝΕΥΡΩΣΕΙΣ

Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι στη διατομή βάσης υποστυλώματος ή τοιχώματος όπου διαμήκεις οπλισμοί με νευρώσεις ενώνονται με παράθεση (υπερκάλυψη, ματίσμα) των ευθύγραμμων άκρων τους, η ροπή αστοχίας (ή διαρροής) M_y και η καμπυλότητα διαρροής φ_y μπορούν να υπολογίζονται με βάση τις εξής υποθέσεις:

- Στο μήκος της ένωσης το ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού λαμβάνεται διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός της περιοχής ένωσης (δηλαδή, τα δύο επικαλυπτόμενα άκρα των θλιβόμενων ράβδων προσμετρώνται στο θλιβόμενο οπλισμό).
- Η τάση των εφελκυσμένων ράβδων λαμβάνεται ότι αυξάνεται γραμμικά από μηδέν στο άκρο τους έως την τάση διαρροής, f_y , σε απόσταση από το άκρο ίση με το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης, $l_{b,min}$, που απαιτείται για την ανάπτυξη της πλήρους ροπής αστοχίας (ή διαρροής) της διατομής. Άρα, αν το μήκος παράθεσης l_b είναι μικρότερο του $l_{b,min}$, στην περιοχή της ένωσης η τάση διαρροής των εφελκυσμένων ράβδων λαμβάνεται ίση με f_y επί το λόγο $l_b/l_{b,min}$. Κατά καλή προσέγγιση είναι: $l_{b,min} = 0,3d_b f_y / \sqrt{f_c}$ με f_y, f_c σε MPa.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα που διατίθενται, η επιρροή της ένωσης με παράθεση ευθύγραμμων άκρων ράβδων με νευρώσεις στη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, θ_y , στη βάση υποστυλώματος ή τοιχώματος όπου διαμήκεις οπλισμοί με νευρώσεις ενώνονται με παράθεση (μάτισμα) των ευθύγραμμων άκρων τους, μπορεί να ληφθεί υπόψη ως εξής:

- Η τιμή της καμπυλότητας διαρροής φ_y που χρησιμοποιείται στις εξ.(2.48), (2.49), καθώς και της ροπής αστοχίας (ή διαρροής) που συγκρίνεται με το γινόμενο $V_{Rc}L_s$ ως κριτήριο για την τιμή του όρου α_v , υπολογίζονται σύμφωνα με τις υποθέσεις της προηγούμενης παραγράφου.
- Εάν η παράθεση των ευθύγραμμων άκρων γίνεται σε μήκος l_b μικρότερο του $l_{b,min}$, τότε:
 - ο 2ος όρος των εξ.(2.48), (2.49), πολλαπλασιάζεται επί το λόγο της ροπής αστοχίας (ή διαρροής) που υπολογίζεται με βάση τις υποθέσεις της προηγούμενης παραγράφου προς την τιμή της εκτός του μήκους παράθεσης
 - στον 3ο όρο των εξ.(2.48), (2.49), η f_y και η ε_y πολλαπλασιάζονται επί $l_b/l_{b,min}$.

Επίσης σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα που διατίθενται, η επιρροή της ένωσης με παράθεση ευθύγραμμων άκρων ράβδων με νευρώσεις στη γωνία στροφής χορδής στην καμπτική αστοχία στη βάση υποστυλώματος ή τοιχώματος όπου διαμήκεις οπλισμοί με νευρώσεις ενώνονται με παράθεση (ματίσμα) των ευθύγραμμων άκρων τους σε μήκος l_b , μπορεί να ληφθεί υπόψη ως εξής:

- Το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία του στοιχείου μπορεί να υπολογισθεί από την εξ.(2.92):
 - με ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού ω' που λαμβάνεται διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός της περιοχής, και
 - με πολλαπλασιασμό του δεξιά μέλους της εξ.(2.92) επί $(l_b - 10d_{bL})/30d_{bL}$, εφόσον $l_b < 40d_{bL}$.

2.3.4 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΗ

Η απόκριση ενός ελαστικού συστήματος σε δεδομένο σεισμό μειώνεται, όσο αυξάνεται η απορρόφηση ενέργειας ταλάντωσης και η μετατροπή της από μηχανική σε άλλες μορφές ενέργειες (θερμότητα). Για μαθηματικούς (κυρίως) λόγους αυτή η απορρόφηση ενέργειας έχει επικρατήσει να εκφράζεται ως ιξώδης απόσβεση μέσω του συντελεστή απόσβεσης ζ . Η απορρόφηση ενέργειας από τους βρόχους υστέρησης έντασης-(αντίστοιχης) παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός ισοδύναμου συντελεστή απόσβεσης, ζ_{eq} , που ισούται με την ενέργεια ΔE που απορροφάται σ' ένα πλήρη βρόχο υστέρησης μεταξύ ίσων και αντίθετων ακραίων τιμών έντασης και παραμόρφωσης, δια 4π επί την ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης στην κορυφή του βρόχου. Η ενέργεια ΔE ισούται βεβαίως με το εμβαδόν που περικλείεται από το βρόχο. Αν η ενεργός δυσκαμψία, που ισούται με την κλίση της επιβατικής ακτίνας μέχρι την κορυφή του βρόχου, είναι σταθερή κατά τη σεισμική απόκριση, η μέγιστη απόκριση μπορεί να υπολογισθεί θεωρώντας ελαστικό σύστημα με αυτή την ενεργό δυσκαμψία και ιξώδη απόσβεση με συντελεστή ζ_{eq} . Επομένως, όσο πιο μεγάλο εύρος έχουν οι βρόχοι υστέρησης και όσο περισσότερο εμβαδόν περικλείουν, τόσο μικρότερη θα είναι η μέγιστη απόκριση σε δεδομένο σεισμό. Επιπλέον, είναι προφανές ότι οι βρόχοι υστέρησης πρέπει να παραμένουν σταθεροί με την επανάληψη της ανακύκλισης (όπως π.χ. αυτοί των Σχημάτων 1.1(β) του Κεφαλαίου 1 και των Σχημάτων 2.15, 2.16, 2.18(α), 2.19(α), (β) του Κεφαλαίου 2) και να μη συρρικνώνονται ή καταρρέουν (όπως π.χ. αυτοί του Σχήματος 1.1(δ) του Κεφαλαίου 1 και των Σχημάτων 2.18(β), 2.19(γ), (δ) του Κεφαλαίου 2): Αν οι βρόχοι υστέρησης συρρικνώνονται με την ανακύκλιση, το μέλος και το δομικό σύστημα θα μπορεί να απορροφά ενέργεια στον πρώτο μεγάλο κύκλο ανελαστικής απόκρισης, όχι όμως και στους τυχόν επόμενους.

Η ενέργεια που απορροφάται συνολικά σ' ένα δομικό σύστημα κατά την απόκριση ισούται με το άθροισμα αυτής που απορροφάται στα επιμέρους στοιχεία του. Αυτή δε η τελευταία ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που απορροφάται: α) με κάμψη, β) με διάτμηση και γ) κατά την ολίσθηση των οπλισμών στις ζώνες αγκύρωσης. Η κατανομή της απορρόφησης ενέργειας στους μηχανισμούς αυτούς δεν είναι εύκολο να μετρηθεί. Κατά κανόνα μετράται η ενέργεια που απορροφάται συνολικά, ως το εμβαδόν που περικλείεται από τους βρόχους της (σταθερής στο μήκος διάτμησης L_s) τέμνουσας V συναρτήσεως της μετακίνησης δ (βέλος) στο άκρο του, ή ισοδύναμα της ροπής στο άκρο, $M_A=VL_s$, συναρτήσεως της γωνίας στροφής χορδής, $\theta_A=\delta/L_s$, με την προϋπόθεση βεβαίως ότι η δ και η θ_A περιλαμβάνουν την επιρροή της στροφής, θ_{sl} , του συνόλου του μήκους διάτμησης λόγω ολίσθησης των ράβδων από την αγκύρωσή τους στον κόμβο (βλ. Σχήμα 1.1(β) και (δ) στο Κεφάλαιο 1, Σχήμα 2.19(ε) στο Κεφάλαιο 2). Ομως, επειδή οι βρόχοι συνάφειας-ολίσθησης οπλισμών (Σχήμα 2.14), ή τέμνουσας-διατμητικής ολίσθησης (Σχήμα 2.13) ή τέμνουσας-διατμητικής παραμόρφωσης (Σχήματα 2.18(β), 2.19(γ), (δ)) χαρακτηρίζονται από έντονη στένωση και αστάθεια με την ανακύκλιση, όσο πιο έντονη είναι η παρουσία και η επιρροή της ολίσθησης και της διάτμησης στη συνολική ανελαστική απόκριση, τόσο περισσότερο η στένωση και η αστάθεια των βρόχων βάζουν τη σφραγίδα τους και στους βρόχους έντασης-παραμόρφωσης της συνολικής συμπεριφοράς (Σχήμα 2.19(ε)).

Κατά κανόνα η συμπεριφορά μέχρι την καμπτική διαρροή λαμβάνεται στους υπολογισμούς ως γραμμική ελαστική, με την ενεργό δυσκαμψία του ρηγματωμένου μέλους. Λόγω όμως της ρηγμάτωσης και άλλων δευτερευόντων μη-γραμμικών φαινομένων που συμβαίνουν πριν την καμπτική διαρροή, υπάρχει και τότε υστερητική απορρόφηση ενέργειας από τα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος, που ισοδυναμεί με μέσο συντελεστή απόσβεσης, ζ_{eq} , ίσο σχεδόν με 8% (υψηλότερο δηλαδή του 5% που λαμβάνεται κατά κανόνα για τον υπολογισμό της ελαστικής απόκρισης). Μετά τη διαρροή η υστερητική απορρόφηση ενέργειας αυξάνεται με το μέγεθος της μέγιστης ανελαστικής παραμόρφωσης, καθώς μεγαλώνει το εύρος των βρόχων υστέρησης. Για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με κατασκευαστική διαμόρφωση και όπλιση σύμφωνα με τις σύγχρονες αντισεισμικές αντιλήψεις και κανονισμούς, η απορρόφηση ενέργειας σ' ένα συμμετρικό κύκλο μετακινήσεων μέχρι δείκτη πλαστιμότητας (μετακινήσεων ή γωνιών στροφής) μ , περιγράφεται, κατά μέσο όρο, από την εξής προσεγγιστική σχέση για τον ισοδύναμο συντελεστή απόσβεσης, η οποία περιλαμβάνει και τη μέση τιμή του 8% για $\mu < 1$ (Panagiotakos and Fardis, 1996):

$$\zeta_{eq} (\%) = 8 + \left(12,5 + 1,35 \frac{L_s}{h} - 7,5\nu \right) \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (2.93)$$

Η τάση αύξησης της απόσβεσης με το L_s/h αντικατοπτρίζει τη μείωση της επιρροής της διάτμησης και των διατμητικών παραμορφώσεων στη συνολική συμπεριφορά, όσο αυξάνεται ο λόγος διάτμησης. Επίσης η μείωση της απόσβεσης με το ν αντικατοπτρίζει την αύξηση της στένωσης των βρόχων με την αξονική θλίψη. Οι λοιπές παράμετροι (ποσότητα οπλισμών κ.α.) δεν φαίνεται να επηρεάζουν συστηματικά την απόσβεση. Για μεγάλες τιμές της απαιτούμενης πλαστιμότητας μ , η ισοδύναμη απόσβεση λόγω ανελαστικότητας τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή του τριώνυμου όρου στην παρένθεση. Αυτή είναι πολύ μικρότερη από την τιμή του $\zeta \approx 60\%$ που προκύπτει από διγραμμικό νόμο ανακυκλιζόμενης έντασης-παραμόρφωσης (αποφόρτιση με κλίση ίση με την αρχική ελαστική μέχρι τη διαρροή στην αντίθετη κατεύθυνση σε ίση και αντίθετη ένταση, όπως συμβαίνει περίπου στο χάλυβα χωρίς λυγισμό και χωρίς σημαντικό φαινόμενο Bauschinger).

Η πρακτική σημασία της εξ.(2.93) είναι περισσότερο ποιοτική, όσον αφορά την επιρροή του L_s/h και του ν κλπ.), παρά ποσοτική. Για την εκτίμηση της απόκρισης στο σεισμό, η εξ.(2.93) θα πρέπει να εφαρμοσθεί με ενεργό οιονεί ελαστική δυσκαμψία ίση με την κλίση της επιβατικής ακτίνας στην κορυφή του βρόχου. Δεδομένου ότι η μέγιστη δύναμη του βρόχου δεν ξεπερνά σημαντικά την αντίστοιχη στη διαρροή, η ενεργός δυσκαμψία ισούται με την αρχική ελαστική διαιρεμένη δια μ .

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

ACI, 2002. "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)". American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

AIJ, 1994 *AIJ Structural Design Guidelines for Reinforced Concrete Buildings*, Architectural Institute of Japan (AIJ), Tokyo, Japan.

Ascheim, M.A. and Moehle, J.P., 1992 Shear Strength and Deformability of RC Bridge Columns Subjected to Inelastic Cyclic Displacements, Univ. of California, Earthq. Engng. Res. Center, Rep. UCB/EERC-92/04, Berkeley, Ca.

Balazs, G.L. 1991 "Fatigue of Bond", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No.6, Nov.-Dec. 1991, p. 620-629.

Biskinis, D., Roupakias, G., and Fardis, M.N. 2002: Stiffness and Cyclic Deformation Capacity of Circular Concrete Columns. In «Befestigungstechnik, Bewehrungstechnik und..»; Volume honouring the 60th birthday of Prof. R.Eligehausen. (W. Fuchs and H.-W. Reinhardt, eds.). ibidem, Stuttgart, σελ. 321-330.

Biskinis, D.E., Roupakias, G.K. and Fardis, M.N. 2004 "Degradation of Shear Strength of RC Members with Inelastic Cyclic Displacements", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 6.

Biskinis, D.E. and Fardis, M.N. 2004 "Cyclic Strength and Deformation Capacity of RC Members, including Members Retrofitted for Earthquake Resistance", Proc. 5th International Ph.D Symposium in Civil Engineering, Delft, June 2004, Balkema, Rotterdam.

Carvalho, E.C. and Coelho, E. 1997 "Numerical Investigations on the Seismic Response of R.C. Frames Designed in Accordance with Eurocode 8", ECOEST-PREC8, Report No.7, Sept. 1997, LNEC, Lisbon.

CEB 1988 "Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading", Bull. d' Information No. 187, Comite Euro-International du Beton. Lausanne, Switzerland.

CEB 1991 "CEB-FIP Model Code 1990", Bull. d' Information No. 203/204/205, Comite Euro-International du Beton. Lausanne, Switzerland.

CEN, 2003a. European (draft) Standard EN 1998-1: "Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1: General rules, Seismic actions and rules for buildings", Comite Europeen de Normalisation, Bruxelles, Nov. 2003.

CEN, 2003b. European (draft) Standard EN 1992-1-1: "Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", Comite Europeen de Normalisation, Bruxelles, May 2003.

Huang Z., Engström, B., Magnusson, J. 1996 "Experimental and Analytical Studies of the

Bond Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete. Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete. Proceedings, Vol. 3, Laboratoires des Ponts et Chaussees, Paris, 1996, pp. 1115-1124.

Kaku, T. and Asakusa, H. 1991 "Bond and Anchorage of Bars in Reinforced Concrete Beam-Column Joints", "Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance", ACI Special Publication SP123, American Concrete Institute, Detroit, MI. pp. 401-424.

Karsan, D.I., 1968 "Behavior of Plain Concrete under Variable Load Histories", Ph.D. Thesis, Rice University, Houston, Texas.

Kitayama, K., Otani, S. and Aoyama, H. 1991 "Development of Design Criteria for RC Interior Beam-Column Joints" Proc. "Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance", ACI Special Publication SP123, American Concrete Institute, Detroit, MI. pp. 97-124.

Kowalsky, M.J. and Priestley, M.J.N., 2000: Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions. *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 3, σελ.388-396.

Liable, J.P. et al, 1977 "Experimental Investigation of Seismic Shear Transfer Across Cracks in Concrete Nuclear Containment Vessels", ACI Special Publication SP53, American Concrete Institute, Detroit, MI, σ. 203-226.

Ma, S-Y.M., Bertero, V.V. and Popov, E.P. 1976 "Experimental and Analytical Studies on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams", Report No. EERC 76-2, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., 1988a "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, 8, p.1804-1826.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., 1988b "Observed Stress-strain Behavior of Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, 8, p.1827-1849.

Moehle J., Lynn A., Elwood K., Sezen H. 2001. Gravity load collapse of building frames during earthquakes. PEER Report: 2nd US-Japan Workshop on Performance-based Design Methodology for Reinforced Concrete Building Structures. PEER Center, Richmond, CA.

Monti, G. and Nuti, C. 1992 "Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No.12, p. 3268-3284.

Newman, K. and Newman, J.B. 1971 "Failure Theories and Design Criteria for Plain Concrete", in *Structure, Solid Mechanics and Engineering Design*, edited by Te'eni, J. Willey-Interscience, New York, N.Y.

Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N. 1996 "Hysteretic Damping of Reinforced Concrete

Elements”, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, June, 1996, p. P-5 (464).

Pantazopoulou, S.J. and Bonacci, J.F. 1994 "On Earthquake Resistant R.C. Frame Connections", *Canadian Journal of Civil Engineering*, NRC, Vol. 21, 2, p. 307-328.

Paulay, T. and Priestley, M.J.N., 1992 *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, J. Wiley, New York, N.Y.

Restrepo-Posada, J.I., Dodd, L.L. and Park, R., 1994 “Variables Affecting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, 11, p. 3178-3196.

Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L. 1928 “A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses”, Bulletin 185, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign, Ill.

Sheikh, S.A., and Uzumeri, S.M., 1982 "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 108, ST12, p. 2703-2722.

Standards New Zealand 1992 “Code of Practice for General Structural Design and Design Loadings for Buildings, NZS 4203:1992”, Wellington, New Zealand.

Standards New Zealand 1995 “Concrete Structures Standard, NZS 3101:1995”, Wellington, New Zealand.

Suda, K., Murayama, Y., Ichinomiya, T. and Shimbo, H. 1996 “Buckling Behavior of Longitudinal Reinforcing Bars in Concrete Column Subjected to Reverse Lateral Loading”, Proc. 11th World Conference Earthquake Engineering, Acapulco, 1996.

Vintzeleou, E.N. and Tassios, T.P. 1987 “Behavior of Dowels under Cyclic Deformations”, *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No.1, p. 18-30.

Wang, T.Y., Bertero, V.V. and Popov, E.P. 1975 “Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Framed Walls”, Report No. EERC 75-23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Willam, K.J. and Warnke, E.P., 1975 “Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete”, Proc., International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, p. 1-30.

Μπισκίνης, Δ.Ε., Ρουπακιάς, Γ.Κ. και Φαρδής, Μ.Ν. 2003 “Αντοχή και Διαστασιολόγηση Μελών Ο.Σ. έναντι Ανακυκλιζόμενης Τέμνουσας”, 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κώς, Οκτώβριος 2003, Τομ. Ι.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 1999. “Κανονισμός για τη Μελέτη και Κατασκευή Εργων από Σκυρόδεμα”, ΦΕΚ 1329B/6-11-2000.

ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΟΡΩΝ (συμπληρωματικός του Κεφαλαίου 1)

- Αλληλοεμπλοκή αδρανών (aggregate interlock, interface shear transfer): Η μεταφορά από μία ρωγμή διατμητικών τάσεων και δυνάμεων παράλληλων στο επίπεδο της με τριβή μεταξύ των δύο απέναντι επιφανειών της ρωγμής, χάριν στις ανωμαλίες τους και στην αξονική θλίψη ή στους οπλισμούς κάθετα στη ρωγμή, που τη βοηθούν να μένει κλειστή.
- Αποφλοΐωση (spalling): Η απώλεια του επιφανειακού φλοιού σκυροδέματος έξω από τους συνδετήρες, λόγω εξάντλησης της τιμής της βράχυνσης αστοχίας του, ϵ_{cu} , χωρίς περίσφιγξη.
- Βράχυνση αστοχίας σκυροδέματος, ϵ_{cu} (ultimate concrete strain): Η τιμή της βράχυνσης του σκυροδέματος στην οποία αυτό θεωρείται ότι συντρίβεται και παύει να αναλαμβάνει οποιαδήποτε τάση. Ορίζεται συμβατικά έτσι ώστε το μέχρι εκεί εμβαδόν κάτω από το φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος σ - ϵ να ισούται με το γινόμενο της αντοχής f_c επί τη διαφορά της ϵ_{cu} από τη βράχυνση στην κορυφή του διαγράμματος, ϵ_{co} .
- Βρόχος υστέρησης (hysteresis loop): Το κλειστό σχήμα που σχηματίζεται από τους κλάδους σ - ϵ κατά τη μετάβαση από ένα συνδυασμό τάσης και παραμόρφωσης σε ένα άλλο και την επάνοδο στην αρχική τιμή τάσης και παραμόρφωσης.
- Διατμητική παραμόρφωση, γ (shear strain, shear deformation): Το συμπλήρωμα της γωνίας που σχηματίζουν μετά την παραμόρφωση, δύο αρχικά κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.
- Δράση βλήτρου (dowel action): Η μεταφορά τέμνουσας παράλληλα στο επίπεδο μιας ρωγμής, μέσω τέμνουσας δύναμης που αναπτύσσεται σε ράβδους που διαπερνούν κάθετα τη ρωγμή, με τη βοήθεια θλιπτικών τάσεων επαφής μεταξύ της ράβδου και του σκυροδέματος στις δύο απέναντι πλευρές της ρωγμής.
- Καμπυλότητα, ϕ (curvature): Η σχετική γωνία στροφής δύο διατομών του μέλους διά της μεταξύ τους απόστασης.
- Κράτυνση χάλυβα (strain hardening): Η αύξηση της τάσης σ λόγω αύξησης της παραμόρφωσης του χάλυβα, στο διάστημα μεταξύ του πλατώ διαρροής όπου $\sigma=f_y$ και της εφελκυστικής αντοχής f_t (κορυφής του διαγράμματος).
- Λόγος διάτμησης (shear span ratio): Ο λόγος του μήκους διάτμησης, $L_s=M/V$, προς το ύψος h (ή το στατικό ύψος d) του μέλους.
- Λόγος κράτυνσης (hardening ratio): Ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα, f_t , προς την τάση διαρροής του, f_y .
- Μήκος λυγισμού (buckling length): Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων καμπής

στη ράβδο, μετά το λυγισμό.

Μήκος πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} (plastic hinge length): Μήκος στο πλαστικοποιημένο άκρο του μέλους και του μήκους διάτμησης, μέσα στο οποίο το πλαστικό τμήμα της καμπυλότητας, $\varphi - \varphi_y$, λαμβάνεται σταθερό και ίσο με αυτό στην ακραία διατομή του μέλους.

Μήκυνση θραύσης χάλυβα, ε_{su} (ultimate elongation): Η (ανηγμένη) μήκυνση στην κορυφή του διαγράμματος $\sigma - \varepsilon$ του χάλυβα (στην εφελκυστική αντοχή). Είναι η μήκυνση πριν την αρχή της ανάπτυξης στένωσης (λαιμού) στη ράβδο και γι' αυτό έχει την ίδια τιμή ανεξάρτητα της θέσης της ράβδου όπου τη μετράμε (“ομοιόμορφη” μήκυνση).

Μηχανισμός δικτύματος (truss mechanism): Εξιδανίκευση της διατμητικής λειτουργίας ενός γραμμικού ή επίπεδου στοιχείου σκυροδέματος, ως ισόρροπο σύστημα εφελκυστικών τάσεων σε ορθογωνικό πλέγμα οπλισμών και θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα υπό γωνία θ ως προς τη μία διεύθυνση των οπλισμών.

Μονοτονική φόρτιση (monotonic loading): Εκείνη η φόρτιση κατά την οποία η παραμόρφωση αυξάνεται συνεχώς, συνήθως από το μηδέν μέχρι πιθανόν και την αστοχία.

Ολίσθηση ράβδου (slip, slippage): Η μακροσκοπική μετακίνηση της ράβδου ως προς το περιβάλλον σκυρόδεμα, που συνοδεύει τη (και προκαλείται από) μεταφορά δυνάμεων από το χάλυβα στο σκυρόδεμα με συνάφεια.

Περισφιγμένος πυρήνας (διατομής) (confined core): Το τμήμα της διατομής στο εσωτερικό του κλωβού που σχηματίζουν οι κλειστοί συνδετήρες με τις διαμήκεις ράβδους και το οποίο απολαμβάνει την ευεργετική επίδραση της περίσφιγξης από τον ανωτέρω κλωβό.

Περίσφιγξη (confinement): Η ανάπτυξη εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα από τον κλωβό εγκαρσίων οπλισμών-διαμήκων ράβδων, λόγω αντίστασης του κλωβού αυτού στην πλευρική διόγκωση που προκαλούν στο σκυρόδεμα οι διαμήκεις θλιπτικές τάσεις.

Πλάστιμη διατμητική αστοχία (ductile shear failure): Αστοχία που κυριαρχείται από τη διάτμηση – δηλαδή χαρακτηρίζεται από έντονη λοξή ρηγμάτωση που διευρύνεται προς την αστοχία – αλλά συμβαίνει μετά από καμπτική διαρροή της ακραίας διατομής του μέλους και χαρακτηρίζεται από παραμόρφωση αστοχίας μικρότερη απ' αυτήν στην οποία συμβαίνει η καθαρά καμπτική αστοχία.

Συμβολή σκυροδέματος στην αντοχή σε τέμνουσα, V_c (concrete contribution to shear strength): Το τμήμα της διατμητικής αντοχής που αποδίδεται σε άλλους μηχανισμούς μεταφοράς δυνάμεων, πέραν αυτού του ιδεατού δικτύματος με γωνία κλίσης θ των θλιβόμενων διαγωνίων ως προς τον άξονα. Οφείλεται στο συνδυασμό αλληλοεμπλοκής

αδρανών, δράσης βλήτρου, εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών και διατμητικών τάσεων στη θλιβόμενη ζώνη.

Ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate): Η ταχύτητα μεταβολής της ανηγμένης μήκυνσης ή βράχυνσης ενός υλικού με το χρόνο.