

4. OSZTÁLYÚ KERESZTMETSZETEK ELLENÁLLÁSAINAK SZÁMÍTÁSA ACÉL- ÉS ÖSZVÉRSZERKEZETŰ HIDAKNÁL

DR. SZABÓ BERTALAN¹

1. ÖSSZEFOGLALÁS

Az Eurocode 3 és a magyar szabványok (MSZ) alapelvei acél szerkezeti elemek nyomatékai, nyírási és lemezhorpadási ellenállásainak meghatározásában alapvetően különböznek. Azonban néhány új változtatás az MSZ EN 1993-1-5 szabványban részben figyelembe veszi a lemezhorpadásra vonatkozó korábbi tervezési alapelveket. Az MSZ EN 1993-1-1 szabvány négyfajta keresztmetszet-típust vezetett be (az 1. osztályú keresztmetszettől 4.-ig). A hídépítésben szinte csak 3. és 4. osztályú keresztmetszetek fordulnak elő. Negyedik osztályú keresztmetszetenél a lemezhorpadás hatását figyelembe kell venni a nyomási és hajlítási ellenállás számításakor. Az MSZ EN 1993-1-5 szabvány és jelen tanulmány is kétféle módszert, nevezetesen a „hatékony keresztmetszetek” és a „redukált feszültségek” módszerét tárgyalja. Jelen munka röviden ismerteti a számítási lépéseket, és összehasonlítja a két módszert a szöveges részben és egy számpéldában is.

2. BEVEZETÉS

Magyarországon a tartószerkezeti Eurocode-ok életbelépésével az acélszerkezetek méretezése [1] jelentősen megváltozott, mert az angolszász elméleti alapokon nyugvó szabvány bevezette a keresztmetszetek osztályozását (1–4. osztály), amely figyelembe veszi a nyomási és hajlítási ellenállás meghatározásakor a lemezhorpadás hatását 4. osztályú keresztmetszetre. Az acél- és öszvérszerkezetű hidak acéltartóinak keresztmetszetei általában a 3. és 4. osztályba sorolhatóak. A 3. osztályú keresztmetszeti osztályba tartozó szelvények hagyományosan számíthatók az Eurocode előírásainak ([1], [2], [3] és [4]) értelemszerű alkalmazásával, ezzel szemben, a 4. osztályú keresztmetszet ellenállásának számítása a fentiek miatt más, a korábbi hídtervezési gyakorlathoz képest teljesen új, ezért indokolt a hidakra vonatkozó számítási módszerek részletes ismertetése. Az MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] alapvetően két módszert mutat be, a „hatékony keresztmetszetek” és a „redukált feszültségek” módszerét; jelen tanulmány is ezeket ismerteti, és számpéldán keresztül is bemutatja az egyezőségeket és a különbözőségeket.

3. A 4. OSZTÁLYÚ ACÉL KERESZTMETSZETEK ELLENÁLLÁSÁNAK SZÁMÍTÁSA AZ EUROCODE SZERINT. NYOMÁS-HAJLÍTÁS (NYÍRÁS) ÉS EZEK INTERAKCIÓJA

3.1. HATÉKONY KERESZTMETSZETEK (REDUKÁLT KERESZTMETSZETEK) MÓDSZERE

A hatékony keresztmetszetek módszere a hagyományos számítási módszerektől jelentősen eltér, mert a keresztmetszeti jellemzők számítása eléggé bonyolult, nehezen „gépésíthető”, inkább a kézi számítást (vagy a kézi számításra alapuló szoftvereket, pl. MathCad) preferálja. További nehézség, hogy a keresztmetsze-

tek ellenállásait igénybevételekkel kell összehasonlítani. Ez utóbbiakat csak néhány végeelemprogram szolgáltatja csak, a többi esetében feszültségekből kellene a nyomatékokat, normál- és nyíróerőket visszszámolni. Úgynevezett „egyszerű” (melegen hengerelt szelvények, hosszmerítőt nélküli hegesztett I- és zárt szelvények) keresztmetszetek esetét nem tárgyaljuk itt, csupán néhány elméleti ismeretet és számpéldát tartalmazó kiadványra [5], [6] hívjuk fel a figyelmet, mert az anyag magasépítési acél-szerkezeti vonatkozásait már egy évtizede oktatjuk a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén. Viszont a 4. fejezet számpéldája egy hosszborða nélküli öszvértartó keresztmetszet ellenőrzését mutatja be „hatékony keresztmetszetek” módszerével is.

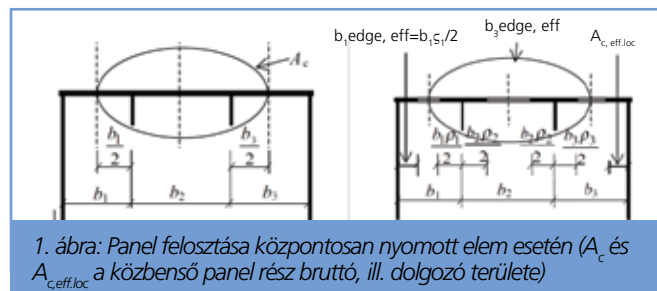
Hídkeresztmetszetek számítása

Nagyobb fesztávú acél és öszvér hídszerkezetek tipikusan összetett keresztmetszettel készülnek (pl. hossz- és keresztbordával ellátott nyitott és szekrény keresztmetszetű hidak). E szerkezetek keresztmetszeti részeinek ellenállását az MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] szerint kell számítani. A számítás egyes lépéseit nyomásra, hajlításra² és a kettő interakciójára az alábbiakban közöljük.

Az acéltartó keresztmetszetét alkotó elemekre (pl. merítésekkel ellátott pálya-, gerinc- és fenéklemez), panelekre kell bontani. A hossz- és keresztbordák az alkotóelemet (panelt) lemezmezőkre (alpanelekre) osztják. A panelt közbenső és szélső elemekre is kell bontani, melyre például az 1. ábra mutat. Vizsgálni kell a panel lemezszerű lemez(horpadás)-szerű és oszlopszerű (rúdkihajlásszerű) viselkedését. Mindkettőhöz a panel átlag normálfeszültségei alapján meg kell állapítani a nyomott zóna magasságát. A nyomott zónába eső részek (bordák, lemezek) keresztmetszeti területeit majd esetlegesen redukálni kell, de ki kell számolni egy panel (lemezek, bordák) bruttó keresztmetszetre vonatkozó keresztmetszeti jellemzőit is.

$$b_{1,edge,eff} = b_{1,1} \cdot A_{c,eff,loc} \cdot b_{3,edge,eff}$$

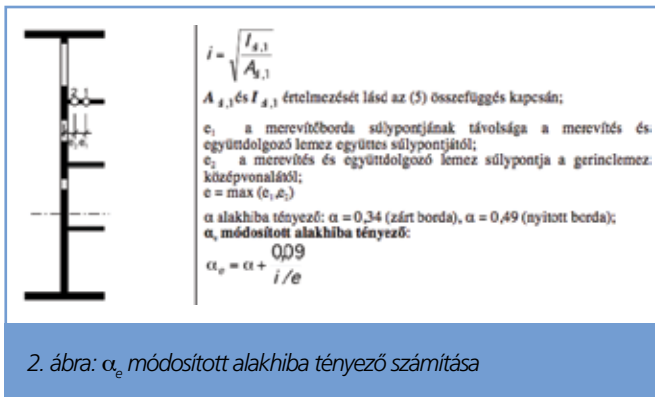
Lemezszerű viselkedés figyelembe vételéhez a nyomott vagy részben nyomott lemezmezőre/alpanelre (ez vonatkozik a panel szélső elemeire is, lásd az 1. ábrán a b_1 és b_3 lemezmezőket)



1. ábra: Panel felosztása központosan nyomott elem esetén (A_c és $A_{c,eff,loc}$ a közbenső panel rész bruttó, ill. dolgozó területe)

¹ Egyetemi docens, PhD, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

² Nyomás és hajlítás esetén ugyanazok a lépések.



2. ábra: α_e módosított alakhiba tényező számítása

az együttdolgozó lemez méreteket a Winter-formula segítségével számítjuk ki, csökkentvén (szorozván) a szélességi méretet egy $\rho \leq 1$ számmal. A Winter-formula közbelső nyomott elem esetén;

$$\rho_i = \frac{\bar{\lambda}_{p,i} - 0,0563 + \psi_i}{\bar{\lambda}_{p,i}^2} \quad (1)$$

Az (1) összefüggésben szereplő számításához minden alkotóelem esetében (lemez, borda) meg kell állapítani:

- a $k_{\sigma,p,i}$ horpadási tényezőt (a normálfeszültségi ábra ismeretében, az MSZ EN 1993-1-1 [1], vagy az MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] megfelelő táblázataiból);
- a $\sigma_{cr,p,i}$ kritikus horpadási feszültséget a következő képletek segítségével:

$$\sigma_{cr,p,i} = k_{\sigma,p,i} \cdot \sigma_{E,i} \quad (2)$$

$$\sigma_{E,i} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_i^2}{12(1-\nu^2) \cdot b_i^2} \quad (3)$$

a viszonyított lemezkarcsúságot $\bar{\lambda}_{p,i} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p,i}}}$

vagy közvetlenül a: $\bar{\lambda}_{p,i} = \frac{b_i}{t_{wi}} \frac{1}{284 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma,p,i}}}$ formulából).

$$-\varepsilon = \sqrt{\frac{239 \text{ N/mm}^2}{f_y}} \quad (4)$$

Az (1) és (4) összefüggésekben E az acél rugalmassági modulusa, f_y az alapanyag folyáshatára, t_{wi} az alkotó elem (lemez, bordaszakasz) vastagsága, ν az acél haránt kontrakciós tényezője, b_i az alkotó elem szélessége és ψ a σ_{2i}/σ_{1i} feszültségarány (σ_{2i} húzó- vagy a kisebbik nyomófeszültség az alpanel szálában, σ_{1i} a (nagyobb) nyomófeszültség). σ_{1i} a hagyományoknak megfelelően pozitív.

- A részterületeket úgy kapjuk meg, hogy ρ_i -vel csökkentett szélességi méreteket szorozzuk a vastagsággal.

- A teljes dolgozó keresztmetszeti terület úgy számítható, hogy az egyes részterületeket összegezzük.

Az *oszlopszerű* viselkedéshez a kritikus feszültséget a nyomásra legjobban igénybevett hosszborða és a hozzátartozó lemezrészek - melynek mértékét MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] A-A.1. melléklete szabályozza - keresztmetszeti jellemzőinek segítségével számítjuk a következő formulával (lásd a 2. ábrát is):

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{d,1}}{A_{d,1} \cdot a^2} \quad (5)$$

ahol $A_{d,1}$ és $I_{d,1}$ egy darab hosszborða és a hozzátartozó lemezrész bruttó keresztmetszeti területe, illetve inercianyomatéka (a lemezrészsel párhuzamos tengelyre) és a a keresztbordák távol-

sága.

Szükség van a panel és a hosszborða viszonyított karcsúságára és kihajlási csökkentő tényezőjére is.

A panel viszonyított lemezkarcsúsága a következő formulával számítható:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{Ap} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (6)$$

ahol

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E \quad \text{és}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12(1-\nu^2) \cdot h_w^2} \quad (7)$$

A (6) és (7) összefüggésekben, β_{Ap} a panel dolgozó és teljes keresztmetszetének hányadosa, t a panel gerinclemezeének vastagsága és h_w a panel gerinclemezeének szélessége/magassága. $k_{\sigma,p}$ értékét segédkönyvből [7] vagy egyes esetekben az MSZ EN 1993-1-5 szabványból [3] kaphatjuk meg. λ_p függvényében a Winter-formula segítségével az egész panelre egy ρ csökkentő tényező számítható az (1) összefüggés értelemszerű alkalmazásával.

A hosszborða viszonyított karcsúsága a következő formulával számítható:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{Ac} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (8)$$

A (8) összefüggésben β_{Ac} a hosszborða dolgozó és teljes keresztmetszetének hányadosa, $\sigma_{cr,c}$ az (5) összefüggés szerinti.

Az α_e módosított alakhiba-tényező (lásd a 2. ábrát, illetve az MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] A-A.1. mellékletét) és a hosszborða viszonyított karcsúsága függvényében a borða χ_c kihajlási csökkentő tényezője a következő képlettel számítható:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \quad (9)$$

ahol

$$\phi = \frac{1 + \alpha_{\phi} (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2}{2} \quad (10)$$

A lemez- és rúdszerű viselkedés kölcsönhatását az alábbi interakciós formulával vesszük figyelembe:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (11)$$

A (11) összefüggésben:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{de } 0 \leq \xi < 1 \quad (12)$$

ahol $\sigma_{cr,p}$ -t a (7), $\sigma_{cr,c}$ -t a (8) összefüggésből számítjuk.

A teljes panel hatékony keresztmetszeti területét úgy kapjuk meg, hogy az összegzett dolgozó keresztmetszeti területeket megszorozzuk a ρ_c csökkentő tényezővel (lásd az 1. ábrát is) és ezt összegezzük a dolgozó panelszélek területével:

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t \quad (13)$$

Figyelembe kell venni a nyírási torzulás (shear lag) hatást is ([3] MSZ EN 1993-1-5 3.2. szakasz).

Minden egyes panelre elvégezzük a fenti eljárást. A teljes acél keresztmetszet keresztmetszeti jellemzőit számítjuk, beleértve az inercianyomatékot is.

A szerkezeti acél keresztmetszetének nyomási és hajlítási ellenállását a következő képletek segítségével kapjuk:

$$N_{eff,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{MO}}, \quad M_{eff,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} \quad (14)$$

A nyomás és hajlítás interakcióját a következő formula adja:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{N_{eff,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{eff,Rd}} \quad (15)$$

$$\eta_1 \leq 1$$

Lemezmezők nyírási ellenállását itt nem tárgyaljuk viszonylagos egyszerűségük miatt, lásd a [3], [4] és [5] hivatkozásokat, viszont a 3.2. szakaszban néhány vonatkozás alkalmazást nyer.

3.2. REDUKÁLT FESZÜLTSEGEK MÓDSZERE

A redukált feszültségek módszere alternatív módszer a „hatékony keresztmetszetek” módszerével szemben. Egyes elemei a tárgyban alkalmazott hagyományos, rugalmas alapú eljárásokból származnak, ezért sok esetben konzervatívnak tekinthető, viszont a jelenlegi számítástechnikai adottságokkal kompatibilisebbnek mondható, mint a „hatékony keresztmetszetek” eljárás, mert feszültségekkel számol. A hagyományos eljárásokra utal az is, hogy jelen módszerrel külön-külön kell ellenőrizni az egyes paneleket kétirányú nyomás, hajlítás és nyírás kölcsönhatására. Nem szükséges nagyon bonyolult keresztmetszetek inercianyomatékának meghatározása sem. A módszert az MSZ EN 1993-1-5 szabvány 10. fejezete tartalmazza. Öszvértartónál vizsgálni kell a $t = 0$ és a $t = \infty$ állapotokat is. A számítás egyes lépéseit nyomás, hajlítás és nyírás interakciójára az alábbiakban közöljük.

3.2.1. KERESZTMEREVÍTÉSEKEL ELLÁTOTT, HOSSZMEREVÍTŐ BORDA NÉLKÜLI LEMEZ

Adottak a lemezmezőre ható normál- és nyírófeszültségek. A gerinclemez szélső szálaiban keletkező normálfeszültségekből (húzófeszültség negatív) meghatározható a $\psi = \sigma_x / \sigma_1$ arány.

A k_σ horpadási tényező az 1. táblázatból határozható meg.

A k_τ horpadási tényező az $\alpha = a/h_w$ (α a keresztmervítő-távolság, h_w gerinclemez-magasság) viszonyszám függvényében:

$$k_\tau = 5,34 + \frac{4,00}{\alpha^2}, \quad \text{ha } \alpha \geq 1 \quad (16)$$

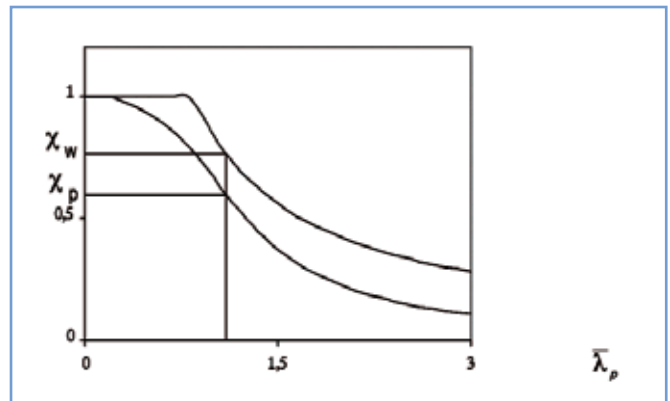
$$k_\tau = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2}, \quad \text{ha } \alpha < 1 \quad (17)$$

Kritikus horpadási feszültség az egyenértékű lemezben (t_w a gerincvastagság):

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h_w^2} \quad (18)$$

A kritikus feszültségek:

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E \quad \text{és} \quad \tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E \quad (19)$$



3. ábra: Viszonyított karcsúság és csökkentő tényezők összefüggése

A lemezszerű viselkedéshez tartozó karcsúsági paraméter (viszonyított karcsúság) meghatározásához szükség van a szilárdsági és a stabilitási teherbírás minimális teherszorozójára (itt csak az x , rúdtengely irányú normálfeszültségeket tartalmazó képleteket ismertetjük):

$$\alpha_{ult} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2}} \quad (20)$$

és

$$\alpha_{cr,total} = \frac{1}{\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}}\right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2\alpha_{cr,\tau}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2}}} \quad (21)$$

ahol $\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{x,Ed}$ és $\alpha_{cr,\tau} = \tau_{cr,\tau} / \tau_{Ed}$. (Az E index a hatás oldali feszültségekre utal).

Így a karcsúsági paraméter:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult}}{\alpha_{cr,total}}} \quad (22)$$

A karcsúsági paraméter függvényében számítható a ρ redukációs faktor és a χ_ρ kihajlási csökkentő tényező (lásd a 3. ábrát is), azaz;

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \chi_\rho = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_p^2}}, \quad \text{ahol} \quad (23)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha_\phi(\bar{\lambda}_p - 0,2) + \bar{\lambda}_p^2}{2}, \quad (\alpha_\phi = 0,21)$$

A (23) összefüggésben ψ a teljes panelre vonatkozó feszültség-hányados.

A kritikus feszültség *oszlopszerű* viselkedéshez (nincs hosszirányú merevítés):

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_w^2}{12(1 - \nu^2) \cdot a^2} \quad (24)$$

1. táblázat: k_σ horpadási tényező

| $\psi = \sigma_x / \sigma_1$ | 1,0 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1,0 | $-1 > \psi > -3$ |
|------------------------------|-----|-----------------------|------|----------------------------------|------|--------------------|
| k_σ | 4,0 | $8,2 / (1,05 + \psi)$ | 7,81 | $7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$ | 23,9 | $5,98(1 - \psi)^2$ |

A lemez- és oszlopszerű viselkedés kölcsönhatását az alábbi interakciós formulával vesszük figyelembe:

$$\rho_x = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c, \text{ ahol} \quad (25)$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1, \text{ de } 0 \leq \xi < 1$$

A χ_w nyírási horpadási csökkentő tényező a lemez λ_p karcsúsági paraméterének függvényében (az MSZ EN 1993-1-5 szabvány [3] 10. fejezete χ_w értékét λ_p függvényében írja elő kiszámítani, lásd 3. ábrát is):

$$\chi_w = \frac{0,83}{\lambda_p} \quad (26)$$

A keresztmerezítésekkel ellátott panel megfelel, ha teljesül a normál- és nyírófeszültségek kölcsönhatására adott alábbi feltétel:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{x,Ed}}{\chi_w f_y} \right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

3.2.2. KERESZTMEREVÍTÉSEKSEL ÉS HOSSZMEREVÍTŐ BORDÁKKAL ELLÁTOTT LEMEZ SZÁMÍTÁSA

A teljes merevített (hossz- és keresztbordával ellátott) panelre lemezszerű viselkedés számításba vételéhez meg kell határozni a $\psi = \sigma_y / \sigma_1$ feszültségarányt.

A kritikus horpadási feszültség:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_w^2}{12(1-\nu^2) \cdot h_w^2} \quad (28)$$

A teljes lemezmezőre meg kell határozni a k_σ és k_τ horpadási tényezőket megfelelő analitikus/numerikus módszerek, vagy ezen alapuló görbék [7] segítségével. Így a kritikus feszültségek:

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E \quad \text{és} \quad \tau_{cr,\tau} = k_\tau \cdot \sigma_E \quad (29)$$

Ki kell számítani a lemezszerű viselkedéshez tartozó karcsúsági paramétert/viszonyított karcsúságot (a ρ_x redukciós faktor, és a χ_w nyírási horpadási csökkentő tényező meghatározásának menete megegyezik a hosszmerevítő nélküli lemeznél bemutatottakkal).

A hossz- és keresztmerezítésekkel ellátott panel lemezszerű viselkedésre megfelel, ha teljesül a normál- és nyírófeszültségek kölcsönhatására adott alábbi feltétel:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{x,Ed}}{\chi_w f_y} \right)^2 \leq 1 \quad (30)$$

A kritikus feszültség oszlopszerű viselkedéshez (a panel széléhez legközelebb eső, legnagyobb nyomófeszültséggel terhelt hossz-bordát és a vele együttdolgozó gerinclemezszerű részeket vizsgáljuk):

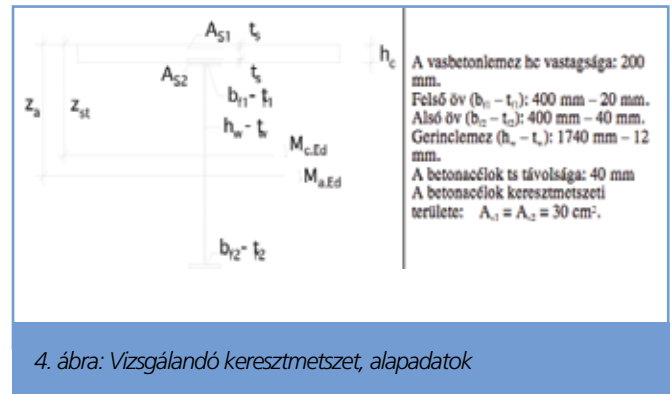
$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{d,1}}{A_{y,1} \cdot a^2} \quad (31)$$

(a jelöléseket lásd a 3.1. pontban)

A karcsúsági paraméter (viszonyított karcsúság) oszlopszerű viselkedéshez a a következő összefüggéssel számítható:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_A \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}}, \text{ ahol } \beta_A = \frac{A_{eff,c}}{A_{c,brutto}} \quad (32)$$

Az $A_{eff,c}$ a nyomófeszültségre dolgozó lemezek (gerinclemez- és bordarészek) felülete, $A_{c,brutto}$ pedig a panel teljes keresztmetszeti területe.



4. ábra: Vizsgálendő keresztmetszet, alapadatok

A (32) összefüggésben szereplő dolgozó keresztmetszet meghatározásához sorra kell venni minden lemezrészlet, a kritikus feszültséget (a k_{σ_i} horpadási tényező az 1. táblázat alapján), a lokális karcsúsági paramétert, a ρ_i redukciós faktort, azaz:

$$\sigma_{cr,pi} = k_{\sigma,pi} \cdot \sigma_{E,i}, \text{ ahol}$$

$$\sigma_{E,i} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_i^2}{12(1-\nu^2) \cdot h_i^2} \rightarrow$$

$$\bar{\lambda}_{pi} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,pi}}} = \frac{b_i}{t_{wi}} \frac{1}{284 \cdot E \cdot \sqrt{k_{wi}}} \rightarrow \quad (33)$$

$$\rho_i = \frac{\bar{\lambda}_{pi} - 0,05(\xi + \psi_i)}{\bar{\lambda}_{pi}^2} \rightarrow$$

$$A_{eff,ci} = \rho_i \cdot b_i \cdot t_{wi}$$

Oszlopszerű viselkedéshez a λ_c paraméter függvényében – (lásd a (32) összefüggést) – a χ_c redukciós tényező meghatározható:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}, \text{ ahol} \quad (34)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha_\phi (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2}{2}$$

az α_ϕ módosított alakhiba tényezőben a merevítőborda külpon-tosságát is figyelembe kell venni az MSZ EN 1993-1-5 szabvány szerint (lásd a 2. ábrát).

A lemez- és oszlopszerű viselkedés kölcsönhatását az alábbi interakciós formulával vesszük figyelembe:

$$\rho_{glob} = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad (35)$$

(ρ_x a lemezszerű viselkedésnél meghatározott érték.)

A (35) összefüggésben:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1, \text{ de } 0 \leq \xi < 1 \quad (36)$$

A χ_w nyírási horpadási csökkentő tényező a teljes panel λ_p karcsúsági paraméterének függvényében:

$$\chi_w = \frac{0,83}{\lambda_p} \quad (37)$$

A hossz- és keresztmervítésekkel ellátott panel *lemez- és oszlop-szerű* viselkedésre megfelel, ha teljesül a normál- és nyírófeszültségek kölcsönhatására adott alábbi feltétel:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{glob} f_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{x,Ed}}{\chi_w f_y} \right)^2 \leq 1 \quad (38)$$

4. SZÁMPÉLDA

Határozzuk meg a 4. ábrán látható öszvértartó-keresztmetszet ellenállását hajlításra a hatékony keresztmetszetek, hajlításra és nyírásra a redukált feszültségek módszerével! Csak a szerkezeti acélra ható $M_{a,Ed}$ nyomaték -3300 kNm, az öszvér keresztmetszetre ható $M_{c,Ed}$ nyomaték -5700 kNm. A negatív nyomatékok miatt a vasbeton keresztmetszetet berepedtnek tekintjük (teherbírási határállapotban nem számolunk vele). A V_{Ed} nyíróerő 400 kN (feltételezzük, hogy a gerinclemez veszi fel). A keresztmervítő bordák távolsága 2400 mm. A szerkezeti acél S355 minőségű.

A szerkezeti acél keresztmetszeti jellemzői:

- $A_a = 448,8$ cm²
- $J_a = 2\,298\,414$ cm⁴
- $z_a = 125,04$ cm (z_a a beton felső szélőtől az acél keresztmetszet súlypontjáiig terjedő távolság; lásd a 3. ábrát).

A berepedt keresztmetszet keresztmetszeti jellemzői:

- $A_{st} = 508,8$ cm²
- $J_{st} = 3\,001\,022$ cm⁴
- $z_{st} = 111,48$ cm (z_{st} a beton felső szélőtől az összes acél keresztmetszet súlypontjáiig terjedő távolság; lásd a 4. ábrát).

4.1. FESZÜLTSEGEK SZÁMÍTÁSA OSZTÁLYBA SOROLÁSÁHOZ

Feszültségek $M_{a,Ed} = -3300$ kNm nyomatékból a gerinclemez szélső szálaiban

- Felső szálban:
 $\sigma_{w,aU} = 3300 \cdot 100 \cdot 103,04 / 2\,298\,414 = 14,80$ kN/cm²
- Alsó szálban:
 $\sigma_{w,aL} = -3300 \cdot 100 \cdot 70,96 / 2\,298\,414 = -10,19$ kN/cm²

Feszültségek $M_{c,Ed} = -5700$ kNm nyomatékból a gerinclemez szélső szálaiban

- Felső szálban:
 $\sigma_{w,cU} = 5700 \cdot 100 \cdot 89,48 / 3\,001\,022 = 17,00$ kN/cm²
- Alsó szálban:
 $\sigma_{w,cL} = -5700 \cdot 100 \cdot 84,52 / 3\,001\,022 = -16,05$ kN/cm²

Feszültségek összegzése

$$\begin{aligned} \Sigma \sigma_{wU} &= \sigma_{w,aU} + \sigma_{w,cU} = 14,79 + 17,00 = 31,79 \text{ kN/cm}^2 \\ \Sigma \sigma_{wL} &= \sigma_{w,aL} + \sigma_{w,cL} = -(10,19 + 16,05) = -26,24 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

A keresztmetszet osztályozása az összegzett feszültségek alapján

Az a_w varrat hasznos mérete, 6 mm,

$$\psi = \frac{\Sigma \sigma_{wU}}{\Sigma \sigma_{wL}} = \frac{-3179}{2617} = -1,21 \epsilon$$

$$\left(\epsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \right)$$

$$d = h_w - 2 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 1740 - 2 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} = 1720,3 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{1720,3}{12} = 143,6 >$$

$$62 \cdot \sqrt{(1-\psi)(-\psi)} = 62 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{(1+1,21) \cdot 1,21} = 12245;$$

így a gerinclemez és egyben a teljes keresztmetszet 4. osztályú!

A keresztmetszet osztályozása az öszvértartóra ható igénybevételekből származó feszültségek alapján

A ψ tényezőt a keresztmetszet osztályba sorolásához [4] szerint a biztonság javára tett közelítéssel az öszvér keresztmetszetre ható feszültségekből is lehet számolni (a nyomás pozitív).

$$\psi_1 = \frac{\sigma_{w,cU}}{\Sigma \sigma_{w,cL}} = \frac{-1700}{1605} = -1,05 \epsilon$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{1720,3}{12} = 143,6 > 62 \cdot \sqrt{(1-\psi_1)(-\psi_1)} =$$

$$= 62 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{(1+1,05) \cdot 1,05} = 1064$$

így a gerinclemez és egyben a teljes keresztmetszet 4. osztályú e vizsgálat szerint is!

5.2. HATÉKONY KERESZTMETSZETEK (REDUKÁLT KERESZTMETSZETEK) MÓDSZERE

A k_σ horpadási tényező (belső nyomott elem):

$$k_\sigma = 5,98 (1-\varphi)^2 = 5,98 (1-1,21)^2 = 292 \epsilon$$

Karcúsági paraméter:

$$\bar{\lambda} = \frac{d}{t_w} \cdot \frac{1}{284 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} =$$

$$= \frac{1720,3}{12} \cdot \frac{1}{284 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{292}} = 1,14 \epsilon$$

ρ redukációs faktor:

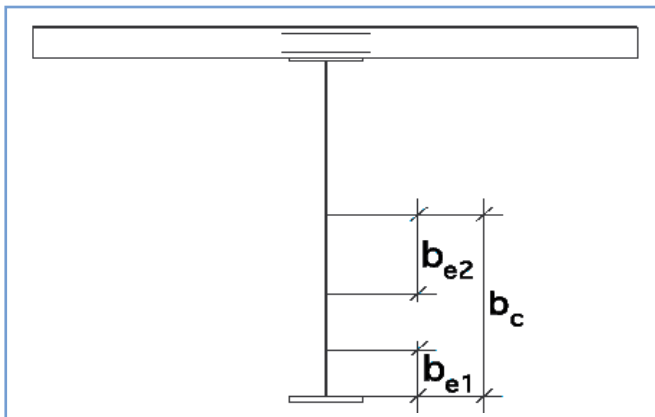
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$= \frac{1,149 - 0,055(3-1,21)}{1,149^2} = 0,79 \epsilon$$

A nyomott zóna magassága a feszültségek arányából:

$$b_c = \frac{|\Sigma \sigma_{wL}|}{|\Sigma \sigma_{wL}| + \Sigma \sigma_{wU}} \cdot h_w = 2624$$

$$? = \frac{1740}{2624 + 3179} = 7879 \text{ mm}$$



5. ábra: A hatékony keresztmetszet

Az együttdolgozó gerincmagasság (lásd az 5. ábrát):

Az acéltartó hatékony keresztmetszeti jellemzői (összefoglalva):

$$h_{eff} = \rho \cdot b_c = 0,79678679 = 62628\text{mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 0,4 \cdot 62628 = 25051\text{mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 0,6 \cdot 62628 = 37577\text{mm}$$

$A_{a,eff} = 429,54\text{ cm}^2$, $J_{a,eff} = 226895\text{ cm}^4$, $Z_{a,eff} = 123,33\text{ cm}$ ($z_{a,eff}$) a beton felső szélő szálától az acél keresztmetszet súlypontjáig terjedő távolság; lásd értelemszerű változtatással a 4. ábrát).

A teljes acél keresztmetszet keresztmetszeti jellemzői:

$$A_{steff} = 48954\text{cm}^2$$

$$J_{steff} = 294759\text{cm}^4$$

$Z_{steff} = 10995\text{cm}$ (z_{steff}) a beton felső szélő szálától az összes acél keresztmetszet súlypontjáig terjedő távolság; lásd értelemszerű változtatással a 4. ábrát).

Feszültségek $M_{a,Ed} = -3300\text{ kNm}$ nyomatékból a gerinclemez szélő szálaiban

– Felső szálban:

$$\sigma_{waU} = \frac{3300 \cdot 10010,33}{226895} = 1474 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

– Alsó szálban:

$$\sigma_{waL} = \frac{-3300 \cdot 10072,67}{226895} = -1057 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Feszültségek $M_{c,Ed} = -5700\text{ kNm}$ nyomatékból a gerinclemez szélő szálaiban

– Felső szálban:

$$\sigma_{wclU} = \frac{5700 \cdot 10087,45}{294790} = 1916 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

– Alsó szálban:

$$\sigma_{wclL} = \frac{-5700 \cdot 10086,55}{294790} = -1674 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Az eredő feszültségek $M_{a,Ed}$ és $M_{c,Ed}$ nyomatékokból

$$\begin{aligned} \sum \sigma_{wU,eff} &= \sigma_{waU} + \sigma_{wclU} = 1474 + 1916 = 3390 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ \sum \sigma_{wL,eff} &= \sigma_{waL} + \sigma_{wclL} = -(1057 + 1674) = -2731 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ \max(\sum \sigma_{wU,eff}, \sum \sigma_{wL,eff}) &= 3390 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \\ \frac{f_y}{\gamma_{Rd}} &= \frac{355}{1,0} = 355 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ Megfelel!} \end{aligned}$$

5.3. REDUKÁLT FESZÜLTSEGEK MÓDSZERE

A k_τ horpadási tényező:

$$\begin{aligned} k_\tau &= 5,34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{h_w}\right)^2} \\ &= 5,34 + \frac{4}{\left(\frac{2400}{1740}\right)^2} = 7,44 \end{aligned}$$

Kritikus horpadási feszültség az egyenértékű lemezben:

$$\begin{aligned} \sigma_E &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w^2}{12(1-\nu^2) \cdot h_w^2} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 210001,2^2}{12(1-0,3^2) \cdot 1740^2} = 0,903 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

A kritikus feszültségek:

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,p} &= k_\tau \cdot \sigma_E = 2926,0903 = 2642 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \\ &\text{és} \\ \tau_{cr,t} &= k_\tau \cdot \sigma_E = 7,4430903 = 6,719 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

A szilárdsági és a stabilitási teherbírás minimális tehereszorókhoz szükséges feszültségek és mennyiségek:

$$\sigma_{x,Ed} = 26,24 \text{ kN/cm}^2 \quad \tau_{Ed} = 1,916 \text{ kN/cm}^2$$

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{2642}{26,24} = 1,01$$

$$\alpha_{cr,t} = \frac{\tau_{cr,t}}{\tau_{Ed}} = \frac{6,719}{1,916} = 3,507$$

Szilárdsági teherbírás minimális tehereszorója:

$$\alpha_{ult} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{26,24}{355}\right)^2 + 3\left(\frac{1,916}{355}\right)^2}} = 1,342 \text{ és}$$

Stabilitási teherbírás minimális tehereszorója:

$$\begin{aligned} \alpha_{cr,total} &= \frac{1}{\frac{1+\psi}{4\alpha_{cr,x}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi}{4\alpha_{cr,x}}\right)^2 + \frac{1-\psi}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,t}^2}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1+(-1,213)}{4 \cdot 1,01} + \sqrt{\left(\frac{1+(-1,213)}{4 \cdot 1,01}\right)^2 + \frac{1-(-1,213)}{2 \cdot 1,01^2} + \frac{1}{3,507^2}}} = 0,969 \end{aligned}$$

Igy a karcsúsági paraméter:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult}}{\alpha_{cr, total}}} = \sqrt{\frac{1,342}{0,969}} = 1,177$$

ρ redukciós faktor: ($\alpha_g = 0,21$ alakhiba tényező az „a” görbéből):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,177 - 0,055(3 - 1,213)}{1,177^2} = 0,775$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha_d(\bar{\lambda}_p - 0,2) + \bar{\lambda}_p^2}{2} = \frac{1 + 0,21(1,177 - 0,2) + 1,177^2}{2} = 1,295$$

Redukciós tényező:

$$\chi_p = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_p^2}} = \frac{1}{1,295 + \sqrt{1,295^2 - 1,177^2}} = 0,545$$

A kritikus feszültség *oszlopszerű* viselkedéshez:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w^2}{12(1 - \nu^2) \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000,2^2}{12(1 - 0,3^2) \cdot 240^2} = 0,475 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

A ξ tényező értéke esetünkben 1,00, ezért $\rho_x = 0,779$ [lásd a (35) és (36) összefüggéseket!]

Nyírás figyelembevétele:

$$\chi_w \frac{0,83}{\bar{\lambda}_p} = \frac{0,83}{1,178} = 0,705$$

A keresztmervítésekkel ellátott panel megfelel, mert;

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y}\right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{x,Ed}}{\chi_w f_y}\right)^2 = \left(\frac{2624}{0,779355}\right)^2 + 3 \left(\frac{1916}{0,705355}\right)^2 = 0,919 < 1$$

A számpéldából levonható következtetések

A kihasználtság a „hatékony keresztmetszetek” módszerével 89,2%, a „redukált feszültségek” módszerével 91,9%. Jelen tanulmány szerzője összehasonlító számításokat [8] végzett meglévő magyarországi hidakra is, ahol kb. a fenti kihasználtságok adódtak. Tehát megállapítható, hogy a „hatékony keresztmetszetek” eljárásával való tervezés gazdaságosabb szerkezetet eredményez, viszont meglévő szerkezet e módszerrel történő ellenőrzése kapcsán a magyar előírások szerint hajlításra/nyomásra túlzottan kihasznált szerkezeteknél nagy valószínűséggel mutatható ki teherbírás hiány.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

Jelen tanulmány a „hatékony keresztmetszetek” és a „redukált feszültségek” módszerét tárgyalta. Az első eljárás gyökeresen különbözik a magyar szabványokban korábban alkalmazottaktól; a rúdtengely irányú nyomásból és a hajlításból származó ellenállások meghatározá-

sára hivatott csupán; igénybevételeket használ, melyek kézi számításból, vagy rúdszerkezeti modellt alkalmazó véges elemes programokból kaphatóak. A „redukált feszültségek” módszere jórészt a megszokott, tradicionális elveinken alapszik; egy panel kétirányú, nyomásból és a hajlításból származó feszültségei és a nyírófeszültség kölcsönhatását képes kezelni. Mivel ez az eljárás feszültségekkel dolgozik, a napjainkban rendelkezésre álló véges elemes programcsomagok jelentős része alkalmazható használatánál. A 3. pontban bemutatott számpélda és több összehasonlító számítás is rámutat arra, hogy az első módszer használata tervezés esetén gazdaságosabb szerkezetet eredményez, viszont meglévő szerkezetre teherbírás hiányt mutathat ki.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen munka szerzője köszönetét fejezi ki dr. Köröndi László c. egyetemi docensnek a közölt számpélda lektorálásáért és a „redukált feszültségek” módszere értelmezésében nyújtott értékes segítségéért.

HIVATKOZÁSOK

- [1] MSZ EN 1993-1-1: Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és épületekre vonatkozó szabályok, 2005.
- [2] MSZ EN 1993-2: Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 2. rész: Acélhidak, 2009
- [3] MSZ EN 1993-1-5: Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1–5. rész: Lemezszerkezetek 2007.
- [4] MSZ EN 1994-2: Eurocode 4: Együttműködő, acél-beton öszvér-szerkezetek tervezése 2. rész: Általános és a hidakra vonatkozó szabályok, 2009
- [5] Ádány Sándor–Dulácska Endre–Dunai László–Fernezely Sándor–Horváth László: Acélszerkezetek. 1. Általános eljárások. Tervezés az Eurocode alapján. Springer Média Magyarország Kft. 2006. 88 oldal
- [6] Dunai László–Horváth László–Kovács Nauzika–Verőci Béla–Vigh László Gergely: Acélszerkezetek méretezése az Eurocode 3 alapján. Gyakorlati útmutató. Mérnöki Kamara Nonprofit Kht. 2009. 187 oldal
- [7] Kurt Klöppel–Karl Heinrich Möller: Beuelwerte ausgestifter Rechtechplatten. II. Band. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, München. 1968. 400 oldal
- [8] BME Hidak és Szerkezetek Tanszék: A hazai közúti hídállomány Eurocode szerinti megfelelősége. Kutatási jelentés. Öszvérhíd témafelelősök: Szabó Bertalan és Teiter Zoltán. Budapest. 2008.

SUMMARY

In Eurocode 3 the principles of defining moment-, shear- and plate buckling resistances of steel structural members substantially differ from those used in the Hungarian Standards. However, some new changes in standard MSZ EN 1993-1-5 partly consider the earlier design philosophies of plate buckling. Standard MSZ EN 1993-1-1 introduced four kinds of cross-sections (Class 1 to Class 4). In bridge engineering practice in most cases Class 3 and Class 4 type cross-sections are used. In the case of Class 4, the influence of plate buckling must be considered for the calculation of compression- and bending resistance. Standard MSZ EN 1993-1-5 and this study discuss two kinds of methods, namely the “effective area” and “reduced stress” methods. This paper briefly describes the steps of calculation, and compares the two methods in the text and in the frame a worked example.