

Υπολογισμός μελών σε κάμψη / διάτμηση από σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής

A. Κανελλόπουλος
Dr.sc.techn. ETH Zuerich, CUBUS HELLAS Ltd

Π. Δημητρακόπουλος
Μηχανικός Πληροφορικής ΤΕ, CUBUS HELLAS Ltd

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία παρουσιάζονται οι βασικές διαφοροποιήσεις κατά τον υπολογισμό σε κάμψη/διάτμηση Σ.Υ.Ε έναντι των συμβατικών σκυροδεμάτων.

Τα σκυροδέματα υπερυψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται την τελευταία δεκαετία σε πολλές χώρες του εξωτερικού με επιτυχία. Στην Ελλάδα, τα πρώτα βήματα για την παραγωγή σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας έχουν ήδη γίνει από την εταιρεία ΑΓΕΤ-Ηρακλής, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που συγχρηματοδοτείται από τη Γ.Γ.Ε.Τ, την ΑΓΕΤ-Ηρακλής και την CUBUS Hellas και υλοποιείται σε συνεργασία με το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το υλικό που αναπτύσσεται στα πλαίσια του προαναφερθέντος προγράμματος είναι ινοπλισμένο κονίαμα θλιπτικής αντοχής της τάξης των 110Μpa και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό.

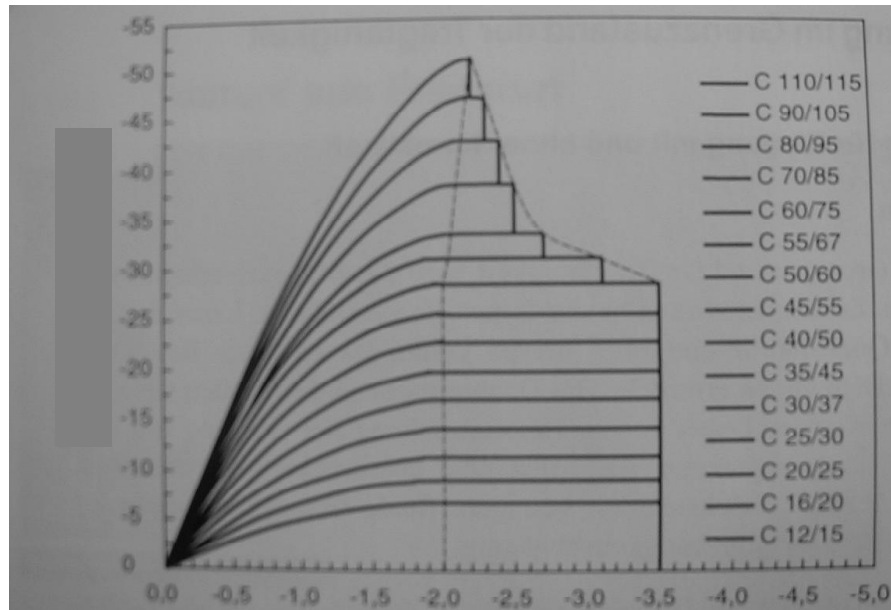
Στους νέους Γερμανικούς κανονισμούς DIN 1045-1, οι οποίοι ήδη ισχύουν και στη χώρα μας, καλύπτονται οι κατηγορίες σκυροδεμάτων αντοχής C55/67 έως C110/115. Κατά την εφαρμογή τους προστίθενται σε πολλές περιπτώσεις ίνες χάλυβα ή συνθετικών υλικών προς βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Οι διαφορές που παρουσιάζουν ως προς τα σκυροδέματα συμβατικών αντοχών, αφορούν κυρίως στο ύψος της θλιπτικής και εφελκυστικής τους αντοχής, στη μειωμένη πλαστιμότητα σε θλίψη, στην αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε εφελκυσμό λόγω των ινών, και την αυξημένη αντοχή υπό συγκεντρωμένα φορτία (βλήτρα, αγκυρώσεις, φορτία προέντασης κ.α).

Τα μηχανικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό σε κάμψη, με ή χωρίς αξονικό φορτίο, σε διάτμηση / στρέψη, σε διάτρηση, σε συνάφεια του οπλισμού, σε περίσφιγξη και σε ρηγμάτωση, δε διαφέρουν ποιοτικά από αυτά που χρησιμοποιούμε για το κοινό σκυρόδεμα. Διαφέρουν όμως ως προς τις ποσοτικές παραμέτρους και οδηγούν σε πολύ διαφορετικά και άκρως ενδιαφέροντα για την πράξη αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στα παραπάνω μηχανικά προσομοιώματα και μεθόδους υπολογισμού, θα αναλυθούν οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των σκυροδεμάτων υπερυψηλής αντοχής και θα εξαχθούν μερικοί αναλυτικοί τύποι για την εφαρμογή τους σε μελέτες της καθημερινής πράξης.

1.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Η οριακή βράχυνση του C100/115 περιορίζεται σε περίπτωση κάμψης με αξονική ή και ομοιόμορφη θλίψη στην τιμή $\epsilon_{cu} = \epsilon_{cs} = -2.2\%$. Ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού λαμβάνεται αυξημένος ως γινόμενο $\gamma_c \cdot \gamma'_c = 1.67$ ενώ του χάλυβα παραμένει στη γνωστή τιμή $\gamma_s = 1.15$. Ο νόμος του υλικού εμφανίζει μειωμένη πλαστιμότητα, σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα :



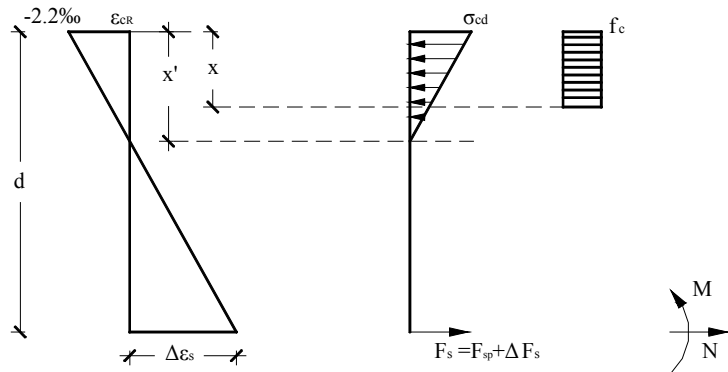
Σχήμα 1 : Τάση σκυροδέματος scd [N/mm²] συναρτήσει της βράχυνσης σκυροδέματος ϵ_c [%]

Χαρακτηριστική είναι η ψαθυρή αστοχία υπό θλίψη του C100/115. Μετά την υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής και υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζεται επιβαλλόμενη (ελεγχόμενη) παραμόρφωση, εμφανίζεται απότομα φθίνων κλάδος, δείγμα υψηλής ψαθυρότητας. Τα συμβατικά σκυροδέματα C12/15 έως C50/60 διαστασιολογούνται με τον ίδιο νόμο υλικού, παραβολή – ευθεία με κοινά όρια βράχυνσης -2‰ και -3.5‰, ανεξάρτητα ύψους αντοχής. Στα Σ.Υ.Ε C55/67 έως C110/115 αλλάζει ο νόμος υλικού ανάλογα με την αντοχή και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον τα υπάρχοντα νομογραφήματα και οι πίνακες, διότι δεν αρκεί η αναγωγή στην αντοχή σχεδιασμού f_{cd} . Για κάθε κατηγορία αντοχής απαιτούνται νέοι πίνακες και νομογραφήματα (π.χ. διαγράμματα αλληλεπίδρασης).

Σε ορθογωνικές διατομές η αύξηση της αντοχής σε απλή κάμψη (χωρίς αξονική) δεν είναι ανάλογη της κατηγορίας αντοχής του υλικού, διότι μειώνεται και ο βαθμός πληρότητας του στερεού των θλιπτικών τάσεων (νόμος υλικού) και αυξάνεται ο συντελεστής ασφάλειας του υλικού από 1.50 σε 1.67. Σε διατομές με πέλματα και κορμούς (T, I, κιβώτια) η εφαρμογή των Σ.Υ.Ε είναι πιο αποτελεσματική στην αύξηση της αντοχής. Η υψηλή τάση στη θλιβόμενη ζώνη είναι περίπου σταθερή και αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων.

Σε περίπτωση αξονικής δύναμης, έκκεντρης, δεν υπάρχει μεγάλη δυνατότητα ανακατανομής της θλίψης προς λιγότερο καταπονούμενες περιοχές, λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του υλικού. Η χρήση ινών και η περίσφιγξη βελτιώνουν τη συμπεριφορά. Σε περίπτωση προέντασης επίσης εμφανίζεται αύξηση της αντοχής σε κάμψη, λόγω της προμήκυνσης του χάλυβα, που οδηγεί σε ανάληψη ροπής χωρίς, να απαιτείται σοβαρή καμπύλωση της θλιβόμενης ζώνης.

Για υπολογισμούς με το χέρι μπορούν να γίνουν κάποιες απλοποιητικές παραδοχές :



Σχήμα 2: Τάσεις και παραμορφώσεις διατομής

$$x = \frac{2}{3} \cdot x' \quad (1)$$

$$x' < d \Rightarrow 3x/2 < d \Rightarrow x/d < 2/3 \quad (2)$$

Μετατροπή σε ορθογωνική κατανομή :

$$\sigma_{cd} \cdot x' \cdot \frac{1}{2} = f_c \cdot x = f_c \cdot \frac{2}{3} \cdot x' \Rightarrow$$

$$f_c = \sigma_{cd} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} = \sigma_{cd} \cdot \frac{3}{4} \quad (3)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma_c} \cdot 0.85 = \frac{100}{1.67} \cdot 0.85 = 51 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4)$$

$$f_c = 51 \cdot \frac{3}{4} = 38.25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (5)$$

Επιπεδότητα διατομών :

$$\frac{\Delta \varepsilon_s}{d - x'} = \frac{2.2}{x'} \Rightarrow$$

$$\Delta \varepsilon_s = 2.2 \cdot \frac{d - x'}{x'} \% = 1.47 \cdot \frac{d}{x} - 2.2 \% \quad (6)$$

Το σημείο που αρχίζει να είναι κρίσιμο το σκυρόδεμα υπολογίζεται ως εξής :

$$\Delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_{sy} = \frac{2.5}{\gamma_s} \% \quad (\text{S500}) \quad (7)$$

$$(6), (7) \Rightarrow 2.17 = 1.47 \frac{d}{x} - 2.2 \Rightarrow x/d = 0.34$$

Ο λόγος

$$\frac{\Delta \varepsilon_s}{\Delta \varepsilon_{sy}} = \kappa \leq 1 \quad (8)$$

ονομάζεται συντελεστής εκμετάλλευσης του οπλισμού.

$\kappa < 1$: υπεροπλισμένα στοιχεία \rightarrow κρίσιμη η θράυση του σκυροδέματος.

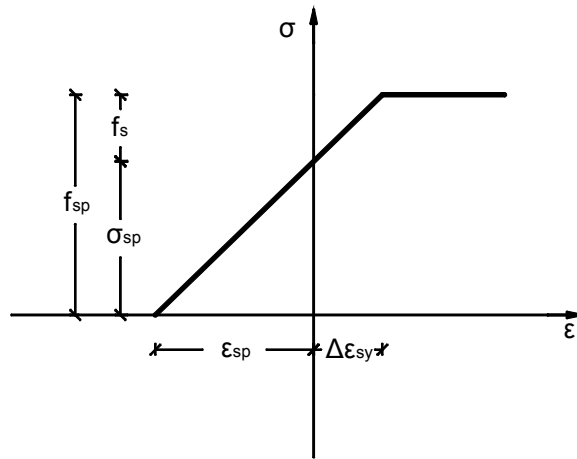
$\kappa = 1$: υποοπλισμένα στοιχεία \rightarrow κρίσιμη η διαρροή του χάλυβα.

Δύο πρόσθετα αδιάστατα μεγέθη που εισάγονται για απλοποίηση είναι τα εξής:
Μηχανικό ποσοστό οπλισμού:

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_s}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (9)$$

Βαθμός προέντασης:

$$\lambda = \frac{F_{sp}}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{\sigma_{sp} \cdot A_{sp}}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (10)$$



Σχήμα 3: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων προεντεταμένου οπλισμού

Μέσω διατύπωσης των σχέσεων ισορροπίας έχουμε:

(ροπών)
$$M = x \cdot b \cdot f_c \cdot \left(d - \frac{x}{2} \right) \quad (11)$$

ή αδιάστατα
$$\frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_c} = m = \frac{x}{d} \cdot \left(1 - \frac{x}{2d} \right) \quad (12)$$

(αξονικών)
$$N = F_{sp} + \Delta F_s - x \cdot b \cdot f_c \quad (13)$$

ή αδιάστατα
$$\frac{N}{b \cdot d \cdot f_c} = n = \frac{F_{sp}}{b \cdot d \cdot f_c} + \frac{\Delta F_s}{b \cdot d \cdot f_c} - \frac{x \cdot b \cdot f_c}{b \cdot d \cdot f_c} \Rightarrow$$

$$n = \lambda + \kappa \omega - \frac{x}{d} \Rightarrow \frac{x}{d} = \lambda + \kappa \omega - n \quad (14)$$

Έλεγχος τύπου αστοχίας:

Δίδεται n , λ , ω , υποθέτουμε $\kappa=1$ και υπολογίζουμε το λόγο $\frac{x}{d}$:

$$\frac{x}{d} = \lambda + \omega - n$$

Ελέγχουμε αν $\kappa \geq 1$

Εάν $\kappa < 1$ δεν ισχύει η αρχική υπόθεση και δεν ισχύει ο υπολογισμός του λόγου x/d (υπεροπλισμένη διατομή). Εάν $\kappa \geq 1$ η αρχική υπόθεση είναι ορθή και ισχύει ο υπολογισμός του λόγου x/d (υποοπλισμένη διατομή).

Στη περίπτωση υπεροπλισμένων διατομών, όπου ισχύει $\kappa < 1$, ο υπολογισμός του x/d μπορεί να γίνει ως εξής:

$$n - \lambda = \omega \cdot \kappa - \frac{x}{d} = \omega \cdot \left[\left(\frac{1.47 \cdot d}{x} \right) - 2.2 \right] \cdot \frac{1}{\varepsilon_{sy}(\%)} - \frac{x}{d}$$

και θέτοντας $\omega^* = \frac{\omega}{\varepsilon_{sy}(\% \omega)}$ έχουμε από τη λύση της εξίσωσης δευτέρου βαθμού:

$$\frac{x}{d} = \left[\frac{(n - \lambda + 2.2\omega^*)^2}{4} + 1.5 \cdot \omega^* \right]^{1/2} - \frac{n - \lambda + 2.2\omega^*}{2} \quad (15)$$

Η ροπή m που αναλαμβάνεται δίδεται και στις δύο περιπτώσεις από τον τύπο 16:

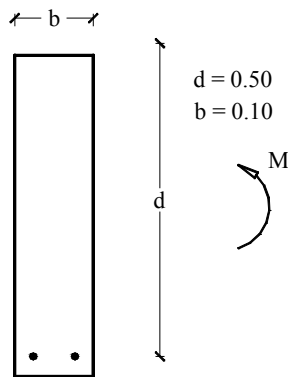
$$m = \frac{x}{d} \cdot \left(1 - \frac{x}{2 \cdot d} \right) \quad (16)$$

Μέσω παρατήρησης του τύπου $n = \lambda + \kappa \cdot \omega - x/d$ διαπιστώνουμε ότι σε περίπτωση προεντεταμένου οπλισμού για $\kappa = 1$ το άθροισμα $\lambda + \omega$ ισούται με :

$$\lambda + \omega = \frac{F_{sp}}{b \cdot d \cdot f_c} + \frac{A_s \cdot f_s}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{(\sigma_{sp} + f_s) \cdot A_s}{b \cdot d \cdot f_c} = \frac{A_s \cdot f_{sp}}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (17)$$

Επομένως δεν επηρεάζει η προένταση τη ροπή διαρροής, όπως ισχύει και στη θεωρία πλαστικότητας για τις αυτεντατικές καταστάσεις. Εφόσον το $\kappa < 1$ (υπεροπλισμένα στοιχεία), παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο είναι μεγαλύτερο όταν ο οπλισμός είναι προεντεταμένος παρά όταν είναι χαλαρός. Η αύξηση αυτή είναι για συνήθης βαθμούς προέντασης $\lambda = 0.10$ έως 0.40 μικρότερη από 10% και δεν έχει πρακτική σημασία.

▪ Παράδειγμα από την πράξη



Ζητείται η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναλάβει η δοκός και ο αντίστοιχος οπλισμός, ώστε να είναι κρίσιμη η διαρροή του χάλυβα και όχι η αστοχία του μπετόν.

C100/115

$$\kappa=1 \Rightarrow x/d=0.34$$

$$m = \frac{x}{d} \cdot \left(1 - \frac{x}{2d} \right) = 0.28$$

$$M = m \cdot b \cdot d^2 \cdot f_c = 0.28 \cdot 0.10 \cdot 0.50^2 \cdot 38250 = 268 \text{ kNm}$$

Ο οπλισμός που απαιτείται δίνεται ως εξής :

$$\omega = \frac{x}{d} \Rightarrow \frac{A_s \cdot f_s}{b \cdot d \cdot f_c} = 0.34 \Rightarrow A_s = 0.34 \cdot \frac{38.25}{435} \cdot 10 \cdot 50 = 15 \text{ cm}^2$$

Αν ήταν σκυρόδεμα C20/25 θα ίσχυε με την ίδια ποσότητα οπλισμού μέσω χρήσης του προγράμματος FAGUS-5 της cubus : $M = 118.58 \text{ kNm}$

Παρατηρούμε ότι η διατομή με C100/115 αναλαμβάνει 2.26 φορές μεγαλύτερη ροπή και είναι κρίσιμος ο οπλισμός ενώ στη διατομή με C20/25 είναι κρίσιμο το σκυρόδεμα.

Προς έλεγχο της ακρίβειας της προσεγγιστικής μεθόδου υπολογίσθηκε το ίδιο παράδειγμα με C100/115 με το FAGUS-5 και βρέθηκε ροπή $M = 278.6 \text{ kNm}$ δηλαδή 4% μεγαλύτερη, λόγω μορφής διαγράμματος τάσεων / παραμορφώσεων του σκυροδέματος (τριγωνική κατανομή έναντι καμπύλης με λίγο μεγαλύτερο συντελεστή πληρότητας).

Σε περίπτωση ύπαρξης θλιπτικής αξονικής δύναμης με εκκεντρότητα $M/N = 1m$ η αντοχή της διατομής από C100/115 προκύπτει $M = 288.00 \text{ kNm}$, $N = -288.0 \text{ kN}$ ενώ από C20/25 προκύπτει $M = 100.00 \text{ kNm}$, $N = -100.8 \text{ kN}$ δηλαδή 2.88 φορές μεγαλύτερη.

2. Διάτμηση, θλιπτοδιάτμηση

Οι διαφορές αντοχής σε περίπτωση χρήσης C100/115 έναντι συμβατικού σκυροδέματος, εμφανίζονται στις περιπτώσεις που ενεργοποιείται η εφελκυστική (διατμητική) αντοχή του μπετόν, δηλαδή σε στοιχεία χωρίς οπλισμό συνδετήρων αφενός (π.χ. σε πλάκες διάτμηση/διάτρηση) και αφετέρου εκεί όπου υπάρχει έντονη θλίψη, (σε στύλους ή σε περιοχές έμμεσης στήριξης ή σε λεπτούς κορμούς). Συγκεκριμένα στο DIN 1045-1 η αντοχή σε διάτμηση χωρίς συνδετήρες δίδεται από τον τύπο :

$$\frac{V_{Rd,ct}}{b_w \cdot d} = 0.10 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}$$

όπου : $f_{ck} \leq 100 \text{ N/mm}^2$
 $\rho_l = A_s / (b_w \cdot d) \leq 0.02$ γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού
 $\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ [mm] συντελεστής μεγέθους

Σε περίπτωση ταυτόχρονης θλίψης ή δύναμης προέντασης ο τύπος γίνεται :

$$\frac{V_{Rd,ct}}{b_w \cdot d} = 0.10 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0.12 \cdot \sigma_{cd}$$

όπου : $\sigma_{cd} = N_{sd} / A_c$ [N/mm²]
 N_{sd} : αξονική δύναμη ($N_{sd} < 0$ για θλίψη και δυνάμεις προέντασης)

Σε περίπτωση διάτρησης πλακών, χωρίς οπλισμό συνδετήρων ο τύπος γίνεται :

$$\frac{V_{Rd,ct}}{u \cdot d} = \frac{V_{Rd,ct}}{d} = 0.14 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0.12 \cdot \sigma_{cd}$$

Η θλιπτική τάση των διαγωνίων θλιπτήρων εξαρτάται από τη γωνία θ του θλιπτικού πεδίου. Δίνεται από τον τύπο (οπλισμός εγκάρσιων συνδετήρων) :

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot \tau}{2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} = \frac{2 \cdot \tau}{\sin 2\theta} \leq \alpha_c \cdot f_{cd}$$

όπου : $\alpha_c = 0.75$
 $\tau \leq (\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \sin 2\theta) / 2$
για $\theta = 27^\circ$ $\tau \leq (0.75 \cdot 0.81 \cdot f_{cd}) / 2 = 0.30 f_{cd}$
για $\theta = 45^\circ$ $\tau \leq (0.75 \cdot 1.00 \cdot f_{cd}) / 2 = 0.375 f_{cd}$

2.1 Σύγκριση C20 και C100 σε πλάκες

Έστω πάχος πλάκας 200 mm και γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho_l = 1\%$.

Στην περίπτωση του C20 έχουμε :

$$V_{Rd,ct} / (b_w \cdot d) = 0.10 \cdot 2 \cdot 20^{1/3} = 0.54 \text{ N/mm}^2$$

Και σε περίπτωση διάτρησης :

$$v_{Rd,ct} / d = 0.14 \cdot 2 \cdot 20^{1/3} = 0.76 \text{ N/mm}^2$$

Στην περίπτωση του C100 έχουμε :

$$V_{Rd,ct} / (b_w \cdot d) = 0.10 \cdot 2 \cdot 100^{1/3} = 0.93 \text{ N/mm}^2$$

Και σε περίπτωση διάτρησης :

$$v_{Rd,ct} / d = 0.14 \cdot 2 \cdot 100^{1/3} = 1.30 \text{ N/mm}^2$$

Παρατηρείται ότι η διατμητική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται κατά 1.71 φορές. Μια εφαρμογή αυτού, είναι η σκυροδέτηση τοπικά σε πλάκες στην περιοχή του στύλου, υλικού κατηγορίας C100. Με

αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση συνδετήρων διάτρησης ή άλλων ειδικών συστημάτων, χωρίς σημαντική οικονομική επιβάρυνση.

2.2 Σύγκριση C20 και C100 σε τοιχώματα

Έστω κορμός τοιχώματος από C20

$$\text{για } \theta=45^\circ \quad \tau \leq 0.375 f_{cd} = (0.375 \cdot 20 \cdot 0.85) / 1.5 = 4.25 \text{ N/mm}^2$$

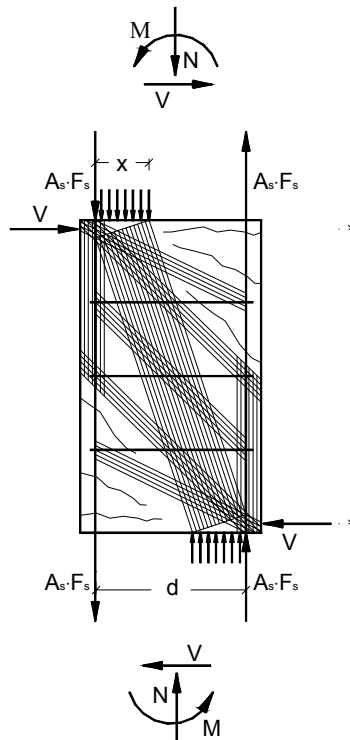
Εάν το τοίχωμα είναι από C100 έχουμε :

$$\tau \leq (0.375 \cdot 100 \cdot 0.85) / 1.67 = 19.00 \text{ N/mm}^2$$

δηλαδή 4.5 φορές υψηλότερη διατμητική τάση σχεδιασμού.

2.3 Ενίσχυση κοντών υποστλωμάτων σε θλιπτοδιάτμηση

Σε περίπτωση καμπτοδιάτμησης με ταυτόχρονη θλιπτική καταπόνηση, ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων έχει κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις. Το μέγεθος της αξονικής θλίψης, ιδίως σε υποστλώματα, μπορεί να είναι τόσο μεγάλο, ώστε να επηρεάζει αισθητά το ύψος της θλιβόμενης ζώνης και του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων.



Σχήμα 4: Αμφιάκτο θλιβόμενο στοιχείο με οπλισμό συνδετήρων

Από ισοροπία ροπών και δυνάμεων έχουμε:

$$M = (x \cdot b \cdot f_c) \cdot \left(\frac{d}{2} - \frac{x}{2} \right) + A_s \cdot f_s \cdot d \quad (1)$$

$$N = x \cdot b \cdot f_c \Rightarrow \frac{N}{b \cdot d \cdot f_c} = n = \frac{x}{d} \quad (2)$$

$$(1) \Rightarrow \frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_c} = \frac{x \cdot b \cdot f_c}{b \cdot d \cdot f_c} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{d} \right) + \frac{A_s \cdot f_s \cdot d}{b \cdot d^2 \cdot f_c} = 0.5 \cdot n \cdot (1 - n) + \omega_1$$

$$\Rightarrow m = 0.5 \cdot n \cdot (1 - n) + \omega_1 \quad (3)$$

$$2M = V \cdot l \Rightarrow 2 \frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_c} = \frac{V}{b \cdot d \cdot f_c} \cdot \frac{l}{d} \Rightarrow 2m = v \cdot \frac{d}{l} \Rightarrow v = m \cdot \frac{2d}{l} \quad (4)$$

$$(3),(4) \Rightarrow v_{pl} = n \cdot (1 - n) \cdot \frac{d}{l} + 2\omega_1 \cdot \frac{d}{l}$$

Παρατηρούμε ότι το πρώτο τμήμα της τέμνουσας που οφείλεται στην αξονική δύναμη δεν χρειάζεται συνδετήρες, ενώ το δεύτερο απαιτεί, όπως και στην καμπτοδιάτμηση, ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού $\omega_B = 2\omega_1 \cdot d/l$, που με αλλαγή της κλίσης των θλιπτήρων από 45° σε 27° φθάνει περίπου στο μισό.

Η τέμνουσα αστοχίας δίδεται από τον τύπο: $v_R = n \cdot (1 - n) \cdot \frac{d}{l} + \omega_B \cdot \cot \theta$

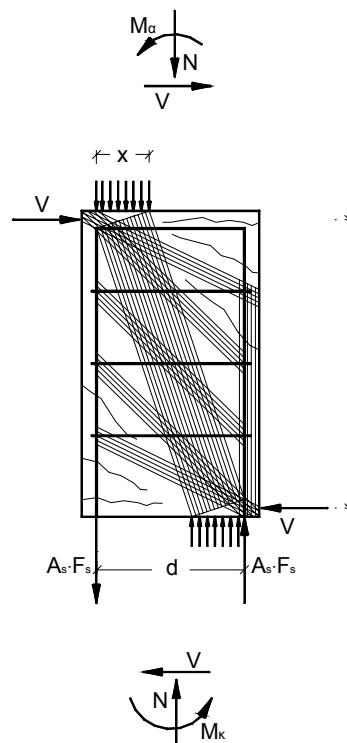
Επομένως όταν έχουμε να ελέγξουμε υφιστάμενες κολώνες ή δοκούς σύζευξης, η ποσότητα συνδετήρων που απαιτείται θα είναι $\omega_B = 2\omega_1 \cdot d/l$, ενώ θα αντέχει έστω και αν υπάρχουν οι μισοί συνδετήρες, αρκεί να απέχουν μικρές σχετικά αποστάσεις (π.χ. $< d/2$) και να είναι καλά αγκυρωμένοι.

Παράδειγμα: $\omega_1 = 0.10$ και $\frac{d}{l} = \frac{1}{5}$

τότε $\omega_B = 2 \cdot 0.10 \cdot \frac{1}{5} = 0.04$

Λόγω της διατμητικής του αντοχής, το μπετόν μπορεί να μεταφέρει τέμνουσα περίπου $v_R = 0.05$ (C20/25), όμως δεν μπορούμε να την εμπιστευτούμε σε περίπτωση σεισμού, δεδομένου ότι μειώνεται δραστικά στην ανελαστική περιοχή (πλαστικές αρθρώσεις).

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει συνέχεια του διαμήκου οπλισμού στην κεφαλή του στοιχείου έχουμε:



Σχ. 5: Μονόπακτο θλιβόμενο στοιχείο με οπλισμό συνδετήρων

$$v_{pl} = n \cdot (1 - n) \cdot \frac{d}{l} + \omega_1 \cdot \frac{d}{l}$$

Η τέμνουσα αστοχίας δίδεται από τον τύπο:

$$v_R = n \cdot (1 - n) \cdot \frac{d}{l} + \omega_B \cdot \cot \theta$$

Στην περίπτωση στοιχείων με οπλισμό διάτμησης και αξονική δύναμη ο κανονισμός ΕΚΩΣ 2000 δίδει για την τέμνουσα τον τύπο:

$$V_{Rd3} = V_{wd} + V_{cd} = \frac{A_{sB}}{s} \cdot 0.90 \cdot d \cdot f_{ywd} + 0.90 \cdot V_{Rd1}$$

$$\Rightarrow V_{Rd3} = 0.90 \cdot \omega_{sw} + 0.90 \cdot v_{Rd1}$$

$$\Rightarrow V_{Rd3} = 0.90 \cdot \omega_{sw} + 0.90 \cdot \left(\frac{\tau_{Rd}}{f_c} \cdot (1.20 + 40 \cdot \rho_1) + 0.15 \cdot n \right)$$

Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η θλιπτική καταπόνηση σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις θα πρέπει να είναι περιορισμένη ($n < 0.33$), διότι αλλιώς υπάρχει θέμα αστοχίας σε θλίψη του στύλου, λόγω μεγάλου εύρους του θλιπτήρα, κατά ψαθυρό τρόπο (θλιπτοδιάτμηση).

Η φέρουσα ικανότητα σε διάτμηση, σε περίπτωση αυξημένης θλίψης, εκφράζεται στον κανονισμό μέσω του ακόλουθου τύπου:

$$V_{Rd2,red} = 1.67 \cdot V_{Rd2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp,eff}}{f_{cd}} \right) < V_{Rd2}$$

$$\text{όπου } \sigma_{cp,eff} = (N_{sd} - f_{yk} \cdot A_{s2} / \gamma_s) / A_c$$

Το όριο της ανηγμένης θλίψης είναι: $\frac{\sigma_{cp,eff}}{f_{cd}} \approx 0.40$

Χωρίς συντελεστές ασφάλειας ο ίδιος τύπος μπορεί να διατυπωθεί:

$$V_{Rd2,red} = V_{Rd2} \cdot [1.7 - 3 \cdot (n - \omega_1)]$$

Για $n - \omega_1 = 0.57$ προκύπτει $V_{Rd2,red} = 0$. Για $n - \omega_1 \leq 0.23$ δεν προκύπτει μείωση της αντοχής σε διάτμηση λόγω θλίψης. Αν θεωρήσουμε μια πιθανή τιμή του $\omega_1 = 0.10$ τότε η ανηγμένη θλιπτική καταπόνηση μπορεί να φθάσει $n = 0.33$, χωρίς να μειωθεί η αντοχή του κορμού σε διάτμηση.

▪ Παράδειγμα ενίσχυσης κοντού υποστρώματος

Διατομή 30X30 cm, $l=90$ cm, C20/25

Διαμήκης οπλισμός 4Φ16, S500

Συνδετήρες Φ10/20, Φορτίο $N=-600$ kN

Θα ενισχυθεί με μανδύα πάχους 3 cm από C100 ινοπλισμένο.

Έλεγχος υπαρχοντος:

$$\omega_1 = 0.17$$

απ $\omega_B = (2 \cdot \omega_1 \cdot d) / l = 0.11$, οι συνδετήρες επαρκούν

$$n = N / (b \cdot d \cdot f_c) = 0.59$$

$$V_{Rd2,red} = V_{Rd2} \cdot [1.7 - 3(n - \omega_1)] = V_{Rd2} \cdot 0.44$$

Προκειμένου να μην αστοχήσει πρώιμα σε διάτμηση (ψαθυρή αστοχία) και να φθάσει την καμπτική αντοχή θα πρέπει:

$$v_{pl} = [n \cdot (1 - n) \cdot d] / l + 2\omega_1 = 0.193$$

Η ανηγμένη διάτμηση που μπορεί να αναλάβει, λαμβανομένης υπόψη της μείωσης λόγω υψηλής θλίψης είναι:

$$\theta = 27^\circ \quad v_{Rd2,red} = 0.44 \cdot \alpha_c \cdot \sin 2\theta / 2 = 0.133 < 0.193$$

Επομένως δεν επαρκεί σε θλιπτοδιάτμηση.

Έλεγχος ενισχυμένου :

Ο λόγος αύξησης της ικανότητας ανάληψης θλιπτοδιάτμησης από τον κορμό του ενισχυμένου σε σχέση με το υπάρχον, υπολογίζεται ως εξής :

$$[(6 \cdot 51) + (30 \cdot 11.3)] / (30 \cdot 11.3) = 1.90$$

$$\theta = 27^\circ \quad v_{Rd2,red} = 0.133 \cdot 1.90 = 0.253 > 0.193$$

Πληρούται ο έλεγχος και επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος πρόωμης αστοχίας από θλιπτοδιάτμηση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Kanellopoulos A. (1986) : “Zum unelastischen Verhalten und Bruch von Stahlbeton” , IBK-ETHZ, Birkhaeuser Verlag, Basel-Boston-Stuttgart, Zuerich.

Κανελλόπουλος Α. , Μυστακίδης Ε. (2005) : “Εφαρμογές σκυροδεμάτων υπερυψηλής αντοχής σε νέες κατασκευές ή στην ενίσχυση υφιστάμενων” , 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος.

cubus Hellas Ltd (2005) : FAGUS-5 “Πρόγραμμα Ελέγχου και Διαστασιολόγησης Διατομών από Οπλισμένο και Προεντεταμένο Σκυρόδεμα”.

ΕΚΩΣ 2000 : “Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος”.

DIN 1045 –1 : (2001-07) : Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1 : Bemessung und Konstruktion. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. , Berlin.

König G , Viet Tue N. , Zink M. (2001) : “Hochleistungsbeton” , Ernst & Sohn