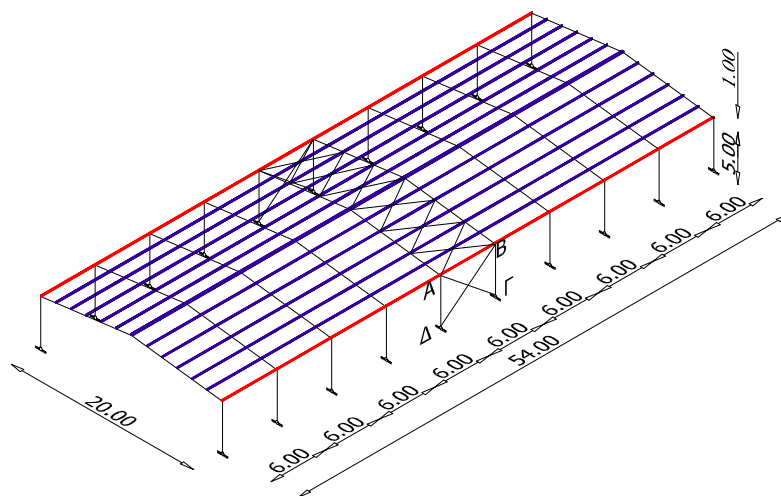


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Μάθημα : Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ
Διδάσκοντες : Ι. Βάγιας – Γ. Ιωαννίδης – Χ. Γαντές
Ι. Μαλλής – Ξ. Λιγνός – Α. Σπηλιόπουλος – Β. Κάρλος – Κ. Καλοχαιρέτης

Ιούνιος 2012

Άσκηση 14

Ζητείται η διαστασιολόγηση, σύμφωνα με τον ΕΑΚ2000, του κατακόρυφου συνδέσμου δυσκαμψίας του βιομηχανικού χώρου που εξετάστηκε στην Άσκηση 13. Οι διαγώνιες ράβδοι θα διαμορφωθούν από κοίλες τετραγωνικές διατομές και η κεφαλοδοκός από διατομή της σειράς ΗΕΑ.



Σχήμα 1: Προοπτικό στεγάστρου

ΛΥΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ 14

1. ΦΟΡΤΙΑ ΕΠΙ ΤΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Σεισμός

$$Q_E = 450,50 \text{ kN}$$

Ισοδύναμη σταθεροποιητική δύναμη

$$q_{\text{ισοδ}} = 3,36 \text{ kN/m}$$

2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ

Το οριζόντιο φορτίο για το οποίο θα πρέπει να διαστασιολογηθεί ο κατακόρυφος σύνδεσμος δυσκαμψίας είναι:

$$q = 450,50 \text{ kN} + 3,36 \text{ kN/m} \times 20 \text{ m} = 517,70 \text{ kN}$$

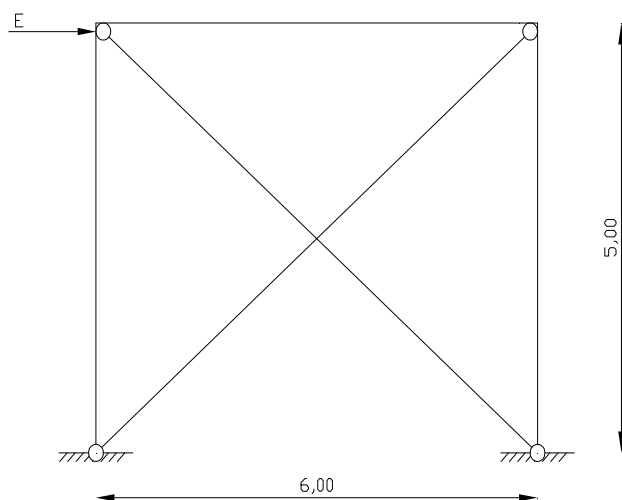
Θεωρούμε ισοκατανομή στους 2 κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας οπότε στον καθένα μεταβιβάζεται δύναμη ίση με:

$$E = \frac{517,70 \text{ kN}}{2} = 258,85 \text{ kN}$$

Οι οριζόντιες δυνάμεις εναλλασσόμενης φοράς αναλαμβάνονται μόνο από τις εκάστοτε εφελκυσόμενες διαγωνίους, ενώ αγνοείται η συμμετοχή των θλιβομένων διαγωνίων.

$$\tan \alpha = \frac{5}{6} = 0,833 \Rightarrow \alpha = 39,8^\circ$$

$$N_{Ed} = \frac{258,85 \text{ kN}}{\cos 39,8} = 336,92 \text{ kN}$$



Σχήμα 8: Κατακόρυφος σύνδεσμος δυσκαμψίας

2.1. Περιορισμός λυγηρότητας

Θα πρέπει να ισχύει:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \leq 1,50 \Rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E \cdot I}} \cdot \ell^2 \leq 1,50 \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\ell}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{I}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{\ell}{\pi \cdot i} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \leq 1,50 \Rightarrow$$

$$i \geq \frac{\ell}{1,5 \times \pi} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} \Rightarrow i \geq \frac{390,5 \text{ cm}}{1,5 \times 3,14} \times \sqrt{\frac{23,5 \text{ kN/m}^2}{21000 \text{ kN/m}^2}} \Rightarrow i \geq 2,77 \text{ cm}$$

όπου

$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\ell^2}$ είναι το ιδεατό κρίσιμο φορτίο Euler της διαγωνίου.

και το μήκος λυγισμού είναι το μισό μήκος της διαγωνίου:

$$\ell = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(6,0\text{m})^2 + (5,0\text{m})^2} = 3,905\text{m} = 390,5\text{cm}$$

Επιλέγεται κοίλη τετραγωνική διατομή 80/80/5 με $i = 3,05\text{cm}$

Για τη διατομή αυτή ισχύει:

$$A = 14,73\text{cm}^2 \quad i_y = 3,05\text{cm} \quad I_y = 136,60\text{cm}^4$$

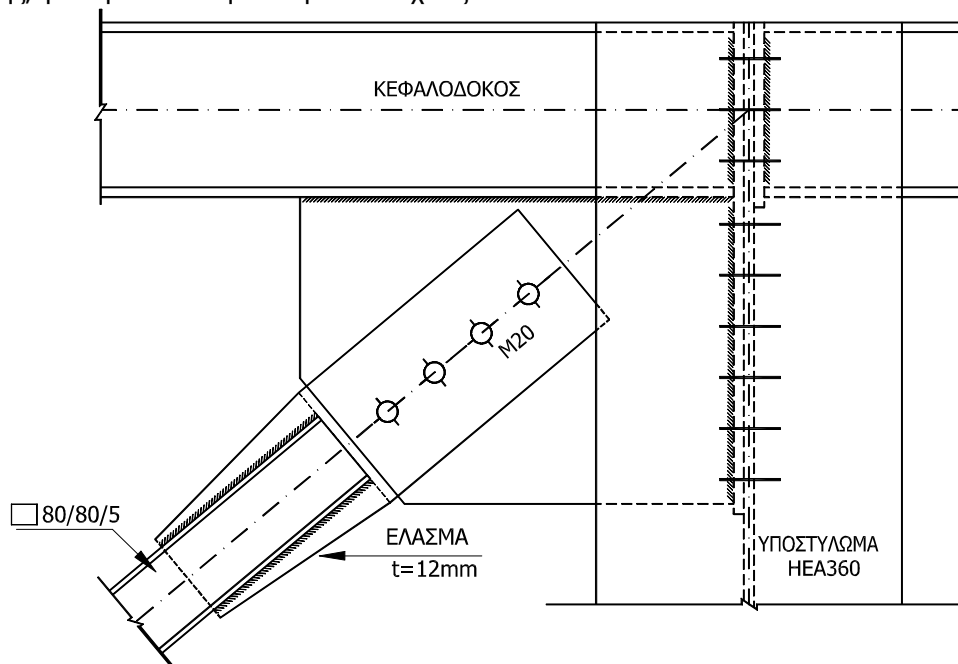
2.2. Έλεγχος σε εφελκυσμό διαγωνίου

Αντοχή διαρροής της διατομής της διαγωνίου:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{14,73\text{cm}^2 \times 23,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 346,2\text{kN} > 336,92\text{kN} = N_{Ed}$$

2.3. Έλεγχος σε εφελκυσμό διατομής ελάσματος σύνδεσης

Για τη σύνδεση της διαγωνίου με τους κόμβους τοποθετείται έλασμα, του οποίου το πάχος επιλέγεται ίσο με 12mm. Επίσης, για την σύνδεση επιλέγονται κοχλίες M20.



Σχήμα 9: Μορφή σύνδεσης κατακόρυφου συνδέσμου δυσκαμψίας με κόμβο κεφαλοδοκού - υποστυλώματος

Επιθυμείται η διαρροή να γίνεται στη βασική διατομή της διαγωνίου και όχι στο έλασμα σύνδεσης. Επίσης το βοηθητικό έλασμα σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει υπεραντοχή έναντι της βασικής διατομής της διαγωνίου. Επισημαίνεται ότι οι συνδέσεις σε περιοχές πλαστικοποιήσεων του πλάστιμου μέλους πρέπει να έχουν επαρκή υπεραντοχή, ώστε να περιορίζουν τη διαρροή στα πλάστιμα μέλη και πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$R_d \geq 1,20 R_{fy}$$

όπου

R_d : η οριακή αντοχή της σύνδεσης

R_{fy} : η αντοχή διαρροής του πλάστιμου μέλους

Επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$tb \geq 1,2A \Rightarrow b \geq \frac{1,2 \times 14,73\text{cm}^2}{1,2\text{cm}} = 14,73\text{cm}$$

και

$$1,2N_{pl,Rd} = \frac{1,2 \cdot 14,73 \cdot 23,5}{1,00} \leq N_{u,Rd,ελασμ} = \frac{0,90 \times (b - 2,2\text{cm}) \times 1,2\text{cm} \times 36\text{kN/cm}^2}{1,25} \Rightarrow b \geq 15,55\text{cm}$$

Επιλέγεται πλάτος ελάσματος στη θέση της πρώτης οπής ίσο με $b=160\text{mm}$

Δεν απαιτείται για το συγκεκριμένο στοιχείο η ικανοποίηση του κριτηρίου ολκιμότητας δεδομένου ότι διαθέτει υπεραντοχή έναντι του πλαστικού μέλους. Η επιδίωξη της ικανοποίησης του όμως αποτελεί καλό κανόνα σχεδιασμού και μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση περισσότερων κοχλιών μικρότερης διαμέτρου ή με έλασμα μεγαλύτερου πλάτους. Αστοχία από διαρροή αντί θραύσης μπορεί, εναλλακτικά, να επιτευχθεί σε κοχλιωτές συνδέσεις με τη χρησιμοποίηση προεντεταμένων κοχλιών.

2.4. Αντοχή συγκόλλησης

Η αντοχή της συγκόλλησης δίνεται ως εξής:

$$f_{v,wd} = \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_{w}} = \frac{36\text{kN/cm}^2}{\sqrt{3} \times 0,80 \times 1,25} = 20,78\text{kN/cm}^2$$

όπου $\beta_w = 0,80$ για S235. Επιλέγεται πάχος συγκόλλησης 3mm. Το απαιτούμενο μήκος συγκόλλησης υπολογίζεται ως εξής:

$$1,20N_{pl,Rd} \leq 4\ell a f_{v,wd} \Rightarrow \ell \geq \frac{1,20N_{pl,Rd}}{4a f_{v,wd}} \Rightarrow \ell \geq \frac{1,20 \times 346,20\text{kN}}{4 \times 0,3\text{cm} \times 20,78\text{kN/cm}^2} = 16,7\text{cm} < 20\text{cm}$$

Έλεγχος πάχους συγκόλλησης:

$$a=3\text{mm}=0,3\text{cm} < 0,70 \times t_{\min} = 0,70 \times 0,50\text{cm} = 0,35\text{cm}$$

2.5. Αντοχή κοχλιών σε διάτμηση

Επιλέγουμε κοχλίες ποιότητας 8.8. Οι κοχλίες διαμορφώνονται ως μονότμητοι με χρήση ενός κομβοελάσματος.

A: Η διατομή του κάθε κοχλία ($A=\pi d^2/4=\pi(2,0\text{cm})^2/4=3,14\text{cm}^2$)

Επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$F_{v,Rd} = n \frac{a_v A f_{ub}}{\gamma_{M2}} m = 1 \times \frac{0,60 \times 3,14\text{cm}^2 \times 80\text{kN/cm}^2}{1,25} \times m = 120,58 \times m \text{ kN} > 1,20 \times N_{pl,Rd} \\ = 1,20 \times 346,2\text{kN} = 415,4\text{kN} \\ \Rightarrow m > \frac{415,40\text{kN}}{120,58\text{kN}} = 3,44 \rightarrow m = 4$$

Με 4 M20 ποιότητας (8.8) η αντοχή των κοχλιών σε διάτμηση είναι:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,60 \times 3,14\text{cm}^2 \times 80\text{kN/cm}^2}{1,25} \times 4 = 482,30\text{kN}$$

2.6. Έλεγχος σε σύνθλιψη άντυγος

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας ισχύει:

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_o} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

$$\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_o}, \frac{p_1}{3 \cdot d_o} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

Η συνολική αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας θα είναι:

$$F_{b,Rd} = 4 \times \frac{2,50 \times \alpha \times 36\text{kN/cm}^2 \times 2,0\text{cm} \times t}{1,25} = (576\alpha t)\text{kN}$$

Πρέπει όμως να είναι καθοριστική η αστοχία σε σύνθλιψη άντυγας των οπών και όχι η αστοχία σε διάτμηση των κοχλιών. Επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$1,20N_{pl,Rd} \leq F_{b,Rd} \leq F_{v,Rd} \Rightarrow \frac{415,40\text{kN}}{576\text{kN}} \leq \alpha t \leq \frac{482,30\text{kN}}{576\text{kN}} \Rightarrow 0,721 \leq \alpha t \leq 0,837$$

Εφόσον $t=12\text{mm}$, ισχύει:

$0,601 \leq \alpha \leq 0,698$ όπου

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_o}, \frac{p_1}{3 \cdot d_o} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right)$$

Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$0,601 \leq \frac{e_1}{3 \cdot d_o} \leq 0,698 \Rightarrow 0,601 \cdot 3 \cdot 22\text{mm} \leq e_1 \leq 0,698 \cdot 3 \cdot 22\text{mm} \Rightarrow 39,67 \leq e_1 \leq 46,07\text{mm}$$

και

$$0,601 \leq \frac{p_1}{3 \cdot d_o} - \frac{1}{4} \leq 0,698 \Rightarrow \left(0,601 + \frac{1}{4}\right) \times 3 \times 22\text{mm} \leq p_1 \leq \left(0,698 + \frac{1}{4}\right) \times 3 \times 22\text{mm} \Rightarrow 56,17 \leq p_1 \leq 62,57\text{mm}$$

Ωστόσο οι ελάχιστες αποστάσεις θα είναι:

$$\min e_1 = 1,2d_o = 1,2 \times 22\text{mm} = 26,40\text{mm} < 39,67\text{mm}$$

$$\min p_1 = 2,2d_o = 2,2 \times 22\text{mm} = 48,40\text{mm} < 56,17\text{mm}$$

Μέγιστες αποστάσεις

$$\max e_1 = 40\text{mm} + 4t = 40 + 4 \times 7\text{mm} = 68,00\text{mm} > 46,07\text{mm}$$

$$\max p_1 = \min(14t; 200\text{mm}) = \min(14 \times 7\text{mm}; 200\text{mm}) = \min(98\text{mm}; 200\text{mm}) = 98\text{mm} > 62,57\text{mm}$$

Επιλέγουμε:

$$39,67\text{mm} < e_1 = 45\text{mm} < 46,07\text{mm}$$

$$56,17\text{mm} < p_1 = 60\text{mm} < 62,57\text{mm}$$

Επομένως:

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_o}, \frac{p_1}{3 \cdot d_o} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right) = \min\left\{\frac{45\text{mm}}{3 \times 22\text{mm}}, \frac{60\text{mm}}{3 \times 22\text{mm}} - \frac{1}{4}, \frac{80\text{kN/cm}^2}{36\text{kN/cm}^2}, 1\right\} =$$

$$= \min\{0,682; 0,659; 2,22; 1\} = 0,659$$

Η συνολική αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας θα είναι:

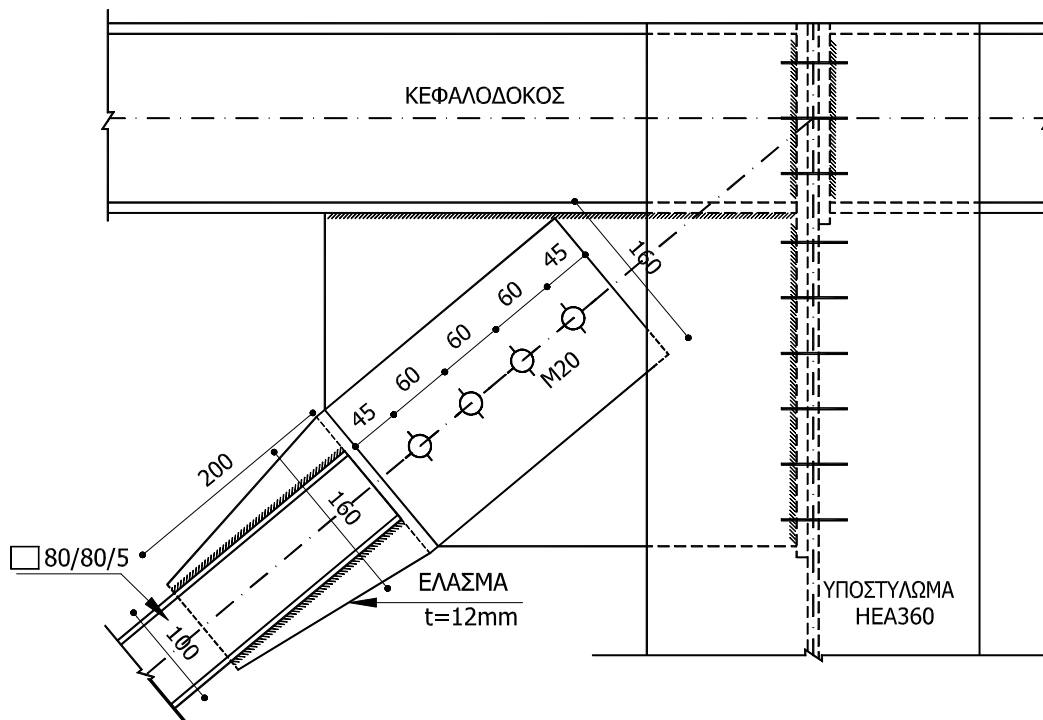
$$F_{b,Rd} = 4 \times \frac{2,50 \times 0,659 \times 36\text{kN/cm}^2 \times 2,0\text{cm} \times 1,2\text{cm}}{1,25} = 455,5\text{kN}$$

Ισχύει:

$$F_{b,Rd} = 455,50\text{kN} > 1,20 \times N_{pl,Rd} = 1,20 \times 346,2\text{kN} = 415,4\text{kN}$$

Επίσης ισχύει το κριτήριο ολκιμότητας, σύμφωνα με το οποίο καθοριστική πρέπει να είναι η αστοχία σε σύνθλιψη άντυνας των οπών και όχι η αστοχία σε διάτμηση των κοχλιών, το οποίο είναι υποχρεωτικό, εφόσον ισχύει:

$$F_{b,Rd} = 455,50\text{kN} < F_{v,Rd} = 482,3\text{kN}$$



Σχήμα 10: Τελική διαμόρφωση σύνδεσης κατακόρυφου συνδέσμου δυσκαμψίας με κόμβο κεφαλοδοκού - υποστυλώματος

3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΕΦΑΛΟΔΟΚΟΥ

Η κεφαλοδοκός πρέπει να διαστασιολογηθεί με τα μεγέθη της σεισμικής έντασης πολλαπλασιασμένα επί τον συντελεστή ικανοτικής μεγέθυνσης.

$$a_{CD} = \frac{(1,20 \cdot N_{Pdi} - N_{vdi})}{N_{Edi}} \leq q \Rightarrow a_{CD} = \frac{(1,20 \times 346,20\text{kN} - 43,73)}{293,19\text{kN}} = 1,27 < q = 3,00 \Rightarrow a_{CD} = 1,27$$

όπου:

$N_{Pdi}=346,20\text{kN}$ είναι η αντοχή σχεδιασμού της εφελκυστικής διαγωνίου,

$N_{vdi}=3,36\text{kN/m} \times 20\text{m}/2/\cos 39,8=43,73\text{kN}$

είναι η εφελκυστική δύναμη της ίδιας διαγωνίου υπό την επίδραση των μη σεισμικών δράσεων του σεισμικού συνδυασμού, στην προκειμένη περίπτωση είναι η δύναμη της διαγωνίου που οφείλεται σε δυνάμεις ευσταθοποίησης είναι μη σεισμική δύναμη.

Η εφελκυστική δύναμη της διαγωνίου μόνον υπό τη σεισμική δράση του σεισμικού συνδυασμού είναι:

$$N_{Edi}=336,92\text{kN}-43,73\text{kN}=293,19\text{kN}$$

Επομένως:

$$N_{Ed} = a_{CD} \cdot E = 1,27 \cdot 258,85\text{kN} = 328,74\text{kN}$$

3.1. Έλεγχος λυγισμού

Η επιλογή γίνεται με το κριτήριο αντοχής σε λυγισμό:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \Rightarrow A \geq \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi f_y} \Rightarrow A \geq \frac{328,74\text{kN} \times 1,00}{0,35 \times 23,5\text{kN/cm}^2} = 39,97\text{cm}^2$$

όπου

$$\gamma_{M1}=1,00$$

και υποθέσαμε αυθαίρετα ότι $\chi=0,35$, (επειδή περιμένουμε να λυγίσει κατά τον ασθενή άξονα).

Από τους πίνακες των προτύπων διατομών επιλέγουμε την διατομή HEA180.

3.2. Κατηγορία διατομής

Από τους πίνακες των προτύπων διατομών για καθαρή θλίψη η διατομή HEA 180 για ποιότητα χάλυβα S235 ανήκει στην κατηγορία 1.

3.3. Υπολογισμός αντοχής σε λυγισμό

3.3.1. Καμπύλη λυγισμού

Για πρότυπη διατομή διπλού ταυ και για χάλυβα S235, ισχύει:

$$h/b=171/180=0,95 < 1,2 \text{ και } t_f=9,5\text{mm} < 100\text{mm}$$

Επομένως η καμπύλη λυγισμού είναι η b για λυγισμό περί τον άξονα y-y και c περί τον άξονα z-z.

3.3.2. Μήκος λυγισμού

Το μήκος λυγισμού κατά τους δύο άξονες θα είναι ίσο με:

$$L_y=L_z=600\text{cm}$$

3.3.3. Λυγηρότητα

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα ασθενή άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_z}{i_z \times \lambda_1} = \frac{600\text{cm}}{4,52\text{cm} \times 93,91} = 1,41$$

όπου

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000\text{MPa}}{235\text{MPa}}} = 93,91$$

3.3.4. Μειωτικός συντελεστής χ

Για ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα z $\bar{\lambda}_z = 1,41$ ο συντελεστής χ_z , για καμπύλη λυγισμού c είναι ίσος με $\chi_z=0,35$.

3.3.5. Αντοχή θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,35 \times 45,3\text{cm}^2 \times 23,5\text{kN/cm}^2}{1,00} = 372,60\text{kN} > N_{Ed} = 328,74\text{kN}$$

επομένως ικανοποιείται ο έλεγχος αντοχής του μέλους σε λυγισμό.

Σχόλια

- Σε περίπτωση υποστέγου με 9 φατνώματα συνήθως διατάσσονται πάνω από ένας πλευρικός χιαστί σύνδεσμο ανά πλευρά.
- Όπως υπολογίστηκε με υπεραντοχή η κεφαλοδοκός, το ίδιο πρέπει να γίνει και με το υποστύλωμα, λαμβάνοντας υπόψη την αξονική σεισμική δύναμη που προκύπτει από τη λειτουργία του φατνώματος δυσκαμψίας αλλά και τα εντατικά μεγέθη, ροπές και αξονικές δυνάμεις που προκύπτουν από τα μη σεισμικά φορτία του σεισμικού συνδυασμού. Ωστόσο, για το υποστύλωμα συνήθως κρίσιμοι είναι οι μη σεισμικοί υπολογισμοί.
- Επίσης απαιτείται υπολογισμός με υπεραντοχή της σύνδεσης μετωπικής πλάκας κεφαλοδοκού / διαγωνίου επί του υποστυλώματος.