



Diplomamunka előadás

Hosszbordával merevített gerinclemezes tartók
beroppanási ellenállásának vizsgálata

Bodor Dániel
2022. május 13.

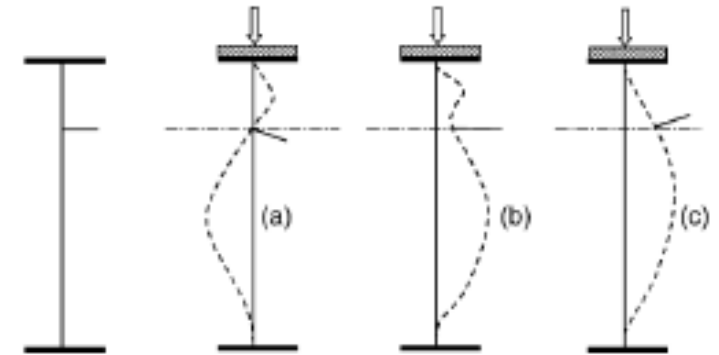
Konzulensek:

Dr. Kövesdi Balázs
BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Álló László
Tervezőmérnök, Főmterv Zrt.

A probléma ismertetése

- Hídépítési gyakorlatban a hídbetolás az egyik legelterjedtebb építési technika
- Függőleges merevítő borda → költséges, időigényes
- Főtartók alsó övéen fellépő koncentrált erők → beroppanás, méretezni kell rá!
- Jelenlegi (EC-szerinti) szabványos eljárás pontosságát számos publikációban bírálják
→ nagy szórás, egy hosszbordás kialakítás, tönkremeneteli módok egybefoglalása



Az EN1993-1-5 szerinti eljárás

- Csökkentő tényezős módszer
- Szakirodalmi ajánlások alapján módosítások: χ_F , l_y , k_F

Jelenlegi eljárás

$$F_{Rd} = \chi_F \cdot \frac{l_y \cdot f_{yw} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \leq 1.0$$

$$\chi_F = \frac{0.5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1.0$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot f_{yw} \cdot t_w}{F_{cr}}}$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$$

$$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} t_w} \quad \text{ahol } f_{yf} \text{ és } f_{yw} \text{ az öv és gerinclemez folyáshatára}$$

$$m_2 = 0.02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{ha } \bar{\lambda}_F > 0.5, \text{ egyébként zérus}$$

$$F_{cr} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(5.44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0.21\right) \cdot \sqrt{\gamma_s}$$

$$\gamma_s = 10.9 \cdot \frac{I_{sl}}{h_w \cdot t_w^3} \leq 13 \cdot \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \cdot \left(0.3 - \frac{b_1}{a}\right)$$



Szakirodalom alapján módosított

$$F_{Rd} = \chi_F \cdot \frac{l_y \cdot f_{yw} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \leq 1.0$$

$$\chi_F = \frac{1.0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1.0$$

$$\varphi_F = \frac{1}{2} (1 + \alpha_{F0} \cdot (\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot f_{yw} \cdot t_w}{F_{cr}}}$$

$$\alpha_{F0} = 0.75 \quad \bar{\lambda}_{F0} = 0.50 \quad \text{ha} \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{\frac{b_f}{t_w}})$$

$$k_F = 4.0 + 3.0 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.01 \cdot \frac{b_1}{t_w} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}}$$

$$k_F = 4 + 2 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.01 \cdot \frac{b_1}{t_w} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}}$$

$$\gamma_{s,min} = 13 \cdot \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \cdot \left(0.3 - \frac{b_1}{a}\right)$$

könnyebb kalibrálhatóság

nem befolyásoló tényezők elhagyása

Kövesdi [2]: zárt és nyitott
borda esetére k_F

minimális bordamerevség

Beroppanási ellenállást befolyásoló tényezők

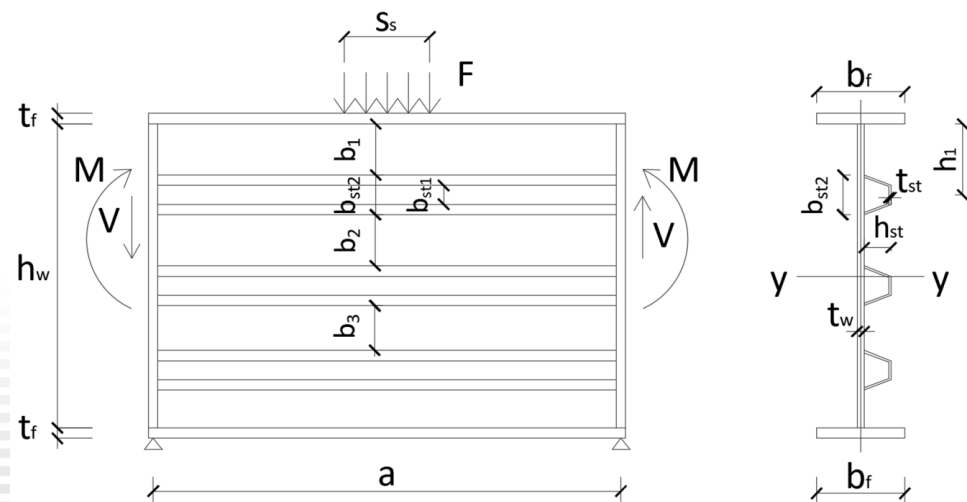
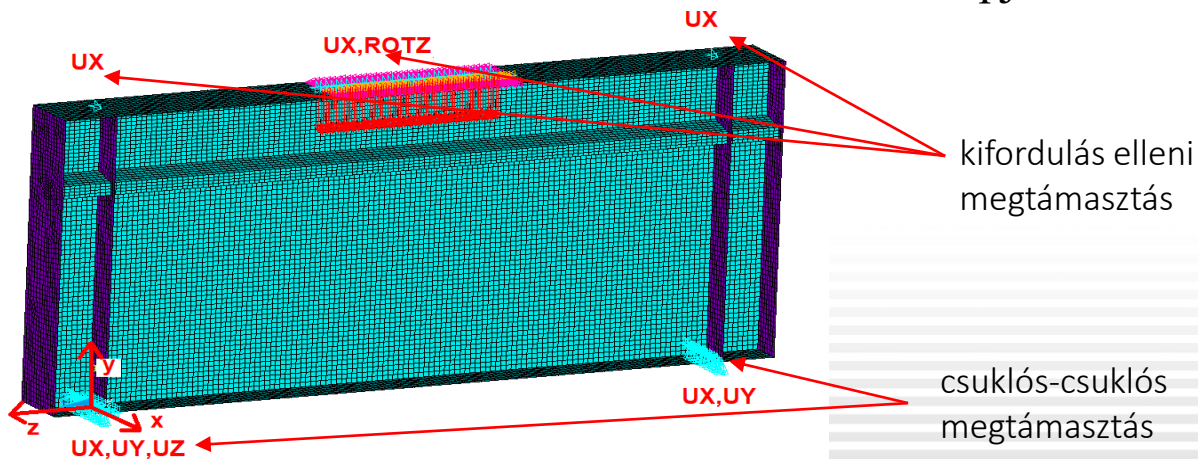
- Merevítőbordák merevsége (γ_s) $\rightarrow$ tönkremeneteli módban van szerepe
- Erőbevezetési hossz (s_s) $\rightarrow$ növelésével nő
- Gerinclemez vastagsága (t_w) $\rightarrow$ növelésével nő
- Merevített lemezmező magassága ($b_1, b_2, b_3..$) $\rightarrow$ csökkentésével nő

$$\gamma_{s,min} = 13 \cdot \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \cdot \left(0.3 - \frac{b_1}{a}\right)$$

	a [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	t_f [mm]	s_s [mm]	γ [-]	b_1/h_w [-]	b_1/b_2 [-]	h_w/t_w [-]	b_1/t_w [-]	s_s/a [-]
MIN	1200	1200	4	250	15	175	30	0,10	0,20 (0,40)	80	25	0,20
MAX	5000	4000	30	600	40	5000	2000	0,40	1,00 (1,25)	500	170	1,00

Befolyásoló tényezők vizsgálata – paraméteres numerikus modell

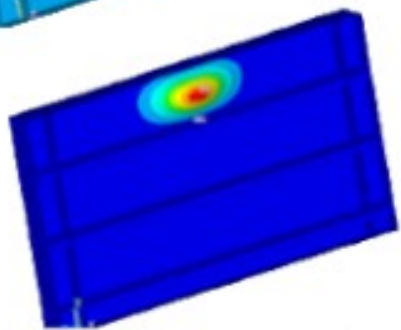
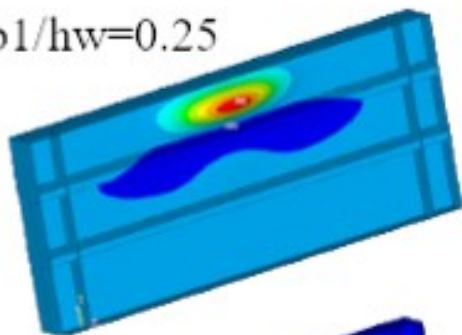
- Kiindulási modell: Dr. Kövesdi Balázs alapmodellje Ansys APDL programban, tovább fejlesztve
- Verifikálás: 1 bordás modellre. valós kísérletek alapján



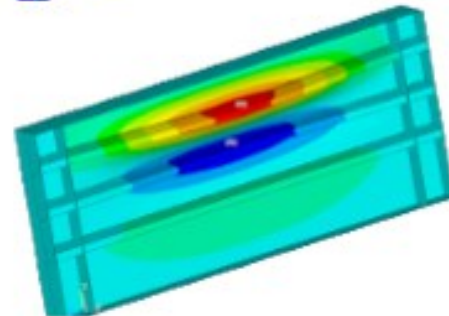
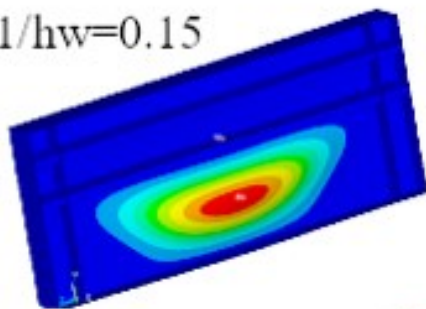
Befolyásoló tényezők vizsgálata – paraméteres numerikus modell – 2 és 3 hosszborða

- Paraméteres vizsgálat: 2-ill. 3 hosszborða (nyitott, illetve zárt) → „tökéletes” (imperfekció-mentes) modell
 - Eredmények jó egyezést mutattak Kövesdi [2] analitikus képleteivel
- Erőbevezetéshez közelebbi lemezmező beroppanására kidolgozva
- Gvakorlatban nem tudjuk, melyik lemezmező fog horgadni → közbelső mező horgadására analitikus képlet?

$b_1/hw=0.25$



$b_1/hw=0.15$



Kövesdi [2]: zárt és nyitott
borða esetére k_F horgadási tényező:

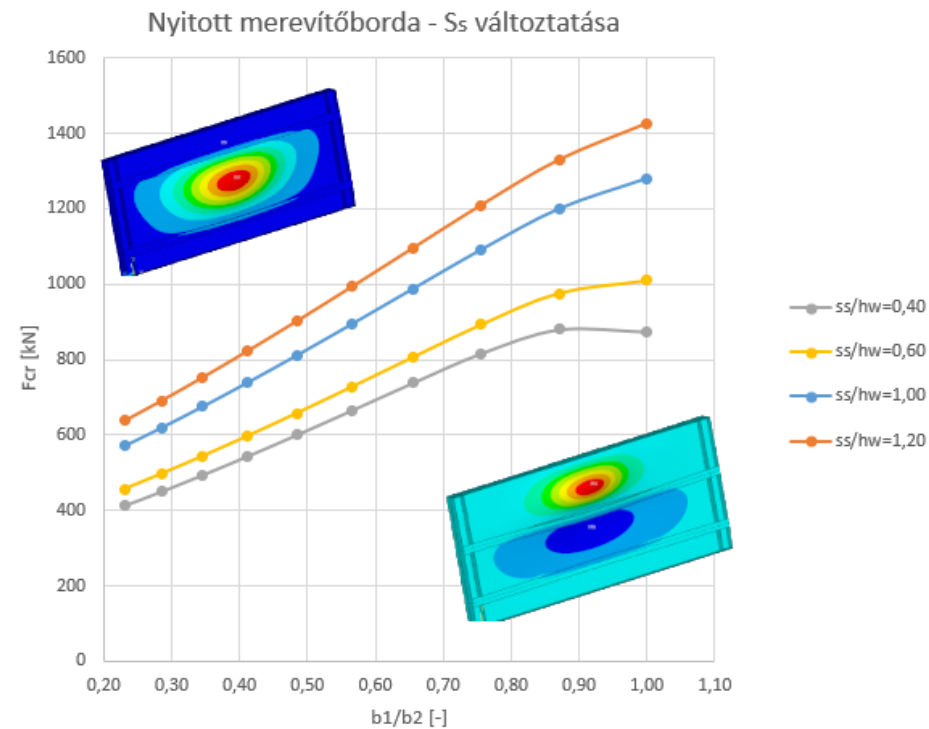
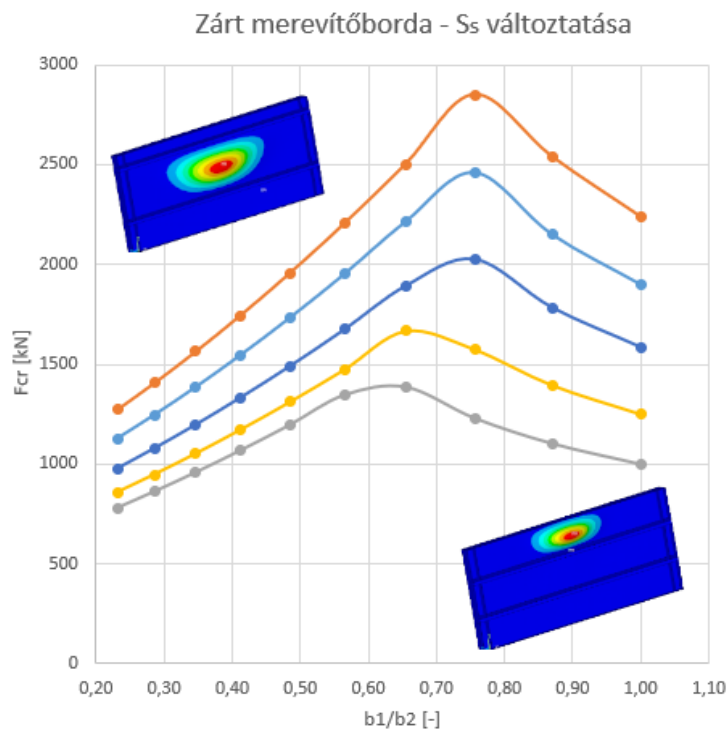
$$k_F = 4.0 + 3.0 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.01 \cdot \frac{b_1}{t_w} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}}$$

$$k_F = 4 + 2 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.01 \cdot \frac{b_1}{t_w} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}}$$



Közbenső lemezmező vizsgálata

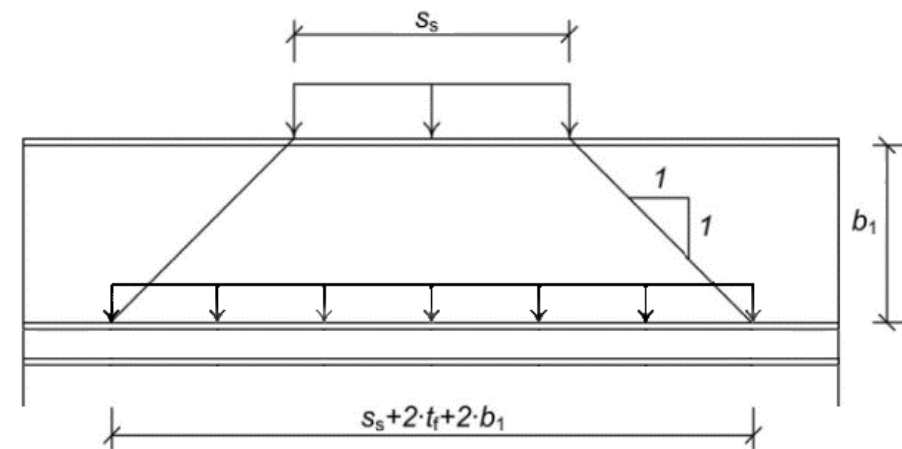
- Második merevítőborda fix → első „feltolása” → honnantól mértékadó a 2. lemezmező horpadása
- Alapmodell: $b_1/b_2=1.0$ → 10 lépcsőben b_1/b_2 csökkentése, 50 mm-es lépésekben
- Paraméterek változtatása: s_s , b_1 , t_w , h_w
- b_1 csökkentése → F_{cr} nő maximumpontig, majd csökkenni kezd → közbenső mező horpad



Közbenső lemezmező beroppanása – analitikus képlet F_{cr}

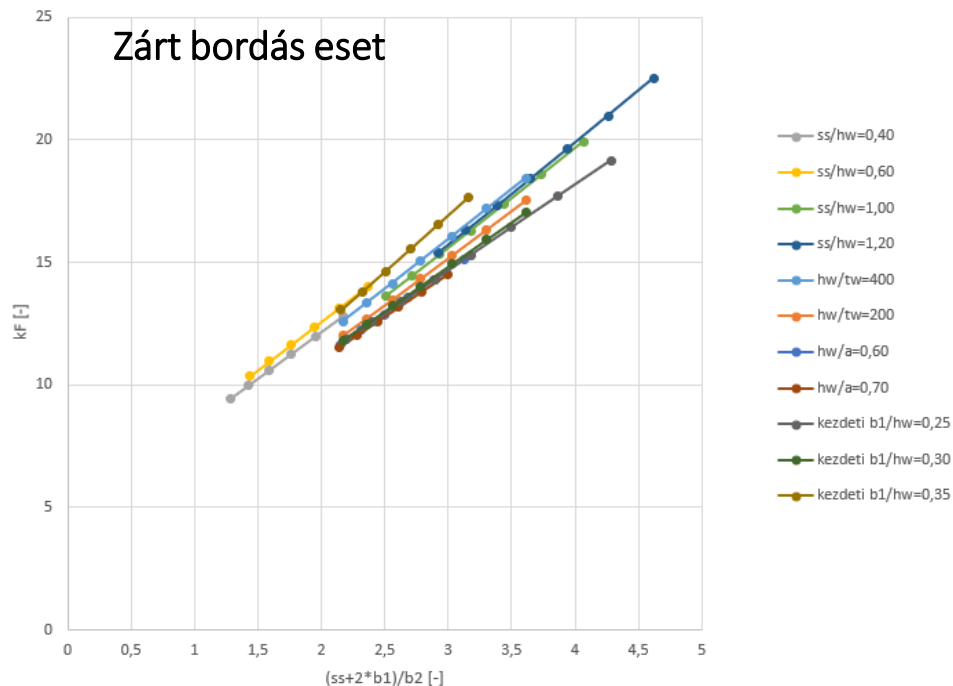
- Kiindulás: EC 3 - szerinti F_{cr} összefüggés
- F_{cr} ismert $\rightarrow$ visszaosztással k_F meghatározása
- k_F ábrázolása $(s_s+2b_1)/b_2$ arányszám függvényében
- 45°-os erőterjedés figyelembe vétele

$$F_{cr} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{b_1} \longleftrightarrow F_{cr} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{b_2}$$



Feltételezett 45°-os erőterjedés

- Lineáris összefüggés zárt- és nyitott bordás esetben is
- Biztonság javára „legalsó” egyenesek egyenletének közelítése



Közbenső lemezmező beroppanása – analitikus képlet F_{cr}

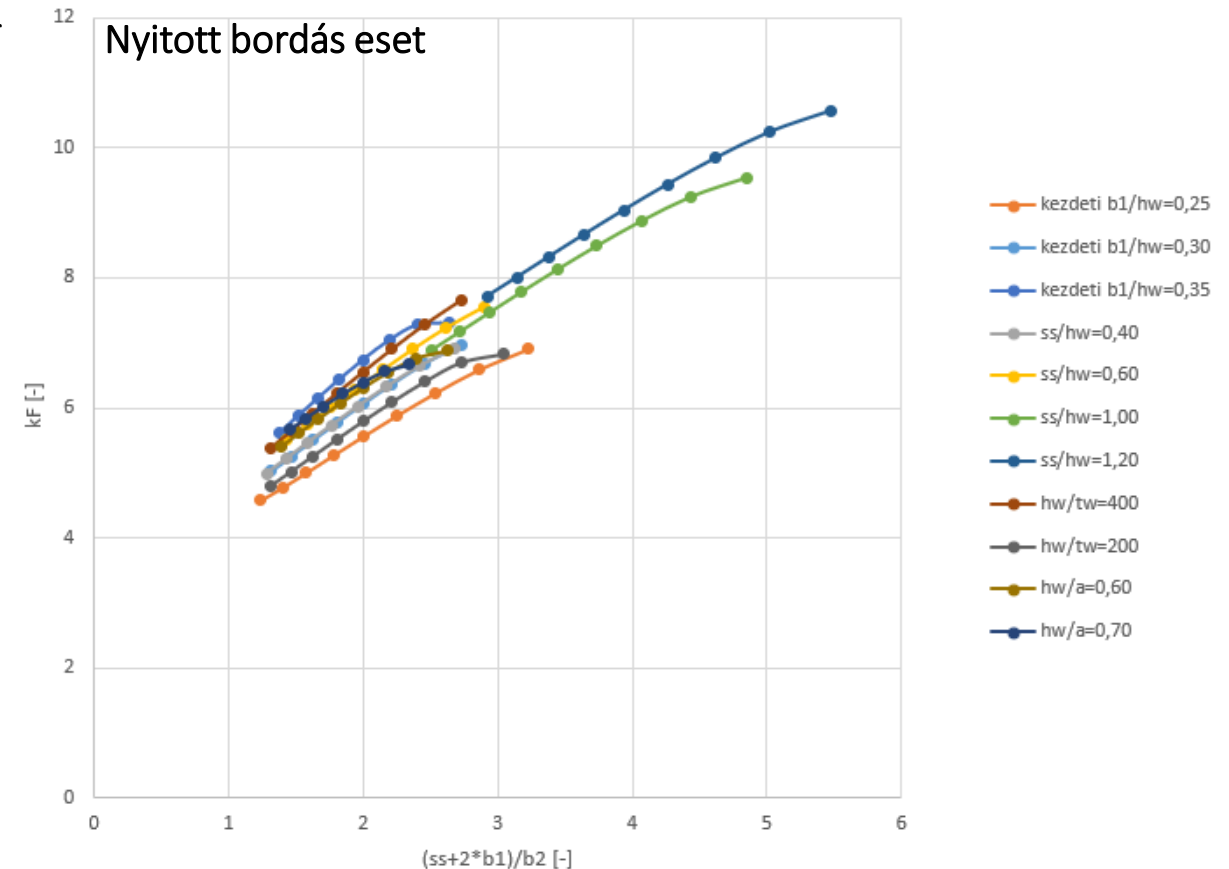
- Összefüggések pontossága:
- Zárt bordás eset: átl. eltérés -6%, módusz -2%, medián -7%, szórás 4.6%
- Nyitott bordás eset: átl. Eltérés -11%, módusz -15%, medián -12%, szórás 5.0%

k_F tényező zárt merevítőbordák esetén:

$$k_F = 3.6 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot b_1}{b_2} + 3.7$$

k_F tényező nyitott merevítőbordák esetén:

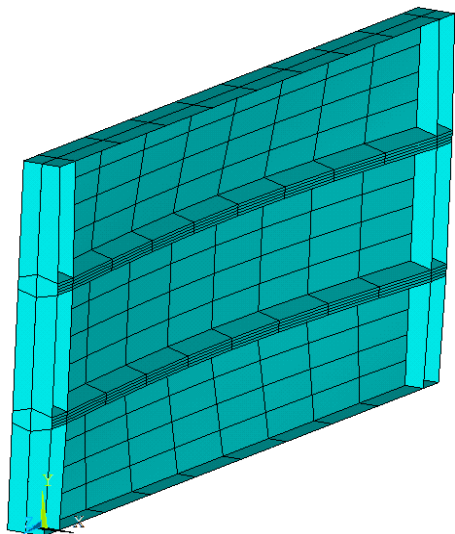
$$k_F = 1.2 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot b_1}{b_2} + 3.0$$



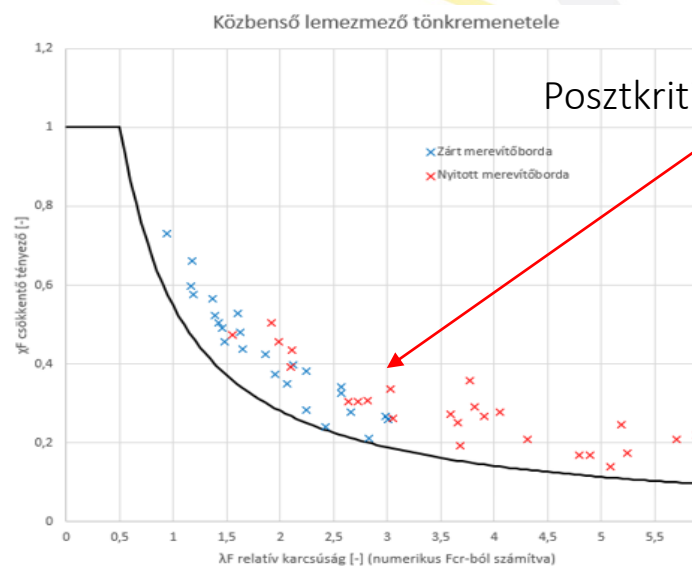
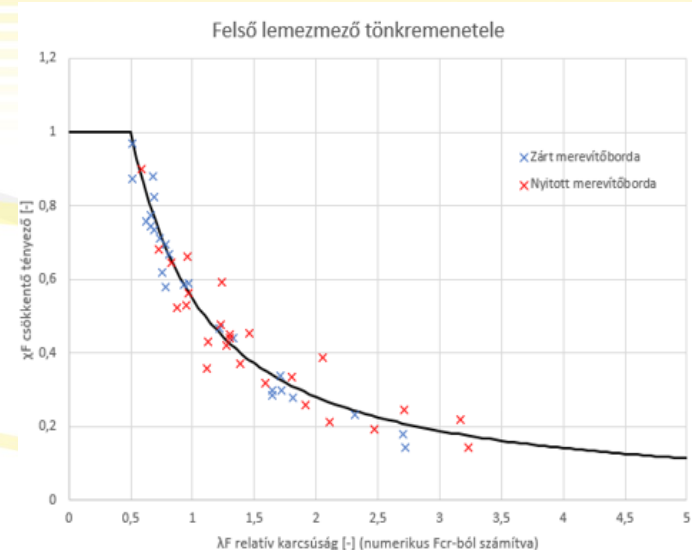
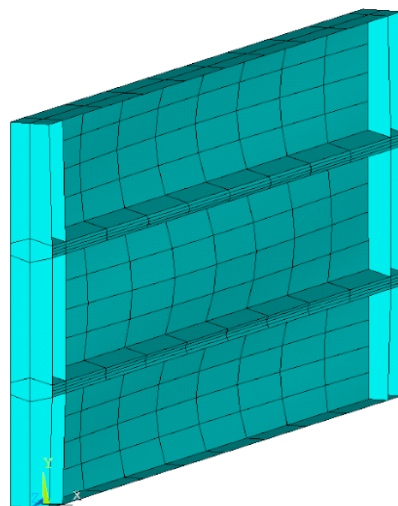
Beroppanási ellenállás meghatározása

- Valós viselkedés (geometriai imperfekciók; anyagi nemlinearitás)
- EC 3 javaslata alapján kézzel definiált helyettesítő geometriai imperfekciók → szinusz-hullám
- 50 modell, ahol a felső lemez, 50 modell, ahol a közbenső lemez horpad (nyitott-zárt bordák)

Globális imperfekció



Lokális imperfekció

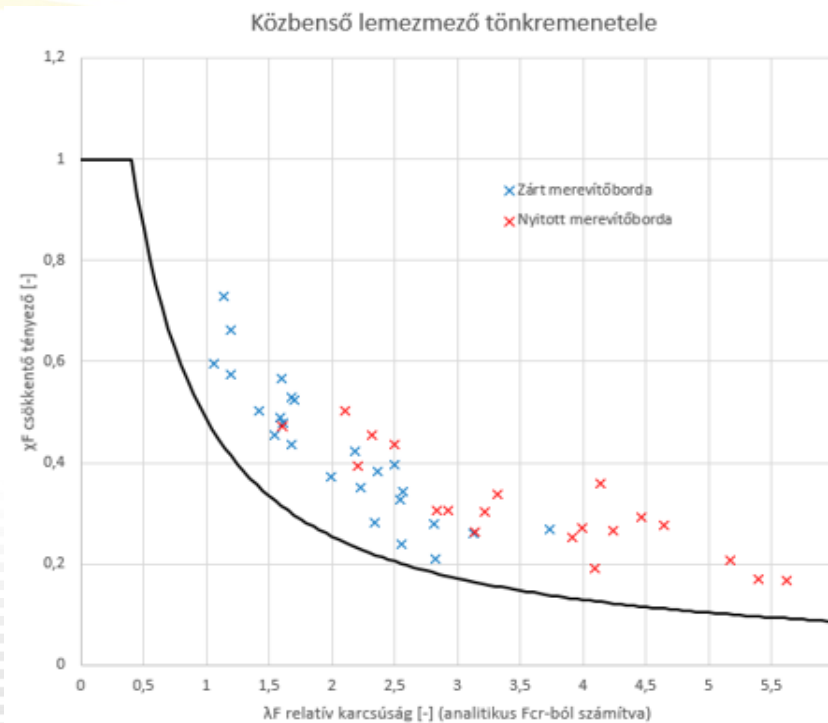
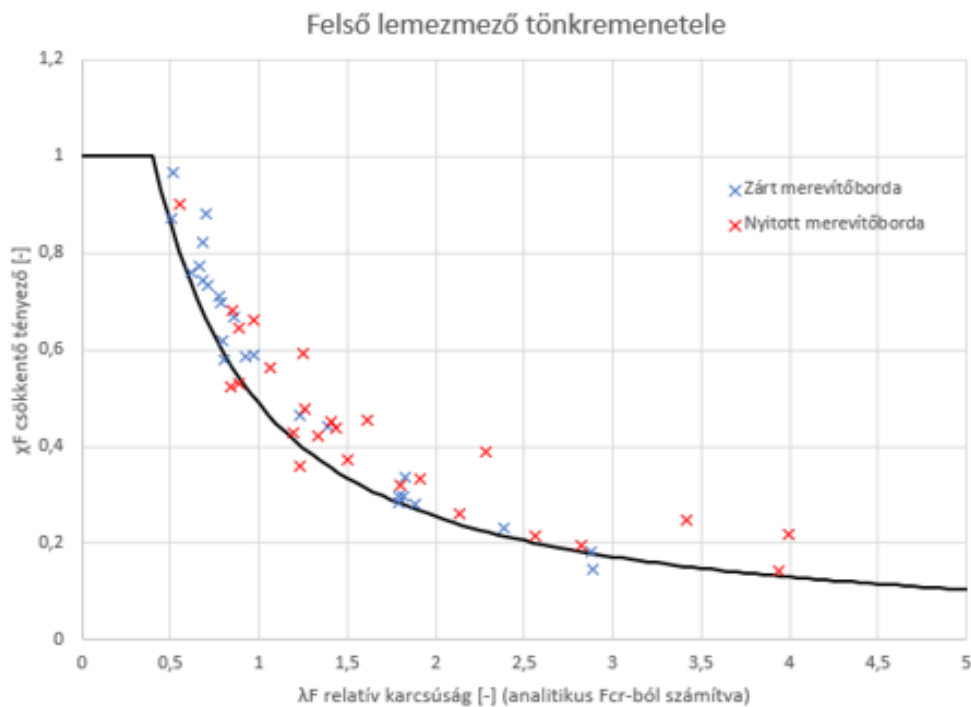


Csökkentő tényező görbe kalibrálása

- Analitikus F_{cr} -ből számított karcsúsággal kapott eredményekre kalibrált görbe
- Platóhossz és imperfekciós faktor módosítása: $\alpha_{F0}=0.90, \bar{\lambda}_{F0} = 0.40$

$$\varphi_F = \frac{1}{2} (1 + \alpha_{F0} \cdot (\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F)$$

$$\chi_F = \frac{1.0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1.0$$



Összefoglalás

- Összesen 750 modellen végzett virtuális kísérlet $\rightarrow F_{cr}$ és F_{ult}
- Jelenséget befolyásoló paraméterek: $\gamma_s, s_s, t_w, b_1, b_2$
- Kritikus erő számítása:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} k_{F,felső} &= 4 + 3 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.3 \cdot \frac{h_w}{b_1} \cdot \sqrt{\frac{s_s}{b_1}} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}} \\ k_{F,felső} &= 4 + 2 \cdot \frac{s_s}{b_1} - 0.01 \cdot \frac{b_1}{t_w} + 0.2 \cdot \sqrt[4]{\frac{b_f \cdot t_f^3}{b_1 \cdot t_w^3}} \end{aligned} \right\} F_{cr,felső} = 0.9 \cdot k_{F,felső} \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{b_1} \\
 & \left. \begin{aligned} k_{F,közbenső} &= 3.6 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot b_1}{b_2} + 3.7 \\ k_{F,közbenső} &= 1.2 \cdot \frac{s_s + 2 \cdot b_1}{b_2} + 3.0 \end{aligned} \right\} F_{cr,közbenső} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{b_2}
 \end{aligned}$$

$$F_{cr} = \min(F_{cr,felső}, F_{cr,közbenső})$$

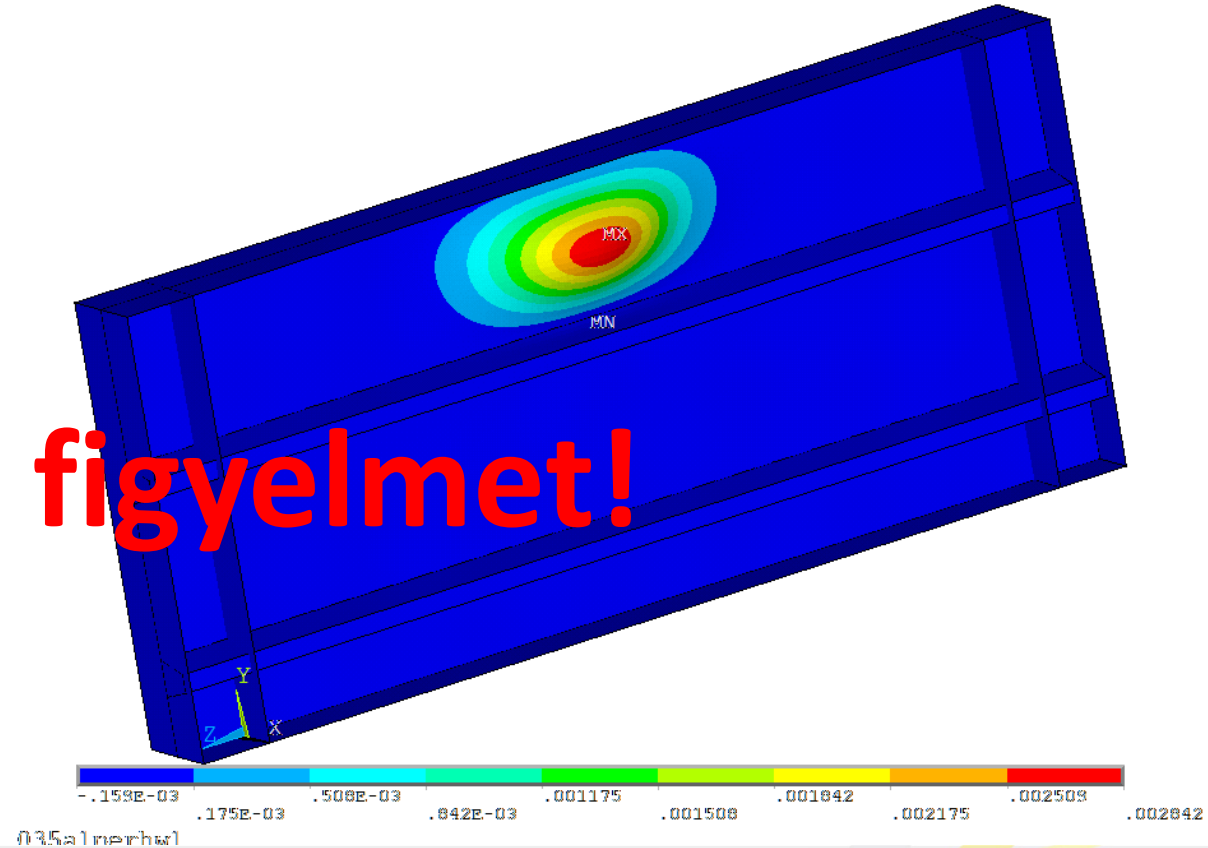
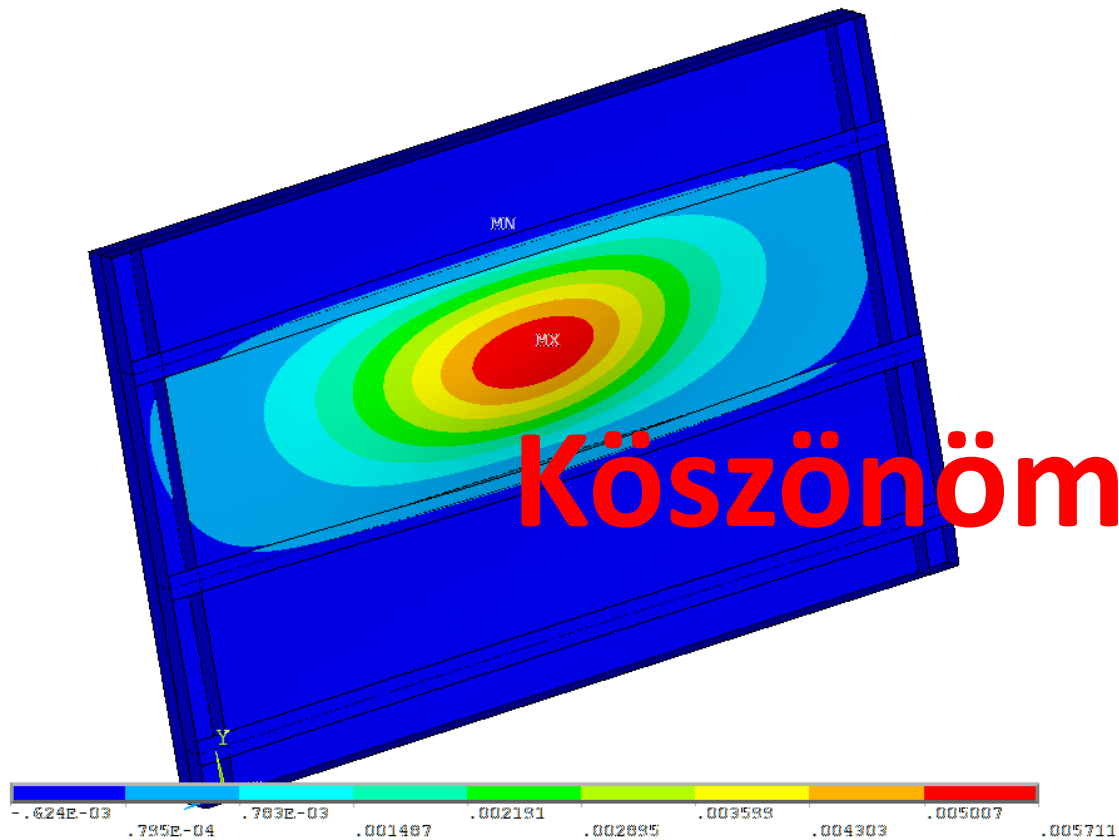
- Újrakalibrált csökkentő tényezős görbe:

$$\chi_F = \frac{1.0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1.0 \quad \varphi_F = \frac{1}{2} (1 + \alpha_{F0} \cdot (\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F) \quad \alpha_{F0} = 0.90 \quad \bar{\lambda}_{F0} = 0.40$$



Felhasznált irodalom

- [1] Szatmári Tibor - Nagyméretű acél hídszerkezetek mozgatásának kérdései és szerepe a természeti és épített környezet megóvásában, PhD értekezés, 2011.
- [2] Kövesdi Balázs - Patch loading resistance of slender plate girders with longitudinal stiffeners, JCSR, 2017



Köszönöm a figyelmet!