

Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα

Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για κτίρια

Κεφάλαιο 6

Διαφάνειες παρουσίασης εκπαιδευτικών σεμιναρίων

Γεώργιος Πενέλης, ομότιμος καθηγητής Α.Π.Θ.
Ανδρέας Κάππος, καθηγητής Α.Π.Θ.
Χρήστος Ιγνατάκης, καθηγητής Α.Π.Θ.
Αναστάσιος Σέξτος, επίκουρος καθηγητής Α.Π.Θ.



27/11/2009

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

1

Ευρωκώδικας 2 - Μέρος 1-1

Ευρωκώδικας 2 – 1-1	→	Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή
	→	Κεφάλαιο 2: Βάσεις του σχεδιασμού
	→	Κεφάλαιο 3: Υλικά
	→	Κεφάλαιο 4: Ανθεκτικότητα σε διάρκεια και επικάλυψη οπλισμών
	→	Κεφάλαιο 5: Ανάλυση του δομικού συστήματος
	→	Κεφάλαιο 6: Οριακές καταστάσεις αστοχίας
	→	Κεφάλαιο 7: Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας
	→	Κεφάλαιο 8: Κατασκευαστική διαμόρφωση των χαλαρών οπλισμών και των τενόντων προέντασης – Γενικά
	→	Κεφάλαιο 9: Κατασκευαστική διαμόρφωση δομικών στοιχείων και ειδικοί κανόνες
	→	Κεφάλαιο 10: Συμπληρωματικοί κανόνες για προκατασκευασμένα στοιχεία και κατασκευές από σκυρόδεμα
	→	Κεφάλαιο 11: Κατασκευές από ελαφροσκυρόδεμα
	→	Κεφάλαιο 12: Άοπλες και ελαφρώς οπλισμένες κατασκευές

2

Περιεχόμενα

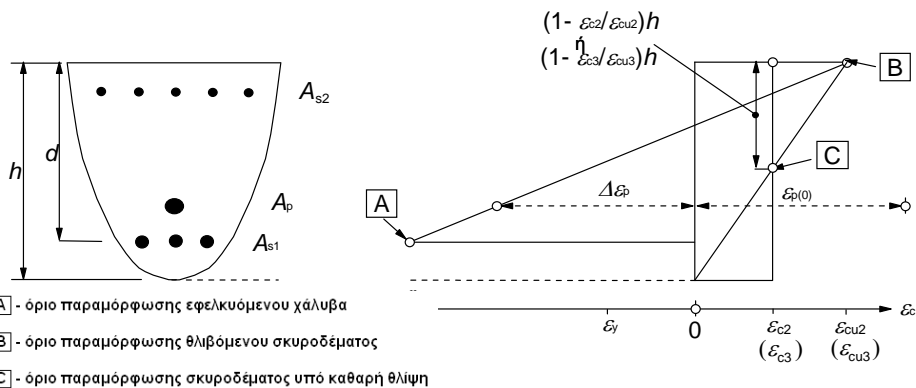
- 6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη
- 6.2 Διάτμηση
- 6.3 Στρέψη
- 6.4 Διάτρηση
- 6.5 Σχεδιασμός βάσει μοντέλων θλιπτήρων – ελκυστήρων
- 6.6 Αγκυρώσεις και ενώσεις οπλισμών
- 6.7 Περιοχές που φορτίζονται μερικώς
- 6.8 Κόπωση

6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

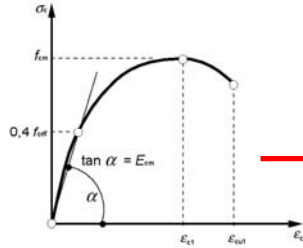
Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Βασικές παραδοχές

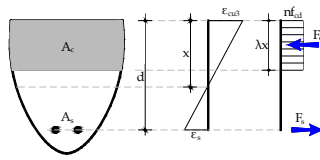
1. Επιπεδότητα διατομών (Bernoulli) [αν όχι, βλ. §6.5]
2. Παραμόρφωση οπλισμών (με συνάφεια) ίδια με εκείνη του περιβάλλοντος σκυροδέματος
3. Αγνόηση εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος



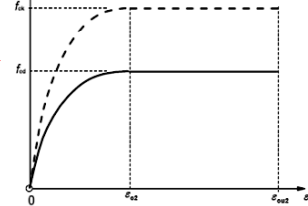
Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα



επιτρέπεται και ορθογωνική κατανομή:



Παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα



$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ for } 0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$n = 1,4 + 23,4 \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

όταν $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ αλλιώς 2,0

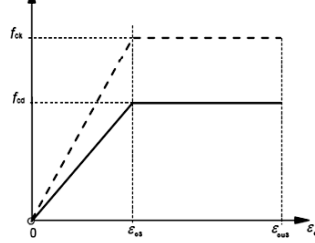
$$\varepsilon_{c2} \left(\frac{0}{100} \right) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$$

όταν $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ αλλιώς 2,0

$$\varepsilon_{cu2} \left(\frac{0}{100} \right) = 2,6 + 35 \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

όταν $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ αλλιώς 3,5

Διγραμμικό διάγραμμα



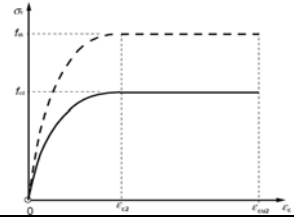
$$\varepsilon_{c3} \left(\frac{0}{100} \right) = 1,75 + 0,55 \left[\frac{(f_{ck} - 50)}{40} \right]$$

όταν $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ αλλιώς 1,75

$$\varepsilon_{cu3} \left(\frac{0}{100} \right) = 2,6 + 35 \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

όταν $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ αλλιώς 3,5

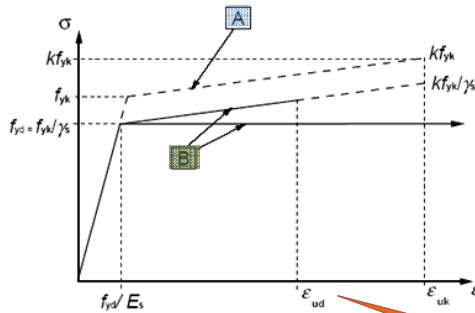
Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος



f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και διάγραμμα σχεδιασμού χάλυβα οπλισμού (για εφελκυσμό και θλίψη)



Μέγεθος	Κλάση	Χάλυβα με αξονική δύναμη	Χάλυβα χωρίς αξονική δύναμη	Χάλυβα με αξονική δύναμη
Επιτόπια	A, B, C	400 και 500	400 και 500	400 και 500
Παραμορφωτική δύναμη		1.05	1.05	1.05
Ελάχιστη τυπική f_{yk} (N/mm ²)		460	460	460
Μέγιστη τυπική f_{yk} (N/mm ²)		510	510	510
Ελάχιστη τυπική ϵ_{yk} (%)		17.5	17.5	17.5
Μέγιστη τυπική ϵ_{yk} (%)		21.5	21.5	21.5
Ελάχιστη τυπική ϵ_{uk} (%)		7.5	7.5	7.5
Μέγιστη τυπική ϵ_{uk} (%)		10.5	10.5	10.5
Ελάχιστη τυπική ϵ_{ud} (%)		6.75	6.75	6.75
Μέγιστη τυπική ϵ_{ud} (%)		9.45	9.45	9.45
Ελάχιστη τυπική k		1.15	1.15	1.15
Μέγιστη τυπική k		1.35	1.35	1.35
Ελάχιστη τυπική γ_s		1.15	1.15	1.15
Μέγιστη τυπική γ_s		1.35	1.35	1.35

$k = (f_t/f_y)_k$ Κλίση k από Παράρτημα C

A Εξιδανικευμένο

B Σχεδιασμού

Κλάση	C
k	≥ 1.15 < 1.35
ϵ_{uk}	$\geq 7.5\%$

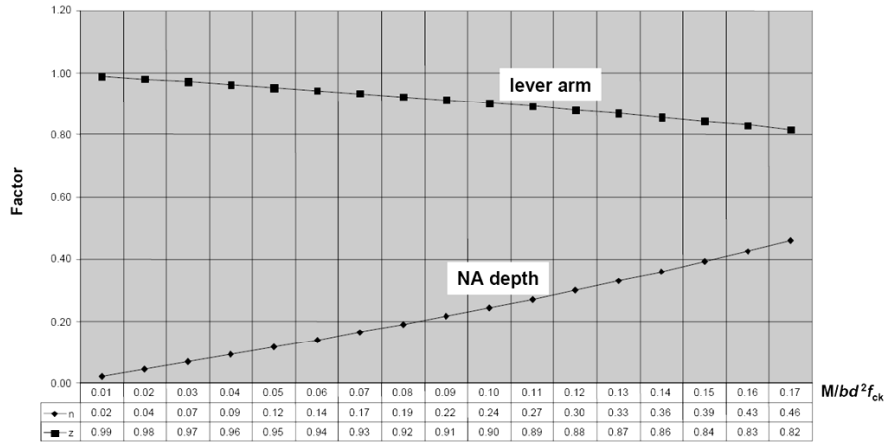
Όριο παραμόρφωσης $\epsilon_{ud} = 0.9 \epsilon_{uk}$

6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Λοιπές διατάξεις:

1. Σε συμμετρικά οπλισμένες διατομές (ύψους h) υπό θλιπτική N: → να λαμβάνεται ελάχιστη εκκεντρότητα, $e_0 = h/30 \geq 20 \text{ mm}$
2. Σε τμήματα διατομών υπό σχεδόν κεντρική σύνθλιψη ($e/h < 0.1$), όπως τα θλιβόμενα πέλματα κιβωτιοειδών διατομών, η μέση θλιπτική παραμόρφωση δεν πρέπει να υπερβαίνει την ϵ_{c2} (ή ϵ_{c3} , για διγραμμική σχέση $\sigma_c - \epsilon_c$)
3. Για τις παραμορφώσεις τενόντων χωρίς συνάφεια ή εξωτερικών, βλέπε §5.10

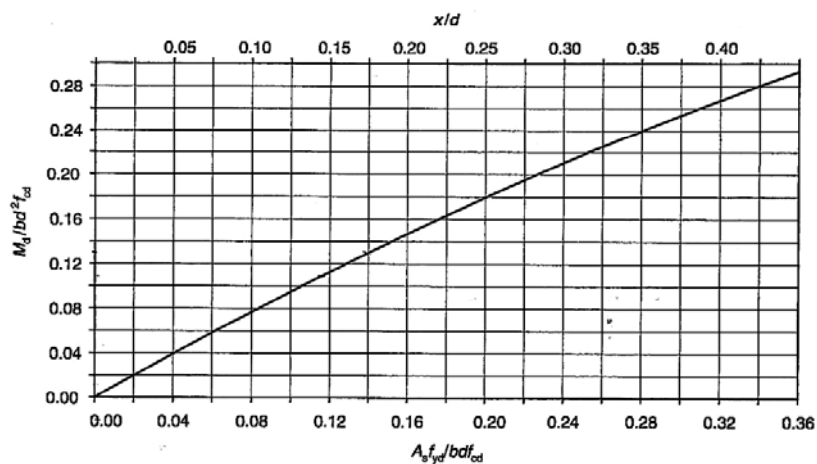
Βοηθήματα για το σχεδιασμό σε κάμψη



Συντελεστές ύψους ουδέτερου άξονα (n) και μοχλοβραχίονα (z) για $C \leq 50 \text{MPa}$
(Walraven, Workshop "Eurocodes: Background and applications", 2008)

9

Βοηθήματα για το σχεδιασμό σε κάμψη

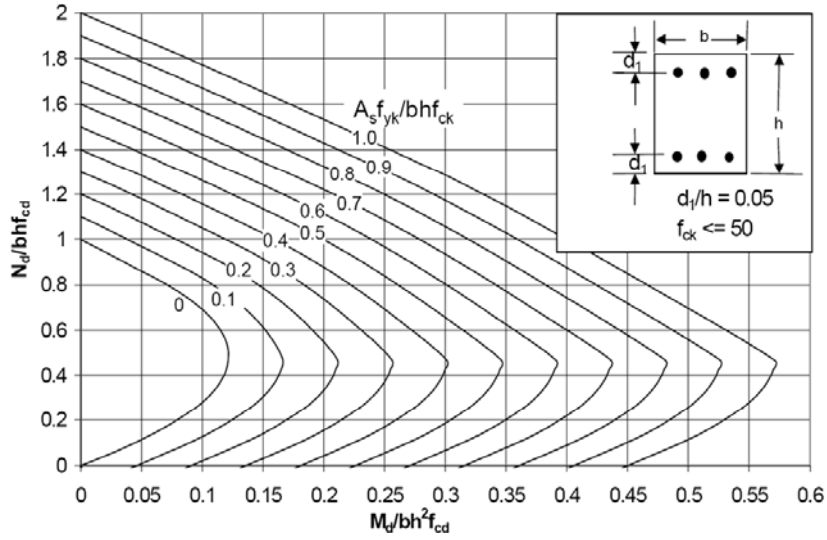


Νομογράφημα για τον υπολογισμό σε κάμψη ορθογωνικών διατομών, χωρίς θλιβόμενο σπλισμό (Σχήμα 5.7 Designers' Guide to EN 1992)

Narayanan, R., and Beeby, A. (2005). *Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures Eurocode 2*. Thomas Telford Ltd, London.

6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Βοηθήματα για το σχεδιασμό (M, N)

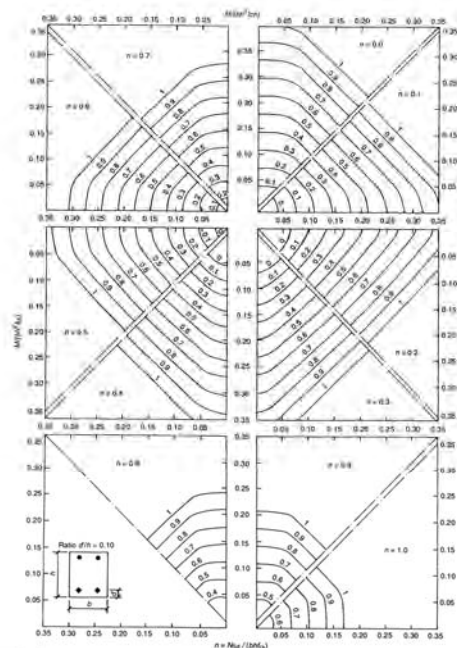


Νομογράφημα για υποστυλώματα σε μονοαξονική επιπόνηση, για C≤50MPa

Narayanan, R., and Beeby, A. (2005). *Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures Eurocode 2*. Thomas Telford Ltd, London.

6.1 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Βοηθήματα για το σχεδιασμό (M_x, M_y, N)



Νομογράφημα για υποστυλώματα σε διαξονική επιπόνηση, για C≤50MPa

Narayanan, R., and Beeby, A. (2005). *Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures Eurocode 2*. Thomas Telford Ltd, London.

Διάτμηση

Βασικές αρχές

- Μέχρι μια τιμή τέμνουσας $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$ δεν απαιτείται όπλιση έναντι διάτμησης (πλην του ελάχιστου οπλισμού των δοκών)
 - Αν $V_{Ed} > V_{Rd,c} \rightarrow$ όλη η τέμνουσα αναλαμβάνεται με οπλισμό διάτμησης!
 - **αλλά:** για τον υπολογισμό του οπλισμού αυτού χρησιμοποιείται το μοντέλο δικτυώματος με μεταβλητή γωνία θλιπτήρων ($1 \leq \cot \theta \leq 2,5$)
- καταργείται η προσέγγιση (ΕΚΟΣ κλπ.) του «μεριδίου σκυροδέματος»!..

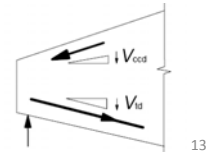
Αντοχή σε τέμνουσα στοιχείου με οπλισμό διάτμησης:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{ccd} + V_{td}$$

$V_{Rd,s}$: τέμνουσα που αναλαμβάνει ο οπλισμός διάτμησης (στη διαρροή του)

V_{ccd} : διατμητική συνιστώσα της δύναμης στη θλιβόμενη περιοχή, για *θλιβόμενη* κεκλιμένη χορδή

V_{td} : διατμητική συνιστώσα της δύναμης στον εφελκόμενο οπλισμό, για *εφελκόμενη* κεκλιμένη χορδή



13

Σχεδιασμός σε τέμνουσα στοιχείου όπου δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης:

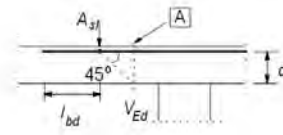
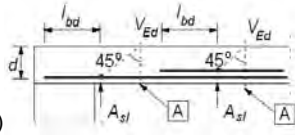
$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k(100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_l \cdot \sigma_{cp}] b_w d$$

$$V_{Rd,c} \geq (v_{min} + k_l \cdot \sigma_{cp}) b_w d$$

f_{ck} σε MPa, $V_{Rd,c}$ σε [N]

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02 \quad (d \text{ σε mm})$$



A_{sl} εμβαδόν του εφελκόμενου οπλισμού που εκτείνεται σε απόσταση $\geq (l_{bd} + d)$ πέρα από τη θεωρούμενη διατομή (A).

b_w είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκόμενη ζώνη [mm]

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd} \quad [\text{MPa}]$$

N_{Ed} αξονική δύναμη στη διατομή [σε N] ($N_{Ed} > 0$ για θλίψη). Η επιρροή των επιβεβλημένων παραμορφώσεων στη N_E μπορεί να αγνοείται.

A_c εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος [mm²]

14

6.2 Διάτμηση

Με βάση το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα ($C_{Rd,c}=0.18/\gamma_c$, $k_1=0.15$):

$$V_{Rd,c} = [0,12k(100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,15\sigma_{cp}] b_w d$$

$$V_{Rd,c} \geq (0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + 0,15\sigma_{cp}) b_w d$$

- Σε περιοχές προεντεταμένων στοιχείων που δεν έχουν ρηγματωθεί λόγω κάμψης, η $V_{Rd,c}$ περιορίζεται από την εφελκυστική αντοχή f_{ctd}

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

I ροπή αδρανείας

b_w πλάτος της διατομής στο κέντρο βάρους της,

S ροπή αντιστάσεως της διατομής περί τον κεντροβαρικό της άξονα

$\alpha_l = l_x / l_{pl2} \leq 1,0$ για τένοντες με προένταση πριν τη σκλήρυνση

= 1,0 για άλλους τύπους προέντασης

l_x απόσταση διατομής από το σημείο έναρξης του μήκους μεταβίβασης

l_{pl2} άνω όριο μήκους μεταβίβασης του προεντετ. στοιχείου (σχέση 8.18)

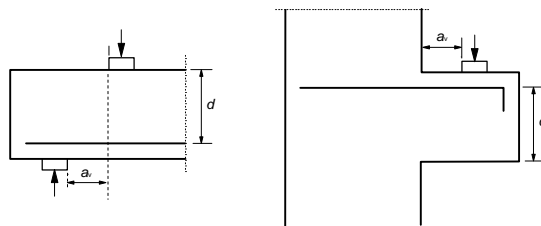
- Δεν απαιτείται αυτός ο έλεγχος σε διατομές από τη στήριξη ως το σημείο τομής του ΚΒ-άξονα με ευθεία κλίσεως 45° ως προς την παρειά της στήριξης

15

6.2 Διάτμηση

Λοιπές απαιτήσεις για στοιχεία χωρίς οπλισμό διάτμησης

- Για τη διαστασιολόγηση του διαμήκους οπλισμού σε μια περιοχρή ρηγματωμένη λόγω κάμψης, η γραμμή των M_{Ed} πρέπει να μετατίθεται κατά $a_1 = d$ στην πιο δυσμενή διεύθυνση
- Φορτία σε απόσταση $0,5d \leq a_v \leq 2d$ από την παρειά της στήριξης:
→ μείωση της συμβολής τους στη V_{Ed} βάσει $\beta = a_v/2d$ ($a_v \notin 0.5d$)



πρέπει όμως:

$$V_{Ed} \leq 0,5 b_w d \nu f_{cd}$$

όπου:

$$\nu = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Δοκός με άμεση στήριξη

Βραχύς πρόβολος

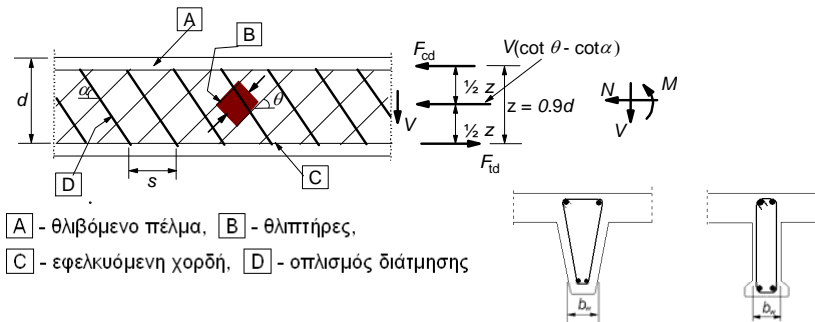
- Δοκοί με φορτία κοντά στη στήριξη και βραχείς πρόβολοι μπορεί να σχεδιάζονται και με προσομοιώματα **θλιπτήρων-ελκυστήρων** (§6.5)

16

6.2 Διάτμηση

Σχεδιασμός σε τέμνουσα στοιχείου όπου απαιτείται οπλισμός διάτμησης:

→ μοντέλο δικτυώματος με μεταβλητή γωνία θλιπτήρων



F_{td} τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης στο διαμήκη οπλισμό

F_{cd} τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης στο σκυρόδεμα στη διεύθυνση του διαμήκου άξονα του στοιχείου

Στις δοκούς επιτρέπεται να λαμβάνεται μοχλοβραχίονας $z=0.9d$

17

6.2 Διάτμηση

- Όρια γωνίας θλιπτήρων σκυροδέματος: $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$
- Στοιχεία με κατακόρυφο οπλισμό διάτμησης (συνδετήρες):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad \text{και} \quad V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

A_{sw} εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης

s απόσταση συνδετήρων

f_{ywd} τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης

v_1 δείκτης μείωσης αντοχής σκυροδέματος ρηγματωμένου από διάτμηση

$$v_1 = v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Αν $\sigma_{wd} < 0,8 f_{yk}$, μπορεί να ληφθεί $v_1 = 0,6$ (για $f_{ck} \leq 60$ MPa)

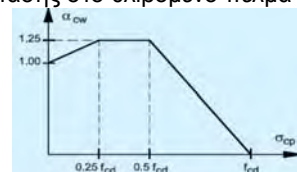
α_{cw} συντελεστής για συνεκτίμηση εντατικής κατάστασης στο θλιβόμενο πέλμα

$$\alpha_{cw} = 1 \text{ για μη προεντεταμένες κατασκευές}$$

$$= (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{για } 0 < \sigma_{cp} \leq -0,25 f_{cd}$$

$$= 1,25 \quad \text{για } 0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$$

$$= 2,5 (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{για } 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} < -1,0 f_{cd}$$



18

6.2 Διάτμηση

- Στοιχεία με κεκλιμένο οπλισμό διάτμησης (συνδετήρες):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$$

και

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \cot \alpha) (1 + \cot^2 \theta)$$

- μέγιστη ενεργός διατομή του οπλισμού διάτμησης, $A_{sw,max}$, για $\cot \theta = 1$:

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{\frac{1}{2} \alpha_{cw} v_1 f_{cd}}{\sin \alpha}$$

- Μείωση b_w (για υπολογισμό $V_{Rd,max}$) στον κορμό στοιχείων με περιβλήματα τενόντων με ενσωμάτωση διαμέτρου $\phi > b_w/8$:

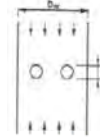
$$b_{w,nom} = b_w - 1,2 \Sigma \phi$$

Για μεταλλικά περιβλήματα τενόντων με ενσωμάτωση με $\phi \leq b_w/8$, $b_{w,nom} = b_w$

- Πρόσθετη εφελκυστική δύναμη ΔF_{td} στο διαμήκη οπλισμό λόγω V_{Ed} :

$$\Delta F_{td} = 0,5 V_{Ed} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

$$\alpha \lambda \lambda \lambda (M_{Ed}/z) + \Delta F_{td} \leq M_{Ed,max}/z \quad (M_{Ed,max} \rightarrow \max M \text{ στη δοκό})$$



19

6.2 Διάτμηση

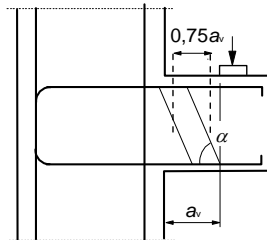
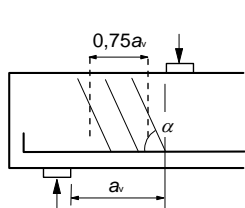
- Φορτία σε απόσταση $0,5d \leq a_v \leq 2d$ από την παρειά της στήριξης:

→ μείωση της συμβολής τους στη V_{Ed} βάσει $\beta = a_v/2d$ ($a_v < 0,5d$)

Η μειωμένη τέμνουσα V_{Ed} πρέπει να πληροί τη συνθήκη

$$V_{Ed} \leq A_{sw} \cdot f_{ywd} \sin \alpha$$

$A_{sw} \cdot f_{ywd}$: αντοχή οπλισμού διάτμησης που τέμνει τα λοξά διατμητικά ρήγματα



πρέπει πάντα:

$$V_{Ed} \leq 0,5 b_w d v f_{cd}$$

Δοκός με άμεση στήριξη

Βραχύς πρόβολος

- Λαμβάνεται υπόψη μόνο ο οπλισμός διάτμησης που βρίσκεται στο κεντρικό $0,75 a_v$ της περιοχής. Η μείωση επιτρέπεται μόνο όταν ο διαμήκης οπλισμός αγκυρώνεται πλήρως στη στήριξη.

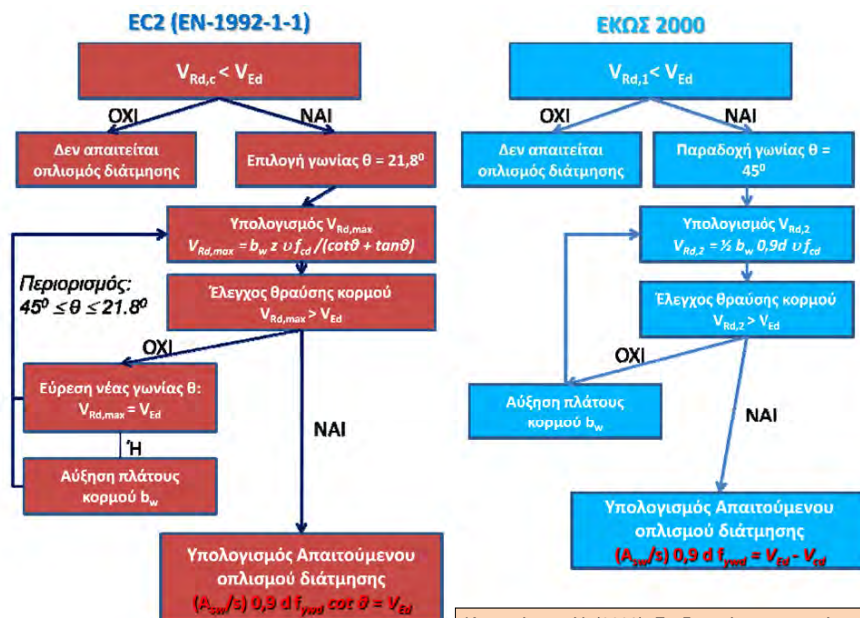
20

6.2 Διάτμηση

- **Τυπική διαδικασία σχεδιασμού** οπλισμού διάτμησης:
 - λαμβάνεται $\cot \theta = 2,5$ ($\theta = 21,8^\circ$)
 - υπολογίζεται ο απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης (A_{sw})
 - ελέγχεται ότι δεν υπάρχει υπέρβαση της $V_{Rd,max}$
 - αν $V_{Ed} > V_{Rd,max}$ υπάρχουν δύο επιλογές:
 - αύξηση πάχους κορμού
 - υπολογισμός της θ για την οποία $V_{Ed} > V_{Rd,max}$ και επανάληψη της διαδικασίας (\leftrightarrow μεγαλύτερο A_{sw})
- **Πλεονεκτήματα** σχεδιασμού με μοντέλο μεταβλητής θ :
 - ελευθερία στο σχεδιασμό:
 - μικρές θ οδηγούν σε χαμηλή απαίτηση οπλισμού (A_{sw})
 - μεγάλες θ οδηγούν σε λεπτούς κορμούς (μείωση ποσότητας σκυροδέματος, μείωση IB)
 - απλό στην εφαρμογή του μοντέλο ισορροπίας
- **Μειονεκτήματα:** $\theta_{\text{υπολ}} \neq \theta_{\text{πραγμ}}$, δεν συνάδει πλήρως με σύγχρονες τάσεις, προβλήματα με αντισεισμικό σχεδιασμό (μείωση V_c)

21

6.2 Διάτμηση



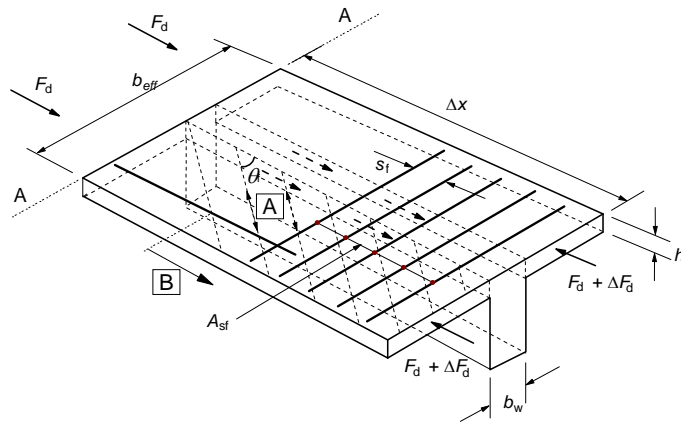
Καραγιάννης, Χ. (2008). Σχεδιασμός κατασκευών με βάση τον EC2. Ημερίδα ΤΕΕ-Τμ. Αν. Μακεδ.

6.2 Διάτμηση

Διάτμηση στη σύνδεση πελμάτων – κορμού πλακοδοκών

- διαμήκης διατμητική τάση, v_{Ed} , στην ένωση πέλματος – κορμού

$$v_{Ed} = \Delta F_d / (h_f \cdot \Delta x)$$



- A** - θλιπτήρες **B** - διαμήκης ράβδος που αγκυρώνεται πέρα από το θεωρητικό σημείο τομής της με το θλιπτήρα

23

6.2 Διάτμηση

Διάτμηση στη σύνδεση πελμάτων – κορμού πλακοδοκών

- Εγκάρσιος οπλισμός ανά μέτρο μήκους A_{sf}/s_f στη σύνδεση

$$(A_{sf,yd}/s_f) \geq v_{Ed} \cdot h_f / \cot \theta_f$$
- για αποφυγή συντριβής θλιπτήρων πέλματος:

$$v_{Ed} \leq v_{cd} \sin \theta_f \cos \theta_f$$
- επιτρεπόμενη περιοχή τιμών για την $\cot \theta_f$ (Εθν. Προσάρτημα):
 - $1,0 \leq \cot \theta_f \leq 2,0$ για θλιβόμενα πέλματα ($45^\circ \geq \theta_f \geq 26,5^\circ$)
 - $1,0 \leq \cot \theta_f \leq 1,25$ για εφελκυσμένα πέλματα ($45^\circ \geq \theta_f \geq 38,6^\circ$)
- Για ταυτόχρονη λειτουργία διάτμησης μεταξύ πελμάτων – κορμού πλακοδοκών και εγκάρσιας κάμψης:
 - απαιτούμενο εμβαδόν $A_{sf} = \max \{ A_{sf, \text{διάτμ}}, 0,5 A_{sf, \text{διάτμ}} + A_{sf, \text{κάμψης}} \}$
- Αν $v_{Ed} \leq 0,4 f_{ctd}$ δεν απαιτείται οπλισμός πέραν εκείνου λόγω κάμψης
- Ο διαμήκης οπλισμός του πέλματος πρέπει να αγκυρώνεται πέρα από το θλιπτήρα που απαιτείται για τη μεταβίβαση της δύναμης του οπλισμού στη διατομή του πέλματος όπου απαιτείται ο οπλισμός

24

6.2 Διάτμηση

Διάτμηση στη διεπιφάνεια σκυροδεμάτων που διαστρώθηκαν σε διαφορετικό χρόνο

- τιμή σχεδιασμού της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια:

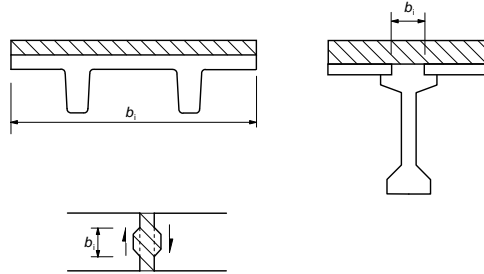
$$V_{Edi} = \beta V_{Edi} / (z b_i)$$

β λόγος διαμήκου δύναμης στη νέα στρώση σκυροδέματος προς τη συνολική δύναμη είτε στη θλιβόμενη ζώνη είτε στην εφελκυσμένη

V_{Ed} εγκάρσια τέμνουσα δύναμη

z μοχλοβραχίονας της σύνθετης διατομής

b_i πλάτος της διεπιφάνειας



$$V_{Edi} \leq V_{Rdi}$$

25

6.2 Διάτμηση

Διάτμηση στη διεπιφάνεια σκυροδεμάτων που διαστρώθηκαν σε διαφορετικό χρόνο

- διατμητική αντοχή σχεδιασμού στη διεπιφάνεια:

$$V_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu s_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

c και μ δείκτες που εξαρτώνται από την τραχύτητα της επιφάνειας

s_n τάση ανά μονάδα επιφάνειας λόγω της ελάχιστης εξωτερικής ορθής δύναμης καταμήκος της διεπιφάνειας (θετική για θλίψη) $s_n < 0,6 f_{cd}$

s_n εφελκυστική \rightarrow λαμβάνεται $f_{ctd}=0$

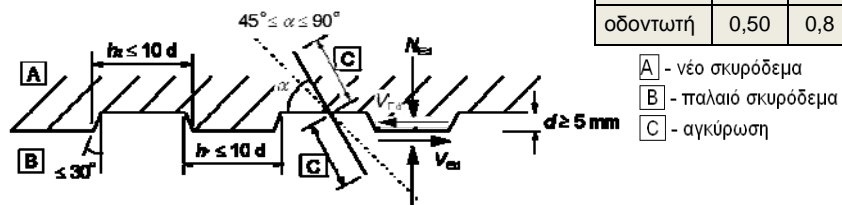
$$\rho = A_s / A_i$$

A_s : εμβαδόν οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια

A_i : επιφάνεια του αρμού

$v = 0.6(1 - f_{ck}/250)$ δείκτης μείωσης της αντοχής

Επιφάνει α	c	μ
πολύ λεία	0,25	0,5
λεία	0,35	0,6
τραχεία	0,45	0,7
οδοντωτή	0,50	0,8



26

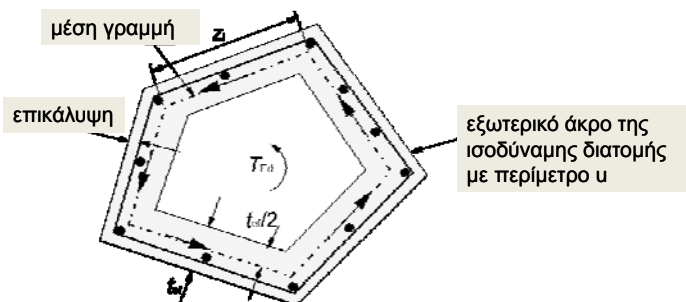
Στρέψη

Βασικές αρχές

- Ο έλεγχος (τόσο σε ΟΚΑ όσο και ΟΚΛ) απαιτείται στην περίπτωση 'στρέψης ισορροπίας' (όχι συμβιβαστού των παραμορφώσεων)
- Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τοποθετείται ελάχιστος οπλισμός υπό μορφή συνδετήρων και διαμήκων ράβδων (§7.3 και 9.2)
- Υπολογισμός σε στρέψη με βάση το μοντέλο λεπτότοιχης κλειστής διατομής (συνθήκη ισορροπίας διατμητικής ροής)
 - συμπαγείς διατομές → ισοδύναμες λεπτότοιχες
 - σύνθετες διατομές (π.χ. πλακοδοκοί)
 - διάσπαση σε επιμέρους (προσομοιούμενες ως λεπτότοιχες)
 - ⇒ συνολική αντίσταση σε στρέψη $T_{Rd} = \sum T_{Rdi}$
 - στις μη-συμπαγείς διατομές: πάχος λεπτότοιχης $t_{ef} \leq t_{πραγμ}$
 - Κατανομή ροπών στρέψεως T_E βάσει αρηγμάτων δυστρεψιών
 - Κάθε επιμέρους διατομή μπορεί να σχεδιάζεται ανεξάρτητα

27

Προσομοίωση διατομών με βάση το μοντέλο της ισοδύναμης λεπτότοιχης κλειστής διατομής



Πάχος της ισοδύναμης λεπτότοιχης κλειστής διατομής $t_{ef} = A/u$

A : συνολικό εμβαδόν της διατομής που περικλείεται από την εξωτερική περίμετρο, συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών κενών

u : εξωτερική περίμετρος της διατομής

→ π.χ. για τετραγωνική διατομή $t_{ef} = b^2/(4b) = b/4$

6.2 Διάτμηση

■ Διαδικασία σχεδιασμού οπλισμού στρέψης:

- διατμητική τάση στο τοίχωμα μιας διατομής υπό ροπή στρέψης T_{Ed}

$$\tau_{t,i} t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k}$$

- τέμνουσα $V_{Ed,i}$ (λόγω στρέψης) στο τοίχωμα i :

$$V_{Ed,i} = \tau_{t,i} t_{ef,i} z_i$$

A_k εμβαδόν που περικλείεται από τη μέση γραμμή των επιμέρους τοιχωμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών κενών.

$\tau_{t,i}$ διατμητική τάση λόγω στρέψης στο τοίχωμα i

z_i μήκος του επιμέρους τοιχώματος i οριζόμενο από την απόσταση των σημείων τομής του με τα γειτονικά τοιχώματα

→ Το πάχος $t_{ef,i}$ πρέπει να είναι μικρότερο από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ του άκρου της διατομής και του κέντρου του διαμήκους οπλισμού (στις κοίλες διατομές $t_{ef} \leq t_{\text{πραγμ}}$)

- Τα εντατικά μεγέθη λόγω στρέψης και διάτμησης επιτρέπεται να επαλληλίζονται

29

6.2 Διάτμηση

Διαδικασία σχεδιασμού οπλισμού στρέψης

- απαιτούμενο εμβαδόν διαμήκους οπλισμού για ανάληψη στρέψης:

$$\frac{\sum A_{sl} f_{yd}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \cot \theta$$

θ γωνία των λοξών θλιπτήρων

f_{yd} τιμή σχεδιασμού τάσης διαρροής του διαμήκους οπλισμού A_{sl}

u_k περίμετρος της περιοχής με εμβαδόν A_k



- εφελκόμενες χορδές: ο διαμήκους οπλισμός λόγω στρέψης πρέπει να προστίθεται στον απαιτούμενο για άλλους λόγους (κάμψη)
- στοιχεία υπό ταυτόχρονη στρέψη (T_{Ed}) και διάτμηση (V_{Ed}): κρίσιμη η αντοχή των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος

$$T_{Ed} / T_{Rd,max} + V_{Ed} / V_{Rd,max} \leq 1,0$$

$$T_{Rd,max} = 2\nu \alpha_{cw} f_{cd} A_k t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta$$

ν, α_{cw} όπως στη διάτμηση

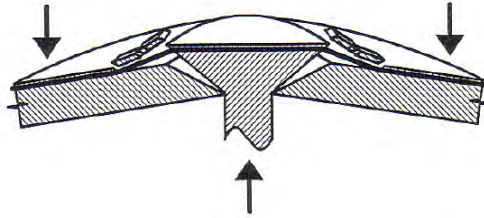
- ~ορθογωνικές συμπαγείς διατομές: αρκεί ελάχιστος οπλισμός αν $T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1,0$ (ρηγμάτωση: $T_{Rd,c} = 2f_{ctd} t_{ef,i} A_k$)

30

Διάτρηση

Βασικές αρχές

- Καλύπτονται: συμπαγείς πλάκες, μκητοειδείς πλάκες με διάκενα (ολόσωμη διαμόρφωση στις περιοχές υποστυλωμάτων), στοιχεία θεμελίωσης
- Διάτρηση: προέρχεται από μεμονωμένο φορτίο ή αντίδραση, που δρα επί μιας σχετικώς μικρής περιοχής → φορτιζόμενη επιφάνεια A_{load}

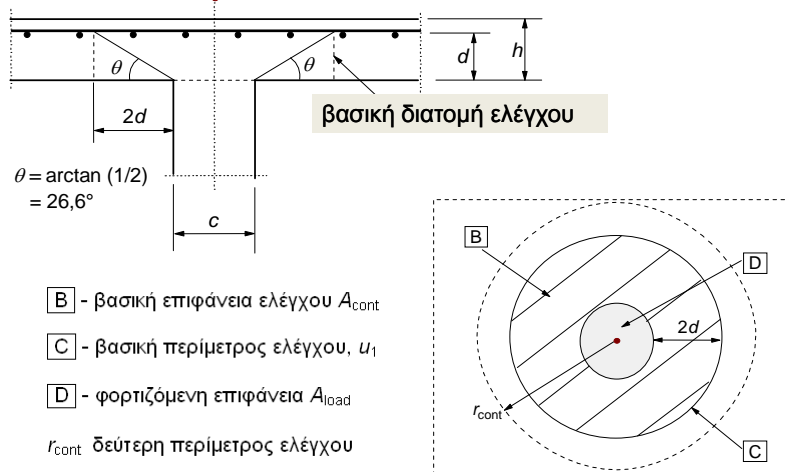


(Walraven, Workshop "Eurocodes: Background and applications", 2008)

- Καλύπτεται κυρίως η περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων. Στην περίπτωση των πεδίων, το φορτίο που ασκείται εντός της περιμέτρου ελέγχου συμβάλλει στην αντίσταση και μπορεί να αφαιρεθεί όταν υπολογίζεται η διατμητική τάση σχεδιασμού έναντι διάτρησης

31

Μοντέλο υπολογισμού για τον έλεγχο ΟΚΑ από διάτρηση



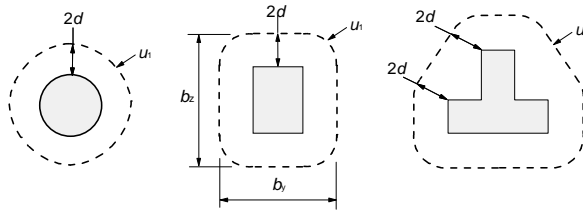
- Η αντοχή σε τέμνουσα πρέπει να ελέγχεται στην εξωτερική παρειά του υποστυλώματος και στη βασική περίμετρο ελέγχου u_1
- Αν απαιτείται οπλισμός διάτμησης → προσδιορίζεται και επιπλέον περίμετρος $u_{out,ef}$ όπου δεν απαιτείται πλέον ο οπλισμός αυτός

32

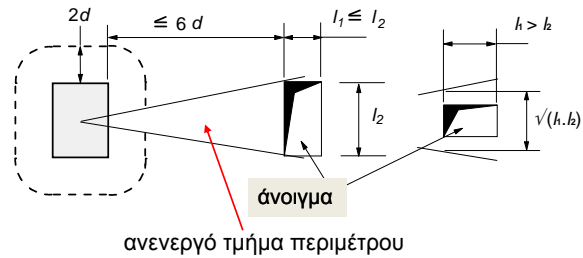
6.4 Διάτρηση

Κατανομή φορτίων και βασική περίμετρος ελέγχου

- Το στατικό ύψος της πλάκας θεωρείται σταθερό $d_{\text{eff}} = \frac{(d_y + d_z)}{2}$



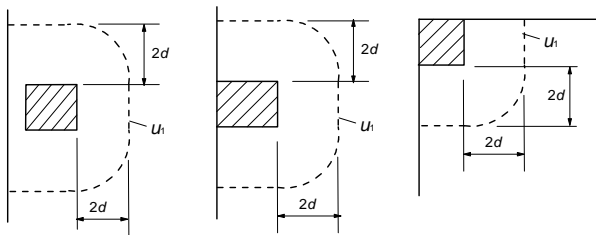
Τυπικές βασικές περιμέτροι ελέγχου γύρω από φορτιζόμενες επιφάνειες



Περίμετρος ελέγχου κοντά σε άνοιγμα

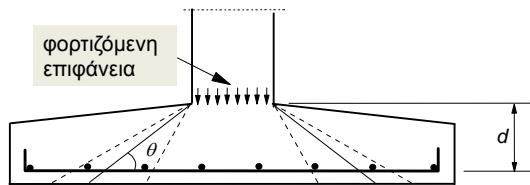
6.4 Διάτρηση

Κατανομή φορτίων και βασική περίμετρος ελέγχου



Βασικές περιμέτροι ελέγχου για φορτιζόμενες επιφάνειες που βρίσκονται κοντά σε άκρο ή γωνία

- Διατομή ελέγχου:** ορίζεται από την περίμετρο ελέγχου και το στατικό ύψος



Ύψος διατομής ελέγχου σε πέδιλο μεταβλητού πάχους

$$\theta \geq \arctan(1/2)$$

- Πρόσθετες διατάξεις για μκητοειδείς πλάκες με κιονόκρανα...

6.4 Διάτρηση

Υπολογισμός της τέμνουσας διάτρησης (V_{Ed})

- Στην περίμετρο του υποστυλώματος ή στην περίμετρο της φορτιζόμενης επιφάνειας :

$$V_{Ed} < V_{Rd,max} \quad (\text{έλεγχος μέγιστης αντοχής σε διάτρηση})$$

- Δεν απαιτείται οπλισμός διάτρησης όταν:

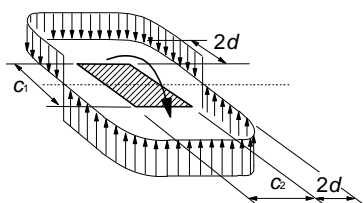
$$V_{Ed} < V_{Rd,c} \quad (\text{αντοχή σε διάτρηση πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης})$$

- Όταν $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ πρέπει να τοποθετείται οπλισμός διάτρησης
- Όταν η αντίδραση σε μια στήριξη δρα έκκεντρα ως προς την u_1 :

$$V_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 d} \quad \text{όπου} \quad \beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1}$$

για ορθογωνικό υποστύλωμα:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1$$



c_1/c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

35

6.4 Διάτρηση

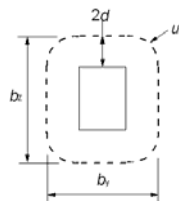
Υπολογισμός της τέμνουσας διάτρησης - έκκεντρη δράση φορτίου

- Για εσωτερικά κυκλικά υποστυλώματα (διαμέτρου D)

$$\beta = 1 + 0,6\pi \frac{e}{D + 4d}$$

- Για εσωτερικά ορθογωνικά υποστυλώματα (εκκεντρότητες φορτίου e_y, e_z):

$$\beta = 1 + 1,8 \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_z}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2}$$



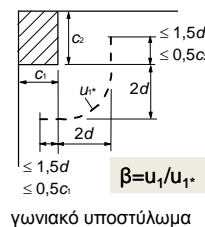
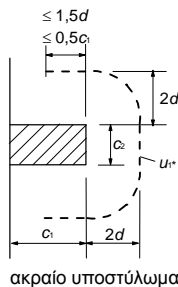
- Για περιμετρικά υποστυλώματα:

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} + k \frac{u_1}{W_1} e_{par}$$

ορθογωνικά υποστυλώματα:

$$W_1 = \frac{c_2^2}{4} + c_1 c_2 + 4c_1 d + 8d^2 + \pi d c_2$$

$c_1/2c_2$	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

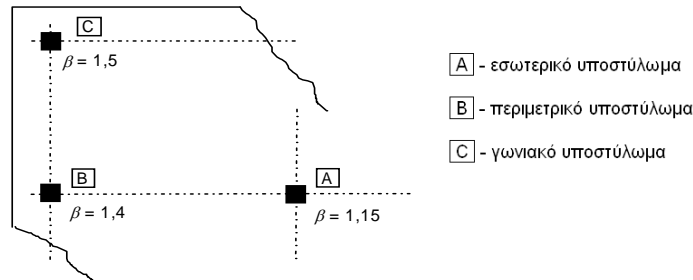


36

6.4 Διάτρηση

Υπολογισμός της τέμνουσας διάτρησης - έκκεντρη δράση φορτίου

- Σε φορείς όπου:
 - η ευστάθεια υπό οριζόντια φορτία δεν εξαρτάται (π.χ. λόγω τοιχωμάτων) από την πλαίσιακή λειτουργία μεταξύ πλακών και υποστυλωμάτων
 - τα γειτονικά ανοίγματα δεν διαφέρουν παραπάνω από 25%
 - μπορεί να χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές τιμές για το β :



- Δεν ισχύει η μείωση της V_{Ed} όταν το μεμονωμένο φορτίο εφαρμόζεται κοντά στο σημείο όπου η μκητοειδής πλάκα εδράζεται επί υποστυλώματος
- Επιτρέπεται μείωση της V_{Ed} πεδίου, λόγω ευνοϊκής επιρροής εδαφ. πιέσεων

37

6.4 Διάτρηση

Αντοχή σε διάτρηση στοιχείων χωρίς οπλισμό διάτρησης

- Αντοχή σε διάτρηση πλάκας (όπου $V_{Ed} < V_{Rd,c}$):

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$$

ρ_{ly}, ρ_{lz} ποσοστά εφελκόμενου οπλισμού (με συνάφεια) κατά y και z

→ υπολογίζονται ως μέσες τιμές, θεωρώντας πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστυλώματος + 3d σε κάθε πλευρά

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$$

σ_{cy}, σ_{cz} ορθές τάσεις στο σκυρόδεμα της κρίσιμης διατομής στις διευθύνσεις y και z (σε MPa, θετικές για θλίψη)

$$\sigma_{c,y} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{cy}} \quad \sigma_{c,z} = \frac{N_{Ed,z}}{A_{cz}}$$

$N_{Ed,y}, N_{Ed,z}$ αξονικές δυνάμεις σε ολόκληρο το φάνωμα (εσωτερ. υποστυλώματα) αξονική δύναμη στη διατομή ελέγχου (ακραία υποστυλώματα)

→ προέρχεται είτε από φορτίο είτε από προένταση.

$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c = 0,12$ και $k_1 = 0,1$ (Εθνικό Προσάρτημα)

k, A_c, v_{min} → όπως στη διάτμηση

38

6.4 Διάτρηση

Αντοχή σε διάτρηση στοιχείων χωρίς οπλισμό διάτρησης

- Αντοχή σε διάτρηση βάσεων υποστυλωμάτων (σε περιμέτρους ελέγχου που απέχουν $2d$ από την περίμετρο του υποστυλώματος):

$$v_{Rd} = C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} \times 2d/a \geq v_{min} \times 2d/a$$

a απόσταση από την περίμετρο του υποστυλώματος ως τη θεωρούμενη περίμετρο ελέγχου

➤ Φόρτιση χωρίς εκκεντρότητα:

$$\text{καθαρή ασκούμενη δύναμη } V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed}$$

(ΔV_{Ed} η προς τα πάνω εδαφική πίεση μείον το ίδιο βάρος της βάσης του υποστυλώματος)

$$v_{Ed} = V_{Ed,red}/u_d \leq v_{Rd,c}$$

➤ Φόρτιση με εκκενρότητα:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \left[1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed,red} W} \right]$$

W : όπως το W_1 , αλλά αναφέρεται σε περίμετρο u

39

6.4 Διάτρηση

Αντοχή σε διάτρηση στοιχείων με οπλισμό διάτρησης

- Όταν $v_{Ed} > v_{Rd,c}$ απαιτείται οπλισμός διάτρησης, από τη σχέση:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 v_{Rd,c} + 1,5 (d/s_r) A_{sw} f_{ywd,ef} (1/(u_1 d)) \sin \alpha$$

A_{sw} εμβαδόν οπλισμού διάτρησης καταμήκος μιας από τις περιμέτρους γύρω από το υποστυλώμα [mm²]

s_r αξονική απόσταση των περιμέτρων του οπλισμού διάτρησης [mm]

$f_{ywd,ef}$ δρώσα τιμή σχεδιασμού της αντοχής του οπλισμού διάτρησης

$$\rightarrow f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 d \leq f_{ywd} \text{ [MPa]}$$

d μέσος όρος των στατικών υψών σε δύο κάθετες διευθύνσεις [mm]

α γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτρησης με το επίπεδο της πλάκας

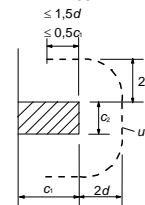
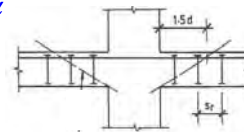
- Στην παρειά του υποστυλώματος:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max}$$

εσωτερικό υποστυλώμα $u_0 =$ μήκος περιμέτρου υποστυλώματος [mm]

ακραίο υποστυλώμα $u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$ [mm]

γωνιακό υποστυλώμα $u_0 = 3d \leq c_1 + c_2$ [mm]



40

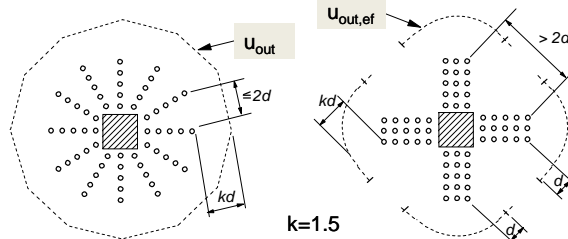
6.4 Διάτρηση

Αντοχή σε διάτρηση στοιχείων με σπλισμό διάτρησης

- Περίμετρος ελέγχου πέρα από την οποία δεν απαιτείται σπλισμός διάτρησης:

$$u_{out,ef} = \beta V_{Ed} / (v_{Rd,c} d)$$

Η εξώτατη περίμετρος σπλισμού διάτρησης πρέπει να τοποθετείται σε μια απόσταση όχι μεγαλύτερη από kd εντός της u_{out} (ή $u_{out,ef}$)



- Όταν χρησιμοποιούνται ως σπλισμός διάτρησης ιδιοπαραγόμενα προϊόντα, η $V_{Rd,cs}$ πρέπει να υπολογίζεται μέσω δοκιμών

→ απαιτείται Ευρωπαϊκό Τεχνικό Πιστοποιητικό



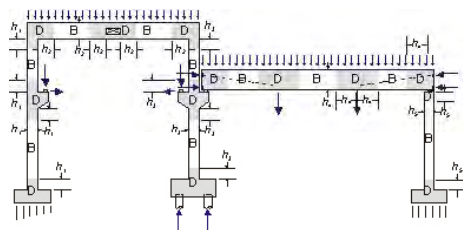
41

6.5 Μοντέλα θλιπτήρων-ελκυστήρων

Σχεδιασμός με μοντέλα θλιπτήρων-ελκυστήρων

Βασικές αρχές

- Πεδίο εφαρμογής ΜΘΕ: Όταν η κατανομή των παραμορφώσεων είναι μη γραμμική (π.χ. σε στηρίξεις, κοντά σε συγκεντρωμένα φορτία, ή σε περιπτώσεις επίπεδης έντασης)
- Υπόβαθρο: οι περιοχές των στοιχείων Ο/Σ διακρίνονται σε Β (Bernoulli) και D (Discontinuity)



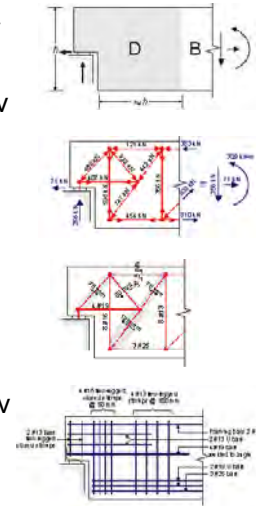
Strut - and - Tie
Resource Web Site
(D. Kuchma)

- ΜΘΕ = μοντέλα δικτυώματος για περιοχές D
- κατάλληλα για υψίκορμες δοκούς, βραχείς προβόλους, κόμβους...

42

Βήματα σχεδιασμού με ΜΘΕ (εκτός Ευρωκώδικα 2!...)

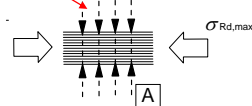
- Καθορισμός γεωμετρίας περιοχής D και δυνάμεων στα άκρα της
- Σχηματική (ή και ακριβής, από FEM) κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό της περιοχής
- Καθορισμός θλιπτήρων στις ζώνες θλιπτικών τάσεων
- Ολοκλήρωση δικτυώματος με προσθήκη ελκυστήρων (↔ισορροπία με θλιπτήρες!)
- Επίλυση δικτυώματος (εύρεση δυνάμεων θλιπτήρων, ελκυστήρων)
- Υπολογισμός απαιτούμενων διατομών ελκυστήρων
- Κατασκευαστική διαμόρφωση οπλισμού (αγκύρωση, κατανεμημένος οπλισμός για έλεγχο ρηγμάτωσης...)



43

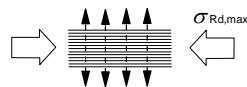
Θλιπτήρες

- Αντοχή σχεδιασμού ενός θλιπτήρα σκυροδέματος σε περιοχές με θλιπτική ή μηδενική εγκάρσια τάση: $\sigma_{Rd,max} = f_{cd}$



Ενδεχομένως υψηλότερη $\sigma_{Rd,max}$ σε περιοχές υπό τριαξονική θλίψη(!...)

- Η αντοχή σχεδιασμού πρέπει να μειώνεται στις ρηγματωμένες θλιβόμενες ζώνες: $\sigma_{Rd,max} = 0,6(1 - f_{ck}/250)f_{cd}$

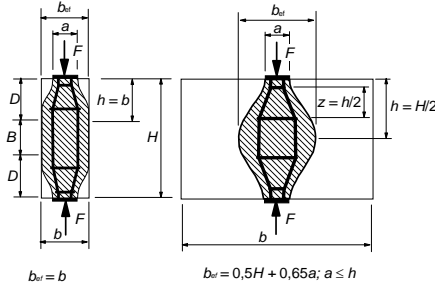


- Για θλιπτήρες μεταξύ περιοχών με άμεση φόρτιση, όπως οι βραχείς πρόβολοι ή οι υψίκορμες δοκοί μικρού ανοίγματος, δίνονται εναλλακτικές μέθοδοι σχεδιασμού στις §6.2.2 και 6.2.3 (Διάτμηση)

44

Ελκυστήρες

- Ο οπλισμός πρέπει να είναι επαρκώς αγκυρωμένος στους κόμβους
- Ο οπλισμός που απαιτείται σε συγκεντρωμένους κόμβους μπορεί να κατανέμεται σε ένα μήκος.



$b_w = b$ $b_w = 0,5H + 0,65a; a \leq h$
μερική ασυνέχεια πλήρης ασυνέχεια

➤ Όταν ο οπλισμός στην περιοχή του κόμβου εκτείνεται σε ένα σημαντικό μήκος του στοιχείου, ο οπλισμός πρέπει να κατανέμεται στο μήκος όπου οι τροχιές των θλιπτικών τάσεων είναι καμπυλωμένες

- Υπολογισμός εφελκυστικής δύναμης T :

➤ περιοχές μερικής ασυνέχειας ($b \leq h/2$):

$$T = \frac{1-b-a}{4} \frac{F}{b}$$

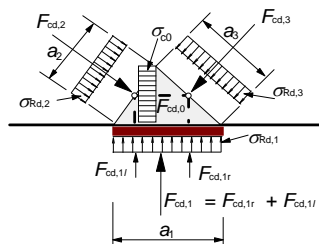
➤ περιοχές πλήρους ασυνέχειας ($b > h/2$):

$$T = \frac{1}{4} \left(1 - 0,7 \frac{a}{h} \right) F$$

45

Κόμβοι

- Σημειακοί κόμβοι σε: στηρίξεις, σημεία εφαρμογής μεμονωμένων φορτίων, περιοχές αγκυρώσεων με συγκέντρωση οπλισμού ή τενόντων, σημεία κάμψης ράβδων οπλισμού, συνδέσεις ή γωνίες δομικών στοιχείων
- Οι κανόνες για κόμβους ισχύουν και για περιοχές στις οποίες μεταβιβάζονται συγκεντρωμένες δυνάμεις, και οι οποίες δεν σχεδιάζονται με βάση ΜΘΕ!
- Τιμές σχεδιασμού των θλιπτικών τάσεων στους κόμβους:



➤ θλιβόμενοι κόμβοι όπου δεν αγκυρώνονται ελκυστήρες :

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \nu f_{cd} = 0,6(1 - f_{ck}/250) f_{cd}$$

→ μπορεί να γίνουν οι εξής παραδοχές:

$$F_{cd,1}/a_1 = F_{cd,2}/a_2 = F_{cd,3}/a_3$$

που δίνει

$$\sigma_{cd,1} = \sigma_{cd,2} = \sigma_{cd,3} = \sigma_{cd0}$$

- Κόμβοι υπό τριαξονική θλίψη μπορεί να ελέγχονται για

$$\sigma_{Rd,max} \leq k_4 \nu f_{cd} = 1,80(1 - f_{ck}/250) f_{cd}$$

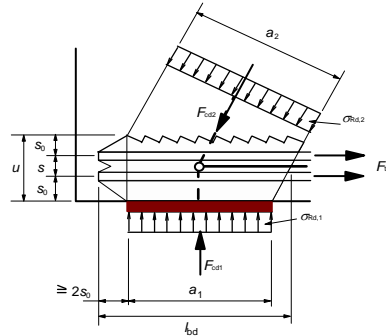
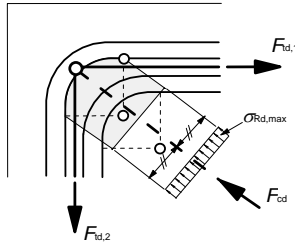
αν είναι γνωστή η κατανομή του φορτίου και για τις 3 διευθύνσεις θλιπτήρων

46

6.5 Μοντέλα θλιπτήρων-ελκυστήρων

- κόμβοι υπό θλίψη+εφελκυσμό, ελκυστήρες αγκυρωμένοι σε μία διεύθυνση (CCT):

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \nu' f_{cd} = 0,51(1 - f_{ck}/250) f_{cd}$$



- κόμβοι υπό θλίψη+εφελκυσμό, ελκυστήρες αγκυρωμένοι σε περισσότερες διευθύνσεις (CTT):

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 \nu' f_{cd} = 0,45(1 - f_{ck}/250) f_{cd}$$

- Οι $\sigma_{Rd,max}$ μπορεί να αυξάνονται κατά 10% υπό προϋποθέσεις [§6.5.4(5)]:
 - γωνίες μεταξύ θλιπτήρων και ελκυστήρων $\geq 55^\circ$, ή
 - σπλισμός σε πολλαπλές στρώσεις, ή
 - κόμβος αξιόπιστα περισιφισμένος μέσω του τρόπου έδρασής του...

47

6.6 Αγκυρώσεις και ενώσεις οπλισμών

Αγκυρώσεις και ενώσεις οπλισμών

- **Τάση συνάφειας:** η τιμή σχεδιασμού της περιορίζεται βάσει
 - χαρακτηριστικών της επιφάνειας των ράβδων οπλισμού
 - εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος
 - περίσφιξης του γειτονικού σκυροδέματος
- Τα **μήκη αγκύρωσης** ή **επιμήκυνσης** υπολογίζονται με την παραδοχή σταθερής τάσης συνάφειας
- Κανόνες εφαρμογής για το σχεδιασμό και την κατασκευαστική διαμόρφωση αγκυρώσεων και επιμηκύνσεων:
 - § 8.4 ÷ 8.4

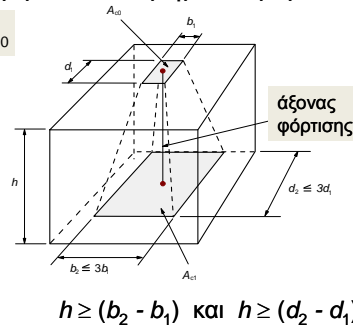
48

Περιοχές με συγκεντρωμένη φόρτιση

- Στις περιοχές με συγκεντρωμένη φόρτιση εξετάζονται:
 - τοπική συντριβή του σκυροδέματος
 - εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις (→ ΜΘΕ §6.5)
- Αντίσταση περιοχής με ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1} / A_{c0}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}$$

- Η F_{Rdu} μειώνεται αν:
 - το φορτίο δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο
 - η τιμή της τέμνουσας είναι υψηλή
- Πρέπει να τοποθετείται οπλισμός για την παραλαβή της εφελκυστικής δύναμης που δημιουργείται λόγω της φόρτισης



49

Κόπωση

- Η αντοχή σε κόπωση ελέγχεται σε ειδικές περιπτώσεις, χωριστά για το σκυρόδεμα και για το χάλυβα
- ο έλεγχος γίνεται σε κατασκευές / δομικά στοιχεία που υπόκεινται τακτικά σε κύκλους φόρτισης → π.χ. γερανογέφυρες, ή γέφυρες που υπόκεινται σε υψηλά φορτία κυκλοφορίας
- **Εσωτερικές δυνάμεις και τάσεις για τον έλεγχο σε κόπωση**
 - υπολογισμός των τάσεων με παραδοχή ρηγματωμένων διατομών
 - διαφορετική συμπεριφορά σε συνάφεια οπλισμού προέντασης και χαλαρού οπλισμού → αύξηση εύρους διακύμανσης τάσης (του A_s)

$$\eta = \frac{A_s + A_p}{A_s + A_p \sqrt{\xi (\phi_s / \phi_p)}}$$

$\phi_p = 1,6 \sqrt{A_p}$ για δέσμες
 $\phi_p = 1,75 \phi_{wire}$ για μεμονωμένα επτάκλινα
 συρματόσχοινα
 $\phi_p = 1,20 \phi_{wire}$ για μεμονωμένα
 τριόκλινα συρματόσχοινα

- κλίση θλιπτήρων $\theta_{fat} \leq 1.0$: από ΜΘΕ ή $\tan \theta_{fat} = \sqrt{\tan \theta}$

50

6.8 Κόπωση

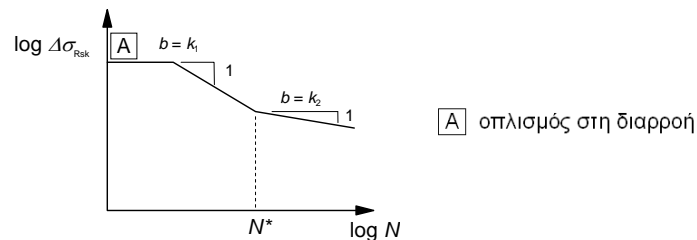
χάλυβας προέντασης	ξ		
	τάνυση πριν την έγχυση	με συνάφεια, τάνυση μετά τη σκλήρυνση	
		$\leq C50/60$	$\geq C70/85$
λείες ράβδοι και σύρματα	Δεν ισχύει	0,3	0,15
συρματόσχοινα	0,6	0,5	0,25
σύρματα με οδόντωση	0,7	0,6	0,3
ράβδοι με νευρώσεις	0,8	0,7	0,35
Σημείωση: Για τιμές ενδιάμεσες των C50/60 και C70/85 μπορεί να γίνεται παρεμβολή			

Λόγος, ξ , αντοχής σε συνάφεια τενόντων προς εκείνη του χαλαρού οπλισμού

51

6.8 Κόπωση

- Διαδικασία ελέγχου για χαλαρό οπλισμό και για χάλυβα προέντασης
 - Βλάβη λόγω ενός κύκλου τάσης εύρους διακύμανσης $\Delta\sigma$
→ προσδιορίζεται από αντίστοιχες καμπύλες S-N
 - Η προκύπτουσα αντίσταση σε N^* κύκλους εύρους $\Delta\sigma_{Rsk}$ πρέπει να διαιρείται με το συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{S,fat}$



Σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης αντοχής σε κόπωση (καμπύλες S-N για χαλαρό οπλισμό και για χάλυβα προέντασης)

52

6.8 Κόπωση

Διαδικασία ελέγχου για χαλαρό οπλισμό και για χάλυβα προέντασης

Παράμετροι καμπυλών S-N για χαλαρούς χάλυβες

Τύπος οπλισμού	N*	εκθέτης της τάσης		Δσ _{Rsk} (MPa) σε N* κύκλους
		k ₁	k ₂	
Ευθύγραμμες και κεκαμμένες ράβδοι ¹	10 ⁶	5	9	162,5
Συγκολλημένες ράβδοι και πλέγματα	10 ⁷	3	5	58,5
Στοιχεία ενώσεων	10 ⁷	3	5	35

Σημ. 1: Οι τιμές για τη Δσ_{Rsk} αναφέρονται σε ευθύγραμμες ράβδους. Οι τιμές για κεκαμμένες ράβδους προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον μειωτικό συντελεστή ζ = 0,35 + 0,026 D/φ.
 όπου:
 D διάμετρος τυμπάνου
 φ διάμετρος ράβδου

- για τον προσδιορισμό της απομένουσας ζωής υφισταμένων κατασκευών, ή για την εκτίμηση της αναγκαιότητας ενίσχυσης:
 k₂=5 για ευθύγραμμες και κεκαμμένες ράβδους

53

6.8 Κόπωση

Διαδικασία ελέγχου για χαλαρό οπλισμό και για χάλυβα προέντασης

Παράμετροι των καμπυλών S-N για χάλυβες προέντασης

καμπύλη S-N για χάλυβα προέντασης που χρησιμοποιείται για	N*	εκθέτης της τάσης		Δσ _{Rsk} (MPa) σε N* κύκλους
		k ₁	k ₂	
προένταση πριν την έγχυση	10 ⁶	5	9	185
προένταση μετά τη σκλήρυνση				
- μεμονωμένα συρματόσχοινα σε πλαστικό περίβλημα	10 ⁶	5	9	185
- ευθύγραμμοι ή καμπύλοι τένοντες σε πλαστικό περίβλημα	10 ⁶	5	10	150
- καμπύλοι τένοντες σε μεταλλικό περίβλημα	10 ⁶	5	7	120
- στοιχεία ενώσεων	10 ⁶	5	5	80

- Για πολλαπλούς κύκλους φόρτισης μεταβλητού εύρους:

→ αθροιστικός δείκτης βλάβης:
$$D_{Ed} = \sum_i \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} < 1$$

(n: αριθμός κύκλων σε εύρος διακύμανσης Δσ_i, N: επιτρεπόμενος αριθμός κύκλων)

54

6.8 Κόπωση

- Έλεγχος βάσει του εύρους διακύμανσης τάσεων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο βαθμό βλάβης
- Σε συνήθεις περιπτώσεις όπου τα φορτία είναι γνωστά (σιδηροδρομικές και οδικές γέφυρες) αντί αναλυτικού υπολογισμού επιτρέπεται:
 - καθορισμός $\Delta\sigma \leftrightarrow$ συγκεκριμένος βαθμός βλάβης στο χάλυβα
 - καθορισμός θλιπτικών τάσεων \leftrightarrow βαθμός βλάβης στο σκυροδέμα
- 1^η μέθοδος: N^* κύκλοι σε (ισοδύναμο) εύρος $\Delta\sigma_{S,eq} \rightarrow$ EN1992-2
- Αντοχή σε κόπωση χαλαρού οπλισμού/χάλυβα προέντασης/συνδέσεων:

$$\gamma_{F,fat} \cdot \Delta\sigma_{S,eq}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{S,fat}}$$

$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*) \rightarrow$ εύρος διακύμανσης τάσεων για N^* κύκλους, από καμπύλη S-N

$\Delta\sigma_{S,eq}(N^*) \rightarrow$ ισοδύναμο εύρος διακύμανσης τάσεων, για αριθμό κύκλων N^*

 - οικοδομικά έργα: $\Delta\sigma_{S,eq}(N^*) \approx \Delta\sigma_{S,max}$ (max εύρος $\Delta\sigma$ του χάλυβα)
- Για μη-συγκολλημένες εφελκόμενες ράβδους: $\Delta\sigma_S \leq k_1 = 70\text{MPa}$
- Για συγκολλημένες εφελκόμενες ράβδους: $\Delta\sigma_S \leq k_2 = 35\text{MPa}$

55

6.8 Κόπωση

- Έλεγχος σκυροδέματος υπό θλίψη ή διάτμηση
- αντοχή σε κόπωση του σκυροδέματος υπό θλίψη:

$$E_{cd,max,eq} + 0,43\sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1$$

$$\text{με } R_{equ} = \frac{E_{cd,min,eq}}{E_{cd,max,eq}} \quad E_{cd,min,eq} = \frac{\sigma_{cd,min,eq}}{f_{cd,fat}} \quad E_{cd,max,eq} = \frac{\sigma_{cd,max,eq}}{f_{cd,fat}}$$

όπου E_{cd} : στάθμη θλιπτικής τάσης, R: λόγος τάσεων (min/max)

σ_{cd} : τιμή της τάσης στο εύρος αστοχίας για $N=10^6$ κύκλους

$$f_{cd,fat} = k_1 \beta_{cc}(t_0) f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad \text{μείωση αντοχής σε χρόνο } t_0 \text{ από την επιβολή του ανακυκλικού φορτίου} \quad \beta_{cc}(t) = e^{\left\{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}}$$

0.85

- Έλεγχος σε κόπωση του σκυροδέματος υπό θλίψη

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \quad \leq 0,9 \text{ για } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\leq 0,8 \text{ για } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

αν η $\sigma_{c,min}$ είναι εφελκυστική, λαμβάνεται $\sigma_{c,min}=0$

56

6.8 Κόπωση

Έλεγχος σκυροδέματος υπό θλίψη ή διάτμηση

- έλεγχος σε κόπωση του σκυροδέματος σε στοιχεία όπου δεν απαιτείται σπλισμός διάτμησης:

- όταν $V_{ed,min}/V_{ed,max} \geq 0$:

$$\left. \frac{|V_{Ed,max}|}{|V_{Rd,c}|} \leq 0,5 + 0,45 \frac{|V_{Ed,min}|}{|V_{Rd,c}|} \right\} \begin{array}{l} \leq 0,9 \text{ μέχρι και C50/60,} \\ \leq 0,8 \text{ C55/67 ή υψηλότερο} \end{array}$$

- όταν $V_{ed,min}/V_{ed,max} < 0$:

$$\frac{|V_{Ed,max}|}{|V_{Rd,c}|} \leq 0,5 - \frac{|V_{Ed,min}|}{|V_{Rd,c}|}$$

$V_{Ed,max}$ τιμή σχεδιασμού της μέγιστης αναπτυσσόμενης τέμνουσας υπό το συχνό συνδυασμό δράσεων

$V_{Ed,min}$ τιμή σχεδιασμού της ελάχιστης αναπτυσσόμενης τέμνουσας υπό το συχνό συνδυασμό δράσεων, στην ίδια διατομή όπου αναπτύσσεται και η $V_{Ed,max}$

$V_{Rd,c}$ τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτμηση (από § 6.2)

57