

Melléklet az Acélszerkezetek folyóirat (MAGÉSZ, Magyar Acélszerkezeti Szövetség) 2022/1. számában megjelent

Öszvéroszlopok tervezése tűzterherre című cikk

5.1. példájához

Részlegesen körbebetonozott acélszelvényű öszvéroszlop

H-Székesfehérvár, 2022.01.23.

1. Bevezetés

A folyóiratban terjedelmi okok miatt nem volt lehetőség ezen melléklet részletes bemutatására, ott az alapelvek, és az eredmények lettek összefoglalva, amelyek összehasonlításra kerültek az MSZ EN 1994-1-2 szabvány egyszerűsített módszerének számítási eredményeivel és a normál hőmérsékleti számítás végeredményével.

2. Statikai modell, hatások

Az oszlop mindkét irányban egyik végén csuklós megtámasztású, másik végén befogott.

Szerkezeti magasság: $L = 3,4$ m

Kihajlási hosszak: $L_{o,y} = 0,7 L = 2,38$ m

$L_{o,z} = 0,7 L = 2,38$ m

Nyomóerő, parciális és kombinációs tényezők:

az állandó terhekből $N_G = 2000$ kN $\gamma_G = 1,35$

esetleges terhekből $N_Q = 900$ kN, $\gamma_Q = 1,5$ $\psi_1 = 0,5$

A külpontosságok: $e_y = 50$ mm, $e_z = 0$ mm

A nyomóerő teherbírási határállapotban, normál hőmérsékleten:

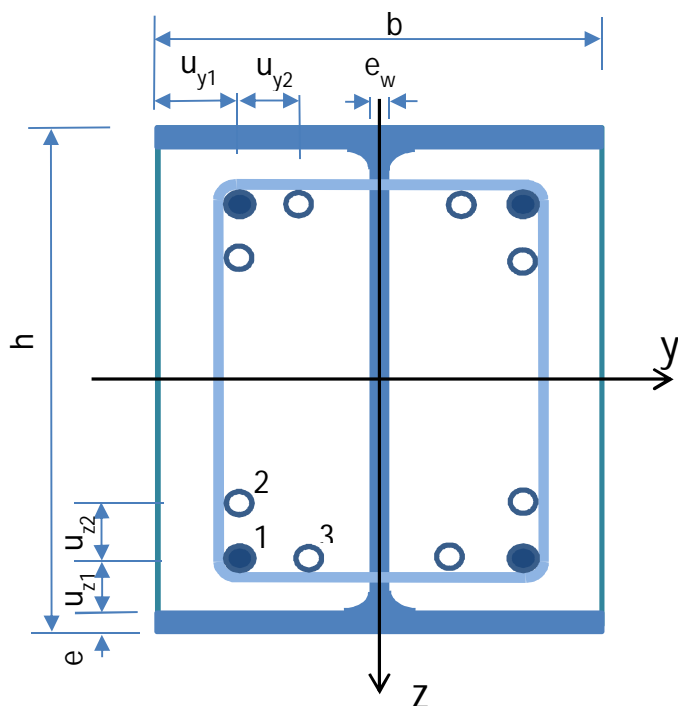
$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_G + \gamma_Q \cdot N_Q = 1,35 \cdot 2000 + 1,5 \cdot 900 = 4050 \text{ kN}$$

A nyomóerő magas hőmérsékleten, tűz esetén:

$$N_{fi,Ed} = N_G + \psi_1 \cdot N_Q = 2000 + 0,5 \cdot 900 = 2450 \text{ kN}$$

Az előírt tűzállósági követelmény: R60

3. Az öszvér oszlop keresztmetszeti méretei



Az acélszelvény: **HEB 320**

$h = 320$ mm

$b = 300$ mm

$e_f = 20,5 \cdot \text{mm}$

$e_w = 11,5 \cdot \text{mm}$

a gerincnyak ívének sugara:

$R_{nyak} = 27 \cdot \text{mm}$

hosszirányú betonacél:

$\phi_{s1} = 28 \cdot \text{mm}$

$\phi_{s2} = 0 \cdot \text{mm}$

$\phi_{s3} = 0 \cdot \text{mm}$

$u_{y1} = 60 \cdot \text{mm}$ $u_{y2} = 40 \cdot \text{mm}$

$u_{z1} = 50 \cdot \text{mm}$ $u_{z2} = 40 \cdot \text{mm}$

4. Anyagjellemzők:

Az anyagok szilárdsági osztálya, határfeszültsége normál hőmérsékleten, parciális tényezője normál hőmérsékleten és tűz esetén, és rugalmassági modulusa normál hőmérsékleten:

Az acélszelvény anyaga S 355

$$f_{ya} = 355 \cdot MPa \quad \gamma_{M,a} = \gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1 \quad \gamma_{M,fi,a} = 1 \quad E_a = 210000 \cdot MPa$$

A betonacél anyaga B 500

$$f_{ys} = 500 \cdot MPa \quad \gamma_{M,s} = 1,15 \quad \gamma_{M,fi,s} = 1 \quad E_s = 210000 \cdot MPa$$

A beton anyaga C40/50

$$f_{ck} = 40 \cdot MPa \quad \gamma_{M,c} = 1,5 \quad \gamma_{M,fi,c} = 1 \quad E_{cm} = 35000 \cdot MPa$$

Az anyagok mechanikai jellemzői tűz esetén a hőmérséklet függvényében változnak. E függvényeket az MSZ EN 1994-1-2 szabvány tartalmazza. Itt nem térünk ki erre. Egyszerűsített számítás esetén a szabvány megengedi, hogy bizonyos hőmérséklet-függő mechanikai jellemzőket konstans átlagértékkel vegyünk figyelembe (pl. a hővezetési tényezőt, vagy a fajhőt). E lehetőséggel nem élünk. A MathCad-ben a mechanikai jellemzőket függvényként definiáltuk. A ciklusok egyszerűbb szervezhetősége érdekében a különböző anyagok függvényeit egy kétváltozós függvénybe integráljuk, így a mechanikai jellemzők a hőmérséklet és az anyagfajta függvényei lesznek.

Pl. a hővezetési tényező: $\lambda_M(\theta, M) := \begin{cases} \lambda_a(\theta) & \text{if } M = "a" \\ \lambda_c(\theta) & \text{if } M = "c" \\ \lambda_s(\theta) & \text{if } M = "s" \\ 0,04 \frac{W}{m \cdot K} & \text{if } M = "0" \end{cases}$

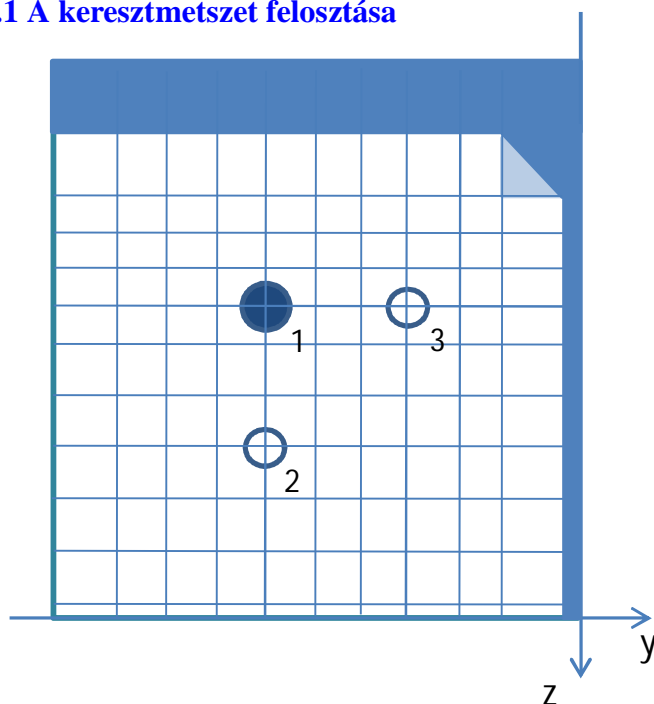
Az anyagjelölések:
 "a" – acél
 "c" – beton
 "s" – betonacél
 "0" – nincs anyag

A beton hővezetési tényezőjének függvényét az MSZ EN 1992-1-2:2013 3.3.3. és MSZ EN 1994-1-2:2013 3.3.2. (8) szerint két határgörbe között kell felvenni. Mindkét szabvány NA5. szerint Magyarországon az alsó határgörbét kell alkalmazni. Az alkalmazandó hővezetési függvény az alsó határgörbétől az előírt tartomány af hányadában van. Tehát $af = 0$ az alsó határgörbét, $af = 1$ a felső határgörbét jelenti.

$$af = 0$$

5. A geometriai jellemzők számítása

5.1 A keresztmetszet felosztása



A kétszeres szimmetria miatt csak keresztmetszet negyedrésszével dolgozunk.

A gerincnyak köríves kiszélesedését területazonos háromszöggel helyettesítjük.

A felosztás módja:

- a felső sáv az acélszelvény öve
- a kibetonozás külső sarokpontjától indulva mindkét irányban az első sáv szélessége a gerincnyak helyettesítő háromszögének befogója
- utána az 1. betonacél tengelyéig 3 db, egyenlő szélességekkel
- a következő betonacél tengelyéig 3 db, az első sáv szélessége az előzőekkel megegyezik, a maradék szélességet felezzük.
- a belső betonacél utáni sávok szélessége 15 mm
- az utolsó sáv szélesség a gerincvastagság fele, az utolsó előtti a gerincnyak helyettesítő háromszögének befogója, az ez előtti a 15 mm-es osztás maradéka

Az acélszelvény gerincnyaknál levő köríves kiszélesítés figyelembevétele:

- a hőeloszlás számításánál a helyettesítő háromszög befoglaló négyzetelemének anyaga acél (ez a biztonság javára való közelítés, mivel az acél hővezetése gyorsabb)
- a teherbírás számításánál a befoglaló négyzetelem kiegészítő háromszögét az acélszelvényből kivonjuk, a betonhoz hozzáadjuk

A betonmagok befoglaló méretei:

$$b_c := \frac{b - e_w}{2} = 144.25 \text{ mm} \quad h_c := h - 2 \cdot e_f = 279 \text{ mm}$$

A belső betonacélok távolsága az acélszelvény gerincétől, illetve az y tengelytől:

$$u_{y3} := b_c - u_{y1} - u_{y2} = 44.25 \text{ mm} \quad u_{z3} := \frac{h_c}{2} - u_{z1} - u_{z2} = 49.5 \text{ mm}$$

A gerincnyak kiszélesedésének területe: $A_{\text{nyak}} := \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot R_{\text{nyak}}^2 = 156 \text{ mm}^2$

A helyettesítő háromszög oldalhossza: $a_R := \sqrt{2 \cdot A_{\text{nyak}}} = 17.7 \text{ mm}$

A belső betonacél utáni osztásköz: $\Delta_{yz} := 15 \text{ mm}$

Az elemek száma a két irányban:

$$n_y := \text{ceil}\left(\frac{u_{y3} - a_R}{\Delta_{yz}} - 10^{-5}\right) + 9 = 11 \quad n_z := \text{ceil}\left(\frac{u_{z3}}{\Delta_{yz}} - 10^{-5}\right) + 8 = 12$$

Az elemek oldalhosszai:

$$\Delta y := \left| \begin{array}{l} \Delta y_0 \leftarrow a_R \\ \text{for } i \in 1..4 \\ \Delta y_i \leftarrow \frac{u_{y1} - a_R}{3} \\ \text{for } i \in 5..6 \\ \Delta y_i \leftarrow \frac{u_{y2} - \Delta y_4}{2} \\ \text{for } i \in 7..n_y - 4 \\ \Delta y_i \leftarrow \Delta_{yz} \\ \Delta y_{n_y-3} \leftarrow b_c - a_R - \sum_{j=0}^{n_y-4} \Delta y_j \\ \Delta y_{n_y-2} \leftarrow a_R \\ \Delta y_{n_y-1} \leftarrow \frac{e_w}{2} \end{array} \right. \quad \Delta z := \left| \begin{array}{l} \Delta z_0 \leftarrow e_f \\ \Delta z_1 \leftarrow a_R \\ \text{for } i \in 2..5 \\ \Delta z_i \leftarrow \frac{u_{z1} - a_R}{3} \\ \text{for } i \in 6..7 \\ \Delta z_i \leftarrow \frac{u_{z2} - \Delta z_5}{2} \\ \text{for } i \in 8..n_z - 2 \\ \Delta z_i \leftarrow \Delta_{yz} \\ \Delta z_{n_z-1} \leftarrow \frac{h}{2} - \left(\sum_{i=0}^{n_z-2} \Delta z_i \right) \end{array} \right.$$

Az anyagmátrix (az elemek anyagát azok kezdőbetűivel jelöljük):

$$M := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_z - 1 \\ \quad \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ \quad \quad M_{i,j} \leftarrow "c" \\ \text{for } i \in 0..n_z - 1 \\ \quad M_{i,n_y-1} \leftarrow "a" \\ \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ \quad M_{0,j} \leftarrow "a" \\ M_{1,n_y-2} \leftarrow "a" \end{cases} \quad M = \begin{pmatrix} "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \\ "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "c" & "a" \end{pmatrix}$$

5.2 Az elemek keresztmetszeti területe

$$Ar := \begin{cases} \text{for } i \in 0..n_y - 1 \\ \quad \text{for } j \in 0..n_z - 1 \\ \quad \quad Ar_{j,i} \leftarrow \Delta y_i \cdot \Delta z_j \end{cases} \quad \Delta y^T = (17.7 \ 14.1 \ 14.1 \ 14.1 \ 14.1 \ 12.9 \ 12.9 \ 15.0 \ 11.6 \ 17.7 \ 5.8) \cdot \text{mm}$$

$$\Delta z = \begin{pmatrix} 20.5 \\ 17.7 \\ 10.8 \\ 10.8 \\ 10.8 \\ 10.8 \\ 14.6 \\ 14.6 \\ 15.0 \\ 15.0 \\ 15.0 \\ 4.5 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad Ar = \begin{pmatrix} 363 & 289 & 289 & 289 & 289 & 265 & 265 & 308 & 237 & 363 & 118 \\ 313 & 249 & 249 & 249 & 249 & 229 & 229 & 265 & 205 & 313 & 102 \\ 191 & 152 & 152 & 152 & 152 & 139 & 139 & 162 & 125 & 191 & 62 \\ 191 & 152 & 152 & 152 & 152 & 139 & 139 & 162 & 125 & 191 & 62 \\ 191 & 152 & 152 & 152 & 152 & 139 & 139 & 162 & 125 & 191 & 62 \\ 191 & 152 & 152 & 152 & 152 & 139 & 139 & 162 & 125 & 191 & 62 \\ 259 & 206 & 206 & 206 & 206 & 189 & 189 & 219 & 169 & 259 & 84 \\ 259 & 206 & 206 & 206 & 206 & 189 & 189 & 219 & 169 & 259 & 84 \\ 265 & 212 & 212 & 212 & 212 & 194 & 194 & 225 & 173 & 265 & 86 \\ 265 & 212 & 212 & 212 & 212 & 194 & 194 & 225 & 173 & 265 & 86 \\ 265 & 212 & 212 & 212 & 212 & 194 & 194 & 225 & 173 & 265 & 86 \\ 80 & 63 & 63 & 63 & 63 & 58 & 58 & 67 & 52 & 80 & 26 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}^2$$

Az acélszelvény: $A_a := 2 \cdot b \cdot e_f + (h - 2 \cdot e_f) \cdot e_w + 4 \cdot A_{nyak} = 16134 \text{ mm}^2$

A beton: $A_c := A_{km} - A_a = 79866 \text{ mm}^2$

A betonacélok: $A_{s1} := \phi_{s1}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 616 \text{ mm}^2$ $A_{s2} := \phi_{s2}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0 \text{ mm}^2$ $A_{s3} := \phi_{s3}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0 \text{ mm}^2$

$A_s := 4 \cdot (A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}) = 2463 \text{ mm}^2$

A betonacél-hányad: $\mu_s := \frac{A_s}{A_c} = 3.084\%$

5.2 Az elemek inerciája

Az elemek középpontjainak távolsága a tengelyektől:

$$ym := \begin{cases} ym_0 \leftarrow \frac{b - \Delta y_0}{2} \\ \text{for } i \in 1..n_y - 1 \\ \quad ym_i \leftarrow ym_{i-1} - \frac{\Delta y_{i-1} + \Delta y_i}{2} \end{cases} \quad zm := \begin{cases} zm_0 \leftarrow \frac{h - \Delta z_0}{2} \\ \text{for } i \in 1..n_z - 1 \\ \quad zm_i \leftarrow zm_{i-1} - \frac{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}{2} \end{cases}$$

Az elemek inerciája a két tengelyre:

$$I_y := \text{for } i \in 0..n_y - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_z - 1$$

$$I_{y,j,i} \leftarrow \frac{1}{12} \cdot \Delta y_i \cdot (\Delta z_j)^3 + A_{r,j,i} \cdot (z_{m,j})^2$$

$$I_z := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$I_{z,i,j} \leftarrow \frac{1}{12} \cdot \Delta z_i \cdot (\Delta y_j)^3 + A_{r,i,j} \cdot (y_{m,j})^2$$

$$z_m = \begin{pmatrix} 150 \\ 131 \\ 116 \\ 106 \\ 95 \\ 84 \\ 71 \\ 57 \\ 42 \\ 27 \\ 12 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad I_y = \begin{pmatrix} 8.14 & 6.49 & 6.49 & 6.49 & 6.49 & 5.96 & 5.96 & 6.91 & 5.32 & 8.14 & 2.65 \\ 5.35 & 4.27 & 4.27 & 4.27 & 4.27 & 3.92 & 3.92 & 4.54 & 3.50 & 5.35 & 1.74 \\ 2.58 & 2.06 & 2.06 & 2.06 & 2.06 & 1.89 & 1.89 & 2.19 & 1.69 & 2.58 & 0.84 \\ 2.13 & 1.70 & 1.70 & 1.70 & 1.70 & 1.56 & 1.56 & 1.81 & 1.39 & 2.13 & 0.69 \\ 1.72 & 1.37 & 1.37 & 1.37 & 1.37 & 1.26 & 1.26 & 1.46 & 1.12 & 1.72 & 0.56 \\ 1.35 & 1.08 & 1.08 & 1.08 & 1.08 & 0.99 & 0.99 & 1.14 & 0.88 & 1.35 & 0.44 \\ 1.32 & 1.06 & 1.06 & 1.06 & 1.06 & 0.97 & 0.97 & 1.12 & 0.86 & 1.32 & 0.43 \\ 0.84 & 0.67 & 0.67 & 0.67 & 0.67 & 0.61 & 0.61 & 0.71 & 0.55 & 0.84 & 0.27 \\ 0.47 & 0.38 & 0.38 & 0.38 & 0.38 & 0.35 & 0.35 & 0.40 & 0.31 & 0.47 & 0.15 \\ 0.20 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.13 & 0.20 & 0.06 \\ 0.04 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.04 & 0.03 & 0.04 & 0.01 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix} \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$y_m^T = (141 \quad 125 \quad 111 \quad 97 \quad 83 \quad 69 \quad 56 \quad 43 \quad 29 \quad 15 \quad 3) \cdot \text{mm}$$

$$I_z = \begin{pmatrix} 7.23 & 4.54 & 3.58 & 2.73 & 1.99 & 1.28 & 0.85 & 0.56 & 0.20 & 0.09 & 0.00 \\ 6.24 & 3.92 & 3.09 & 2.35 & 1.72 & 1.11 & 0.73 & 0.48 & 0.18 & 0.07 & 0.00 \\ 3.80 & 2.39 & 1.88 & 1.43 & 1.05 & 0.67 & 0.45 & 0.29 & 0.11 & 0.05 & 0.00 \\ 3.80 & 2.39 & 1.88 & 1.43 & 1.05 & 0.67 & 0.45 & 0.29 & 0.11 & 0.05 & 0.00 \\ 3.80 & 2.39 & 1.88 & 1.43 & 1.05 & 0.67 & 0.45 & 0.29 & 0.11 & 0.05 & 0.00 \\ 3.80 & 2.39 & 1.88 & 1.43 & 1.05 & 0.67 & 0.45 & 0.29 & 0.11 & 0.05 & 0.00 \\ 5.16 & 3.24 & 2.55 & 1.94 & 1.42 & 0.91 & 0.61 & 0.40 & 0.15 & 0.06 & 0.00 \\ 5.16 & 3.24 & 2.55 & 1.94 & 1.42 & 0.91 & 0.61 & 0.40 & 0.15 & 0.06 & 0.00 \\ 5.29 & 3.32 & 2.62 & 2.00 & 1.46 & 0.94 & 0.62 & 0.41 & 0.15 & 0.06 & 0.00 \\ 5.29 & 3.32 & 2.62 & 2.00 & 1.46 & 0.94 & 0.62 & 0.41 & 0.15 & 0.06 & 0.00 \\ 5.29 & 3.32 & 2.62 & 2.00 & 1.46 & 0.94 & 0.62 & 0.41 & 0.15 & 0.06 & 0.00 \\ 1.59 & 1.00 & 0.79 & 0.60 & 0.44 & 0.28 & 0.19 & 0.12 & 0.04 & 0.02 & 0.00 \end{pmatrix} \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

A gerincnyak kiszélesedése (az ábrán a világoskék háromszög):

$$z_{m\text{nyak}} := \frac{1}{2} \cdot h - e_f - \frac{2}{3} \cdot a_R = 127.7 \text{ mm}$$

$$y_{m\text{nyak}} := \frac{1}{2} \cdot e_w + \frac{2}{3} \cdot a_R = 17.5 \text{ mm}$$

$$I_{y\text{nyak}} := \frac{1}{36} \cdot a_R^4 + A_{\text{nyak}} \cdot z_{m\text{nyak}}^2 = 255.42 \text{ cm}^4$$

$$I_{z\text{nyak}} := \frac{1}{36} \cdot a_R^4 + A_{\text{nyak}} \cdot y_{m\text{nyak}}^2 = 5.09 \text{ cm}^4$$

A betonacélok:

$$I_{s,y,1} := \left(\frac{\phi_{s1}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s1} \cdot \left(\frac{h_c}{2} - u_{z1} \right)^2 = 496.25 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,z,1} := \left(\frac{\phi_{s1}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s1} \cdot \left(\frac{b}{2} - u_{y1} \right)^2 = 501.78 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,y,2} := \left(\frac{\phi_{s2}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s2} \cdot \left(\frac{h_c}{2} - u_{z1} - u_{z2} \right)^2 = 0.00 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,z,2} := \left(\frac{\phi_{s2}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s2} \cdot \left(\frac{b}{2} - u_{y1} \right)^2 = 0.00 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,y,3} := \left(\frac{\phi_{s3}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s3} \cdot \left(\frac{h_c}{2} - u_{z1} \right)^2 = 0.00 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,z,3} := \left(\frac{\phi_{s3}}{2} \right)^4 \cdot \frac{\pi}{4} + A_{s3} \cdot \left(\frac{b}{2} - u_{y1} - u_{y2} \right)^2 = 0.00 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,y,1} + I_{s,y,2} + I_{s,y,3} = 496.25 \text{ cm}^4$$

$$I_{s,z,1} + I_{s,z,2} + I_{s,z,3} = 501.78 \text{ cm}^4$$

6. A keresztmetszet hőeloszlása

Az elemek hő mérsékletei a középpontban vannak értelmezve.

Egy idő lépcsőben a felszíni elemek fölvesznek egy hőmennyiséget, ezáltal a hőmérsékletük megemelkedik. A konvekció és a sugárzás által fölvetett hőt (MSZ EN 1991-1-2:2005 3.1.) az első felületi réteg tárolja.

Ezt a hőmennyiséget az időlépcsőn belül hagyjuk szétterjedni az összes rétegen úgy, hogy a belső ciklusban egy belső időlépcsőt használunk, melynek hossza az időlépcső osztva a rétegek számával (a két irányú felosztásszám közül a nagyobbik). A lépések a hővezetés és az energia-megmaradás törvényét követik, vagyis a tárolt hőmennyiség egyenlő a belépő és a kilépő hőmennyiség különbségével. A szimmetriatengelyeken keresztül nincs hőáramlás (ha lenne, az sértené a szimmetriát), ezért a tengelyekkel érintkező elemek nem adnak le hőt.

A felületi hőmérsékletet lineáris extrapolációval számoljuk a felületi elem és a mögötte levő elem hő mérsékletéből.

Az elemek kezdeti hő mérséklete: $\theta := \text{for } i \in 0..n_y - 1$
 $\text{for } j \in 0..n_z - 1$
 $\theta_{j,i} \leftarrow 20^\circ\text{C}$

A hőfeljődés számítási időlépcső je $\Delta t := 5\text{s}$, a belső időciklus $nr := \max(n_z, n_y) = 12$

$\theta := \text{for } n \in 1.. \frac{t_{fi}}{\Delta t}$

$\theta_{z, \text{fel}_i} \leftarrow \frac{(2\Delta y_0 + \Delta y_1)\theta_{i,0} - \Delta y_0 \theta_{i,1}}{\Delta y_0 + \Delta y_1}$	felületi hő mérséklet a magasság mentén
$\theta_{y, \text{fel}_j} \leftarrow \frac{(2\Delta z_0 + \Delta z_1)\theta_{0,j} - \Delta z_0 \theta_{1,j}}{\Delta z_0 + \Delta z_1}$	felületi hő mérséklet a szélesség mentén
$\theta_{i,0} \leftarrow \theta_{i,0} + \frac{1}{\rho M(\theta_{i,0}, M_{i,0}) \cdot c_M(\theta_{i,0}, M_{i,0}) \cdot \Delta y_0} \cdot \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left[(\theta_g(n \cdot \Delta t) + 273)^4 - (\theta_{z, \text{fel}_i} + 273)^4 \right] \cdot K^3 \cdot \Delta t$	hőfelvétel y - sugárzás
$\theta_{i,0} \leftarrow \theta_{i,0} + \frac{1}{\rho M(\theta_{i,0}, M_{i,0}) \cdot c_M(\theta_{i,0}, M_{i,0}) \cdot \Delta y_0} \cdot \alpha_c \cdot (\theta_g(n \cdot \Delta t) - \theta_{z, \text{fel}_i}) \cdot \Delta t$	hőfelvétel y - konvekció
$\theta_{0,j} \leftarrow \theta_{0,j} + \frac{1}{\rho M(\theta_{0,j}, M_{0,j}) \cdot c_M(\theta_{0,j}, M_{0,j}) \cdot \Delta z_0} \cdot \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left[(\theta_g(n \cdot \Delta t) + 273)^4 - (\theta_{y, \text{fel}_j} + 273)^4 \right] \cdot K^3 \cdot \Delta t$	hőfelvétel z - sugárzás
$\theta_{0,j} \leftarrow \theta_{0,j} + \frac{1}{\rho M(\theta_{0,j}, M_{0,j}) \cdot c_M(\theta_{0,j}, M_{0,j}) \cdot \Delta z_0} \cdot \alpha_c \cdot (\theta_g(n \cdot \Delta t) - \theta_{y, \text{fel}_j}) \cdot \Delta t$	hőfelvétel z - konvekció
$\theta_{i,j} \leftarrow \theta_{i,j} + \frac{1}{\rho M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot c_M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot \Delta y_j} \cdot \frac{\theta_{i,j-1} - \theta_{i,j}}{\frac{\Delta y_{j-1}}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j-1}, M_{i,j-1})} + \frac{\Delta y_j}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j}, M_{i,j})}} \cdot \frac{\Delta t}{nr} \text{ if } j > 0$	hővezetés - hőfelvétel y
$\theta_{i,j} \leftarrow \theta_{i,j} + \frac{1}{\rho M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot c_M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot \Delta z_i} \cdot \frac{\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}}{\frac{\Delta z_{i-1}}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i-1,j}, M_{i-1,j})} + \frac{\Delta z_i}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j}, M_{i,j})}} \cdot \frac{\Delta t}{nr} \text{ if } i > 0$	hővezetés - hőfelvétel z
$\theta_{i,j} \leftarrow \theta_{i,j} - \frac{1}{\rho M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot c_M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot \Delta y_j} \cdot \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i,j+1}}{\frac{\Delta y_j}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j}, M_{i,j})} + \frac{\Delta y_{j+1}}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j+1}, M_{i,j+1})}} \cdot \frac{\Delta t}{nr} \text{ if } j < n_y - 1$	hővezetés - hőleadás y
$\theta_{i,j} \leftarrow \theta_{i,j} - \frac{1}{\rho M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot c_M(\theta_{i,j}, M_{i,j}) \cdot \Delta z_i} \cdot \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i+1,j}}{\frac{\Delta z_i}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i,j}, M_{i,j})} + \frac{\Delta z_{i+1}}{2 \cdot \lambda_M(\theta_{i+1,j}, M_{i+1,j})}} \cdot \frac{\Delta t}{nr} \text{ if } i < n_z - 1$	hővezetés - hőleadás z

A gerincnyak kiszélesedésének hő mérséklete: $\theta_{nyak} := \theta_{1, n_y - 2} = 683^\circ\text{C}$

$$\theta = \begin{pmatrix} 855 & 834 & 814 & 795 & 778 & 764 & 751 & 739 & 731 & 718 & 715 \\ 856 & 746 & 687 & 648 & 622 & 608 & 604 & 612 & 646 & 683 & 670 \\ 821 & 654 & 557 & 494 & 456 & 439 & 437 & 456 & 501 & 592 & 593 \\ 800 & 603 & 488 & 414 & 369 & 348 & 347 & 367 & 413 & 491 & 541 \\ 784 & 565 & 438 & 355 & 305 & 281 & 279 & 300 & 346 & 425 & 493 \\ 772 & 538 & 402 & 313 & 257 & 230 & 226 & 248 & 296 & 376 & 451 \\ 762 & 515 & 372 & 277 & 215 & 182 & 177 & 200 & 249 & 332 & 408 \\ 755 & 499 & 351 & 251 & 183 & 148 & 141 & 161 & 212 & 294 & 369 \\ 751 & 490 & 339 & 236 & 167 & 132 & 124 & 140 & 187 & 267 & 339 \\ 749 & 485 & 332 & 229 & 159 & 125 & 116 & 129 & 171 & 248 & 318 \\ 748 & 483 & 330 & 226 & 156 & 122 & 113 & 124 & 164 & 239 & 307 \\ 748 & 483 & 329 & 226 & 155 & 122 & 113 & 123 & 163 & 237 & 305 \end{pmatrix} \cdot ^\circ\text{C}$$

A betonacélok hőmérséklete:

$$\theta_{s,1} := \frac{\theta_{4,3} + \theta_{4,4} + \theta_{5,3} + \theta_{5,4}}{4} = 307 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{s,2} := \frac{\Delta z_8 \cdot \Delta y_4 \cdot \theta_{7,3} + \Delta z_8 \cdot \Delta y_3 \cdot \theta_{7,4} + \Delta z_7 \cdot \Delta y_4 \cdot \theta_{8,3} + \Delta z_7 \cdot \Delta y_3 \cdot \theta_{8,4}}{(\Delta y_3 + \Delta y_4) \cdot (\Delta z_7 + \Delta z_8)} = 209 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{s,3} := \frac{\Delta z_5 \cdot \Delta y_7 \cdot \theta_{4,6} + \Delta z_5 \cdot \Delta y_6 \cdot \theta_{4,7} + \Delta z_4 \cdot \Delta y_7 \cdot \theta_{5,6} + \Delta z_4 \cdot \Delta y_6 \cdot \theta_{5,7}}{(\Delta y_6 + \Delta y_7) \cdot (\Delta z_4 + \Delta z_5)} = 263 \cdot ^\circ\text{C}$$

7. A teherbírás számítása az MSZ-EN 1994-1-2, 4.3.5.1. szerint

7.1. A határfeszültségek

Acélszelvény és beton:

$$f_\theta := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$f_{\theta_{i,j}} \leftarrow f_{M,\theta}(\theta_{i,j}, M_{i,j})$$

$$f_\theta =$$

29.32	33.02	36.55	41.08	48.37	54.60	59.95	65.06	68.33	73.81	75.37
4.44	9.21	12.78	15.13	16.68	17.53	17.79	17.29	15.26	96.49	107.60
5.40	14.77	20.57	24.33	26.62	27.69	27.75	26.66	23.91	18.49	174.13
6.01	17.84	24.72	29.17	31.24	32.07	32.11	31.30	29.20	24.55	232.08
6.98	20.10	27.72	31.78	33.81	34.76	34.83	34.00	32.14	28.50	282.26
7.68	21.74	29.89	33.49	35.72	36.81	36.94	36.09	34.18	30.94	315.16
8.27	23.10	31.13	34.94	37.39	38.35	38.46	38.00	36.02	32.72	348.58
8.68	24.05	31.98	35.97	38.33	39.04	39.17	38.77	37.51	34.24	355.00
8.92	24.59	32.46	36.55	38.67	39.37	39.52	39.20	38.26	35.33	355.00
9.04	24.87	32.70	36.84	38.82	39.51	39.68	39.42	38.57	36.06	355.00
9.09	25.00	32.81	36.96	38.88	39.56	39.74	39.52	38.73	36.45	355.00
9.10	25.01	32.83	36.98	38.89	39.57	39.75	39.53	38.75	36.51	355.00

$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

A beton határfeszültsége a gerincnyak kiszélesedésénél: $f_{\theta,\text{nyak}} := f_{c,\theta}(\theta_{\text{nyak}}) = 13.05 \text{ MPa}$

A betonacélok határfeszültsége:

$$f_{s,\theta,1} := f_{ys,\theta}(\theta_{s,1}) = 497.8 \text{ MPa}$$

$$f_{s,\theta,2} := f_{ys,\theta}(\theta_{s,2}) = 500.0 \text{ MPa}$$

$$f_{s,\theta,3} := f_{ys,\theta}(\theta_{s,3}) = 500.0 \text{ MPa}$$

A beton határfeszültsége a betonacélok helyén:

$$f_{\theta,1} := f_{c,\theta}(\theta_{s,1}) = 33.70 \text{ MPa}$$

$$f_{\theta,2} := f_{c,\theta}(\theta_{s,2}) = 37.63 \text{ MPa}$$

$$f_{\theta,3} := f_{c,\theta}(\theta_{s,3}) = 35.50 \text{ MPa}$$

7.2. Az acél és a betonacél rugalmassági modulusa, a betonelemek szelő modulusa:

$$E_{\theta} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$E_{\theta,i,j} \leftarrow E_{M,\theta}(\theta_{i,j}, M_{i,j})$$

$E_{\theta} =$	16311	17295	18233	19300	20737	21965	23021	24028	24674	25755	26062	$\cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
	177	369	511	605	667	701	712	692	611	33885	38815	
	216	591	993	1652	2078	2322	2338	2086	1578	765	69131	
	240	714	1716	2728	3445	3794	3813	3469	2737	1688	101197	
	279	935	2330	3670	4733	5175	5209	4859	3829	2533	127441	
	307	1158	2963	4537	5621	6191	6265	5806	4930	3329	136288	
	331	1401	3403	5255	6530	7327	7462	6913	5772	4112	145274	
	347	1608	3755	5746	7298	8264	8479	7877	6599	4954	153549	
	357	1695	3979	6047	7735	8795	9071	8525	7217	5436	159838	
	362	1742	4102	6205	7949	9039	9354	8888	7606	5791	164173	
	364	1764	4159	6275	8039	9137	9470	9060	7814	5995	166565	
	364	1767	4167	6285	8051	9150	9487	9085	7845	6026	166896	

A kiszélesedő gerincnyak rugalmassági modulusa:

$$E_{\theta,a.nyak} := E_{a,\theta}(\theta_{nyak}) = 33885 \text{ MPa}$$

A betonacélok rugalmassági modulusa:

$$E_{fi.s.1} := E_{s,\theta}(\theta_{s.1}) = 148690 \text{ MPa}$$

$$E_{fi.s.2} := E_{s,\theta}(\theta_{s.2}) = 179749 \text{ MPa}$$

$$E_{fi.s.3} := E_{s,\theta}(\theta_{s.3}) = 163000 \text{ MPa}$$

A beton szelő modulusa a gerincnyak kiszélesedésénél:

$$E_{c.sec.nyak} := \frac{f_{\theta.nyak}}{\varepsilon_{cu}(\theta_{nyak})} = 522 \text{ MPa}$$

A beton szelő modulusa a betonacélok helyén:

$$E_{c.sec.1} := \frac{f_{\theta.1}}{\varepsilon_{cu}(\theta_{s.1})} = 4665 \text{ MPa}$$

$$E_{c.sec.2} := \frac{f_{\theta.2}}{\varepsilon_{cu}(\theta_{s.2})} = 6671 \text{ MPa}$$

$$E_{c.sec.3} := \frac{f_{\theta.3}}{\varepsilon_{cu}(\theta_{s.3})} = 5514 \text{ MPa}$$

7.3. A képlékeny nyomási ellenállás

A betonacélok nyomási ellenállása:

$$N_{fi.pl.R.s.1} := f_{s,\theta.1} \cdot A_{s1} = 306 \text{ kN}$$

$$N_{fi.pl.R.s.2} := f_{s,\theta.2} \cdot A_{s2} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{fi.pl.R.s.3} := f_{s,\theta.3} \cdot A_{s3} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{fi.pl.R.s} := 4 \cdot (N_{fi.pl.R.s.1} + N_{fi.pl.R.s.2} + N_{fi.pl.R.s.3}) = 1226 \text{ kN}$$

A kiszélesedő gerincnyak nyomási ellenállása:

$$N_{\theta.pl.R.a.nyak} := A_{nyak} \cdot f_{ya,\theta}(\theta_{nyak}) = 15 \text{ kN}$$

A beton nyomási ellenállása a betonacélok helyén:

$$N_{\theta.pl.R.c.1} := A_{s1} \cdot f_{\theta.1} = 21 \text{ kN}$$

$$N_{\theta.pl.R.c.2} := A_{s2} \cdot f_{\theta.2} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{\theta.pl.R.c.3} := A_{s3} \cdot f_{\theta.3} = 0 \text{ kN}$$

A beton nyomási ellenállása a kiszélesedő gerincnyaknál:

$$N_{\theta.pl.R.c.nyak} := A_{nyak} \cdot f_{\theta.nyak} = 2 \text{ kN}$$

Az acél és a beton elemek nyomási ellenállása:

$$N_{\theta,pl.R} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$N_{\theta,pl.R}_{i,j} \leftarrow A_{r_{i,j}} \cdot f_{\theta_{i,j}}$$

	10.6	9.5	10.6	11.9	14.0	14.5	15.9	20.0	16.2	26.8	8.9
	1.4	2.3	3.2	3.8	4.2	4.0	4.1	4.6	3.1	30.2	10.9
	1.0	2.2	3.1	3.7	4.0	3.9	3.9	4.3	3.0	3.5	10.8
	1.1	2.7	3.8	4.4	4.7	4.5	4.5	5.1	3.6	4.7	14.4
	1.3	3.1	4.2	4.8	5.1	4.8	4.9	5.5	4.0	5.4	17.5
	1.5	3.3	4.5	5.1	5.4	5.1	5.2	5.8	4.3	5.9	19.5
	2.1	4.8	6.4	7.2	7.7	7.3	7.3	8.3	6.1	8.5	29.3
	2.2	5.0	6.6	7.4	7.9	7.4	7.4	8.5	6.3	8.9	29.8
	2.4	5.2	6.9	7.7	8.2	7.6	7.7	8.8	6.6	9.4	30.6
	2.4	5.3	6.9	7.8	8.2	7.7	7.7	8.9	6.7	9.6	30.6
	2.4	5.3	6.9	7.8	8.2	7.7	7.7	8.9	6.7	9.7	30.6
	0.7	1.6	2.1	2.3	2.5	2.3	2.3	2.7	2.0	2.9	9.2

$$N_{\theta,pl.R} =$$

·kN

A keresztmetszet nyomási ellenállása a betonacélok és a nyak kiszélesedése nélkül:

$$N_{fi,pl.R.0} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$N_{fi,pl.R.0} \leftarrow N_{fi,pl.R.0} + A_{r_{i,j}} \cdot f_{\theta_{i,j}}$$

$$N_{fi,pl.R.0} \leftarrow 4 \cdot N_{fi,pl.R.0}$$

$$N_{fi,pl.R.0} = 3926 \text{ kN}$$

Az acélszelvény nyomási ellenállása:

$$N_{fi,pl.R.a} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

$$\text{for } j \in 0..n_y - 1$$

$$N_{fi,pl.R.a} \leftarrow N_{fi,pl.R.a} + N_{\theta,pl.R}_{i,j} \text{ if } M_{i,j} = "a"$$

$$N_{fi,pl.R.a} \leftarrow N_{fi,pl.R.a} - N_{\theta,pl.R.a.nyak}$$

$$N_{fi,pl.R.a} \leftarrow 4 \cdot N_{fi,pl.R.a}$$

$$N_{fi,pl.R.a} = 1629 \text{ kN}$$

A betonmag nyomási ellenállása:

$$N_{fi,pl.R.c} := N_{fi,pl.R.0} - N_{fi,pl.R.a} + 4 \cdot N_{\theta,pl.R.c.nyak} - 4 \cdot (N_{\theta,pl.R.c.1} + N_{\theta,pl.R.c.2} + N_{\theta,pl.R.c.3}) = 2223 \text{ kN}$$

Az oszlop képlékeny nyomási ellenállása

$$N_{fi,pl.R} := N_{fi,pl.R.s} + N_{fi,pl.R.a} + N_{fi,pl.R.c} = 5078 \text{ kN}$$

$$N_{fi,pl.Rd} := \frac{N_{fi,pl.R.s}}{\gamma_{M.fi.s}} + \frac{N_{fi,pl.R.a}}{\gamma_{M.fi.a}} + \frac{N_{fi,pl.R.c}}{\gamma_{M.fi.c}} = 5078 \text{ kN}$$

A nyomóerővel szembeni ellenállás tervezési értéke és karakterisztikus értéke tűz esetén megegyezik, mert mindegyik anyag parciális tényezője 1.

7.4. A hajlító merevségek

A hajlító merevségek az y tengely körül:

Betonacél:

$$EI_{fi.s.y} := 4 \cdot (E_{fi.s.1} \cdot I_{s.y.1} + E_{fi.s.2} \cdot I_{s.y.2} + E_{fi.s.3} \cdot I_{s.y.3}) = 2951 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A beton hajlító merevsége a betonacélok helyén:

$$EI_{\theta.c.y.1} := E_{c.sec.1} \cdot I_{s.y.1} = 23.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_{\theta.c.y.2} := E_{c.sec.2} \cdot I_{s.y.2} = 0.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_{\theta.c.y.3} := E_{c.sec.3} \cdot I_{s.y.3} = 0.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A kiszélesedő gerincnyak hajlító merevsége:

$$EI_{\theta.a.y.nyak} := E_{\theta.a.nyak} \cdot I_{y.nyak} = 87 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A beton hajlító merevsége a kiszélesedő gerincnyaknál:

$$EI_{\theta.c.y.nyak} := E_{c.sec.nyak} \cdot I_{y.nyak} = 1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acél és a beton elemek hajlító merevsége:

$$EI_{\theta.y} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

for j ∈ 0..n _y - 1	132.8	112.3	118.4	125.3	134.7	131.0	137.2	165.9	131.3	209.8	69.0
$EI_{\theta.y,i,j} \leftarrow E_{\theta,i,j} \cdot I_{y,i,j}$	0.9	1.6	2.2	2.6	2.8	2.7	2.8	3.1	2.1	181.3	67.5
	0.6	1.2	2.0	3.4	4.3	4.4	4.4	4.6	2.7	2.0	58.1
	0.5	1.2	2.9	4.6	5.8	5.9	5.9	6.3	3.8	3.6	70.0
	0.5	1.3	3.2	5.0	6.5	6.5	6.5	7.1	4.3	4.3	71.1
	0.4	1.2	3.2	4.9	6.0	6.1	6.2	6.6	4.3	4.5	59.8
	0.4	1.5	3.6	5.5	6.9	7.1	7.2	7.8	5.0	5.4	62.5
	0.3	1.1	2.5	3.8	4.9	5.1	5.2	5.6	3.6	4.2	41.9
	0.2	0.6	1.5	2.3	2.9	3.0	3.1	3.4	2.2	2.6	24.6
	0.1	0.3	0.6	1.0	1.3	1.3	1.4	1.5	1.0	1.1	10.6
	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	2.3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

·kN·m²

A keresztmetszet hajlító merevsége a betonacélok és a nyak kiszélesedése nélkül:

$$EI_{fi.y.0} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_z - 1 \\ \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ EI_{fi.y.0} \leftarrow EI_{fi.y.0} + E_{\theta,i,j} \cdot I_{y,i,j} \\ EI_{fi.y.0} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.y.0} \end{array} \right. \quad EI_{fi.y.0} = 9671 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acélszelvény öveinek hajlító merevsége:

$$EI_{fi.f.y} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ EI_{fi.f.y} \leftarrow EI_{fi.f.y} + EI_{\theta.y.0,j} \\ EI_{fi.f.y} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.f.y} \end{array} \right.$$

$$EI_{fi.f.y} = 5871 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acélszelvény gerincének hajlító merevsége:

$$EI_{fi.w.y} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n_z - 1 \\ EI_{fi.w.y} \leftarrow EI_{fi.w.y} + EI_{\theta.y,i,n_y-1} \\ EI_{fi.w.y} \leftarrow EI_{fi.w.y} + EI_{\theta.y.1,n_y-2} \\ EI_{fi.w.y} \leftarrow EI_{fi.w.y} - EI_{\theta.a.y.nyak} \\ EI_{fi.w.y} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.w.y} \end{array} \right.$$

$$EI_{fi.w.y} = 2253 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A betonmag hajlító merevsége:

$$EI_{fi.c.y} := EI_{fi.y.0} - EI_{fi.f.y} - EI_{fi.w.y} + 4 \cdot EI_{\theta.c.y.nyak} - 4 \cdot (EI_{\theta.c.y.1} + EI_{\theta.c.y.2} + EI_{\theta.c.y.3}) = 1460 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A hajlító merevségek a z tengely körül:

Betonacél:

$$EI_{fi.s.z} := 4 \cdot (E_{fi.s.1} \cdot I_{s.z.1} + E_{fi.s.2} \cdot I_{s.z.2} + E_{fi.s.3} \cdot I_{s.z.3}) = 2984 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A beton hajlító merevsége a betonacélok helyén:

$$EI_{\theta.c.z.1} := E_{c.sec.1} \cdot I_{s.z.1} = 23.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_{\theta.c.z.2} := E_{c.sec.2} \cdot I_{s.z.2} = 0.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

$$EI_{\theta.c.z.3} := E_{c.sec.3} \cdot I_{s.z.3} = 0.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A kiszélesedő gerincnyak hajlító merevsége:

$$EI_{\theta.a.z.nyak} := E_{\theta.a.nyak} \cdot I_{z.nyak} = 2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A beton hajlító merevsége a kiszélesedő gerincnyaknál:

$$EI_{\theta.c.z.nyak} := E_{c.sec.nyak} \cdot I_{z.nyak} = 0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acél és a beton elemek hajlító merevsége:

$$EI_{\theta.z} := \text{for } i \in 0..n_z - 1$$

for j ∈ 0..n _y - 1	118.0	78.5	65.2	52.7	41.4	28.2	19.6	13.5	5.1	2.2	0.0
$EI_{\theta.z,i,j} \leftarrow E_{\theta,i,j} \cdot I_{z,i,j}$	1.1	1.4	1.6	1.4	1.1	0.8	0.5	0.3	0.1	2.5	0.0
	0.8	1.4	1.9	2.4	2.2	1.6	1.0	0.6	0.2	0.0	0.0
	0.9	1.7	3.2	3.9	3.6	2.6	1.7	1.0	0.3	0.1	0.1
	1.1	2.2	4.4	5.3	5.0	3.5	2.3	1.4	0.4	0.1	0.1
	1.2	2.8	5.6	6.5	5.9	4.2	2.8	1.7	0.5	0.2	0.1
	1.7	4.5	8.7	10.2	9.3	6.7	4.5	2.8	0.8	0.3	0.1
	1.8	5.2	9.6	11.2	10.4	7.6	5.1	3.2	1.0	0.3	0.1
	1.9	5.6	10.4	12.1	11.3	8.3	5.6	3.5	1.1	0.3	0.2
	1.9	5.8	10.7	12.4	11.6	8.5	5.8	3.6	1.1	0.4	0.2
	1.9	5.9	10.9	12.5	11.7	8.6	5.9	3.7	1.2	0.4	0.2
	0.6	1.8	3.3	3.8	3.5	2.6	1.8	1.1	0.4	0.1	0.0

·kN·m²

A keresztmetszet hajlító merevsége a betonacélok és a nyak kiszélesedése nélkül:

$$EI_{fi.z.0} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..n_z - 1 \\ \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ EI_{fi.z.0} \leftarrow EI_{fi.z.0} + E_{\theta,i,j} \cdot I_{z,i,j} \\ EI_{fi.z.0} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.z.0} \end{array} \right. \quad EI_{fi.z.0} = 3331 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acélszelvény öveinek hajlító merevsége:

$$EI_{fi.f.z} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..n_y - 1 \\ EI_{fi.f.z} \leftarrow EI_{fi.f.z} + EI_{\theta.z.0,j} \\ EI_{fi.f.z} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.f.z} \end{array} \right.$$

$$EI_{fi.f.z} = 1697 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

Az acélszelvény gerincének hajlító merevsége:

$$EI_{fi.w.z} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n_z - 1 \\ EI_{fi.w.z} \leftarrow EI_{fi.w.z} + EI_{\theta.z,i,n_y-1} \\ EI_{fi.w.z} \leftarrow EI_{fi.w.z} + EI_{\theta.z.1,n_y-2} \\ EI_{fi.w.z} \leftarrow EI_{fi.w.z} - EI_{\theta.a.z.nyak} \\ EI_{fi.w.z} \leftarrow 4 \cdot EI_{fi.w.z} \end{array} \right.$$

$$EI_{fi.w.z} = 8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

A betonmag hajlító merevsége:

$$EI_{fi.c.z} := EI_{fi.z.0} - EI_{fi.f.z} - EI_{fi.w.z} + 4 \cdot EI_{\theta.c.z.nyak} - 4 \cdot (EI_{\theta.c.z.1} + EI_{\theta.c.z.2} + EI_{\theta.c.z.3}) = 1532 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

7.5. A kihajlási ellenállás központos nyomásra

Az anyagok hőmérsékleti hatások okozta feszültségektől függő csökkentő tényezőit az MSZ EN 1994-1-2 G melléklet G7 táblázata szerint vesszük föl.

A betonacélhoz:

$$\varphi_{s,\theta} := \begin{cases} 1 & \text{if } t_{fi} \leq 30\text{-perc} \\ \left(1.1 - 0.2 \cdot \frac{t_{fi}}{60\text{-perc}}\right) & \text{if } 30\text{-perc} \leq t_{fi} \leq 90\text{-perc} \\ \left(0.2 + 0.2 \cdot \frac{t_{fi}}{30\text{-perc}}\right) & \text{if } 90\text{-perc} \leq t_{fi} \leq 120\text{-perc} \\ 1 & \text{if } 120\text{-perc} \leq t_{fi} \end{cases} = 0.9$$

Az acélszelvény öveihez: $\varphi_{f,\theta} := \varphi_{s,\theta} = 0.9$

Az acélszelvény gerincéhez: $\varphi_{w,\theta} = 1.0$

A betonmaghoz: $\varphi_{c,\theta} = 0.8$

A keresztmetszet hajlítási merevsége a két irányban:

$$EI_{fi,eff,y} := \varphi_{f,\theta} \cdot EI_{fi,f,y} + \varphi_{w,\theta} \cdot EI_{fi,w,y} + \varphi_{s,\theta} \cdot EI_{fi,s,y} + \varphi_{c,\theta} \cdot EI_{fi,c,y} = 11361 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$$

$$EI_{fi,eff,z} := \varphi_{f,\theta} \cdot EI_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta} \cdot EI_{fi,w,z} + \varphi_{s,\theta} \cdot EI_{fi,s,z} + \varphi_{c,\theta} \cdot EI_{fi,c,z} = 5447 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$$

Az Euler-féle kritikus erő MSZ-EN 1994-1-2 (4.14.):

$$N_{u,fi,cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot EI_{fi,eff,y}}{L_{0,y}^2} = 19795 \text{ kN}$$

$$N_{u,fi,cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot EI_{fi,eff,z}}{L_{0,z}^2} = 9491 \text{ kN}$$

A viszonyított karcsúság:

$$\lambda_{0,y} := \sqrt{\frac{N_{fi,pl,R}}{N_{u,fi,cr,y}}} = 0.506$$

$$\lambda_{0,z} := \sqrt{\frac{N_{fi,pl,R}}{N_{u,fi,cr,z}}} = 0.731$$

A χ kihajlási csökkentő tényezőt az MSZ EN 1993-1-1 6.3.1. alapján kell számolni "c" kihajlási görbével. Az α alakhiba-tényező "C" kihajlási görbe esetén $\alpha = 0,49$. A φ segédmenyiség:

$$\varphi_y := \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda_{0,y} - 0.2) + \lambda_{0,y}^2}{2} = 0.703$$

$$\varphi_z := \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda_{0,z} - 0.2) + \lambda_{0,z}^2}{2} = 0.898$$

A kihajlási csökkentő tényező :

$$\chi_y := \min\left(\frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \lambda_{0,y}^2}}, 1\right) = 0.839$$

$$\chi_z := \min\left(\frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \lambda_{0,z}^2}}, 1\right) = 0.705$$

A kihajlási ellenállás központos nyomásra:

$$N_{fi,Rd,y} := \chi_y \cdot N_{fi,pl,Rd} = 4262 \text{ kN}$$

$$N_{fi,Rd,z} := \chi_z \cdot N_{fi,pl,Rd} = 3580 \text{ kN}$$

$$N_{fi,Rd} := \min(N_{fi,Rd,y}, N_{fi,Rd,z}) = 3580 \text{ kN}$$

8. Ellenőrzés külpontos nyomásra

Feltételezzük, hogy normál hőmérsékleten és tűz esetén a külpontos és központos nyomási ellenállás aránya megegyezik. A normál hőmérsékleti ellenállásokat itt nem részletezzük, az eredményeket másik számpéldából vesszük át.

Kihajlási ellenállás központos teherre: $N_{1.Rd}$ $N_{07.Rd}$ $N_{1.fi.Rd}$ $N_{07.fi.Rd}$
 Külpontos nyomási ellenállás: $N_{1.Rd,\delta}$ $N_{07.Rd,\delta}$ $N_{1.fi.Rd,\delta}$ $N_{07.fi.Rd,\delta}$
 Az indexek jelentése: 1 – alul-fölül csuklós
 07 – alul csuklós, fölül befogott
 fi – tűz esetén
 δ – külpontos

A külpontos nyomási ellenállás tűz esetén a kétfajta modellre:

$$N_{1.fi.Rd,\delta} := N_{1.fi.Rd} \cdot \frac{N_{1.Rd,\delta}}{N_{1.Rd}} = 2231 \text{ kN} \qquad N_{07.fi.Rd,\delta} := N_{07.fi.Rd} \cdot \frac{N_{07.Rd,\delta}}{N_{07.Rd}} = 2797 \text{ kN}$$

A kihasználtság normál hőmérséklet esetén a kétfajta modellre:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{1.Rd,\delta}} \qquad \frac{N_{Ed}}{N_{07.Rd,\delta}}$$

A kihasználtság tűz esetén a kétfajta modellre:

$$\frac{N_{fi.Ed}}{N_{07.fi.Rd,\delta}} \qquad \frac{N_{fi.Ed}}{N_{1.fi.500.Rd,\delta}}$$

Az eredményeket az alábbi táblázatban foglaljuk össze:

határállapot	hatás/ ellenállás	modell	alul-fölül csuklós	alul csuklós, fölül befogott
teherbírási, normál hőmérséklet	terhelés		4 050 kN	
	ellenállás, kihasználtság	központos nyomás	6 615 kN	7 520 kN
		külpontos nyomás	5 651 kN	5 875 kN
			71,7%	68,9%
teherbírási, normál hőmérséklet	terhelés		2 450 kN	
	ellenállás, kihasználtság	központos nyomás	2 612 kN*	3 580 kN
		külpontos nyomás	2 231 kN	2 797 kN
			109,8%	87,6%

* e számérték a 7.5 pont értelemszerű módosításával állítható elő

A szabvány előírt feltételek teljesülése esetén a modellváltást megengedi, így a normál hőmérsékleten alul-fölül csuklós oszlop tűz esetén az egyik vagy mindkét végén befogottként számolható. **Tűz esetén a kihasználtság 87,6%, az oszlop megfelel. Normál hőmérsékleten a kihasználtság 71,7%, kisebb, mint tűz esetén.**

E számpéldában közepes tűzállósági követelményt, 60 percet írtunk elő, és alacsony oszlopot alkalmaztunk. Gyakorlati esetben valószínűsíthető, hogy a mértékadó határállapot a tüzesei rendkívüli állapot lesz.