

26. Hegesztési Konferencia és Hegesztéstechnikai Kiállítás

2012. május 10–12.
Budapest



26. Hegesztési Konferencia

**Budapest
2012. május 10-12.**

Szerkesztette: Dr. Gáti József

Kiadó: Óbudai Egyetem
Felelős kiadó: Prof. Dr. Rudas Imre

ISBN: 978-615-5018-28-2

Nyomdai előkészítés: Óbudai Egyetem
Nagy Krisztina

Készült 150 példányban

HEGESZTETT NÉGYZETES CELLALEMEZ OPTIMÁLÁSA KÖLTSÉGMINIMUMRA

MINIMUM COST DESIGN OF WELDED SQUARE CELLULAR PLATE

Dr. Farkas József

emeritusz professzor, Miskolci Egyetem,
GÉIK, ALT, 3515 Miskolc,
Egyetemváros, E-mail: altfar@uni-
miskolc.hu

Dr. Jármái Károly

professzor, Miskolci Egyetem, GÉIK,
ALT, 3515 Miskolc, Egyetemváros, E-
mail: altjar@uni-miskolc.hu

Absztrakt: A cellalemezek két fedőlemezről és a közük hegesztett bordarácsból állnak. Egyik fő előnyük, hogy nagy csavarási merevségük miatt izotropokként számíthatók. A tanulmány ezt az előnyt használja fel csuklós kerületű, egyenletesen megoszló terhű négyzetes lemez optimális méretezésére. A méretezési feltételek a legnagyobb feszültségekre és lehajlásra vonatkoznak. Optimalandó ismeretlen a két fedőlemez vastagsága, a félbe vágott hengerelt I szelvényű bordák magassága és osztásszáma. A költségfüggvény az anyag-, összeállítási és hegesztési költségeket tartalmazza.

Abstract: The cellular plates consist of two cover plates and a welded rib grid. Their main advantage is that because of their high torsional stiffness they can be calculated than isotropic plates. The study uses this advantage for optimal sizing of the simply supported square plate, where the load is evenly distributed. The design constraints are the maximum deflection and stresses. The unknowns are the two cover plate thicknesses, the height of the half rolled I section as ribs and the number of ribs in two directions. In the cost function the material, welding and assembly costs are included

1. Bevezetés

A cellalemezek két fedőlemezről és a közük hegesztett bordarácsból állnak. Az egy oldalon bordázott lemezekkel szemben számos előnyük van. Nagy csavarási merevségük miatt kisebb bordamagasság szükséges, a varratok szimmetrikus elrendezése miatt sokkal kisebb a varratsugorodásból származó vetemedésük, sík felületeik miatt korrózió elleni védelmük sokkal könnyebb. Előnyeik miatt alkalmazhatók épületek födémeiben és tetőiben, tároló tartályok úszótetőiben, hidakban, hajók kettős fenékszerkezeteiben, gép- és járművázakban. Cellalemezekre vonatkozó tanulmányaink találhatóak a [1,2,3] könyvekben.

A cellalemezek egyik előnye, hogy nagy csavarási merevségük miatt izotropként számíthatók. A tanulmány ezt az előnyt használja fel a kerületén csuklósan támasztott, egyenletesen megoszló terhű négyzetes izotrop lemezre. Az erre vonatkozó Timoshenko-Woinowsky-Krieger [4] féle eredmények szerint a legnagyobb hajlító nyomaték

$$M_{\max} = 0.0479 pa^2 \quad (1)$$

és a legnagyobb lehajlás

$$w_{\max} = 0.00406 pa^4 / B \quad (2)$$

ahol p a teherintenzitás, a a négyzetes lemez oldalhossza, B a hajlítási merevség.

Az ortotrop lemezekre vonatkozó Huber-féle differenciálegyenletben a csavarási merevség

$$H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{\nu}{2}(B_x + B_y) \quad (3)$$

$\nu = 0.3$ a Poisson szám.

A hajlítási és csavarási merevségek cellalemezre

$$B_x = \frac{E_1 I_y}{a_y}; B_y = \frac{E_1 I_x}{a_x}; E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

$$B_{xy} = \frac{G I_y}{a_y}; B_{yx} = \frac{G I_x}{a_x}; G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

$$H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{\nu}{2}(B_x + B_y) = \frac{E_1}{2} \left(\frac{I_y}{a_y} + \frac{I_x}{a_x} \right) \quad (6)$$

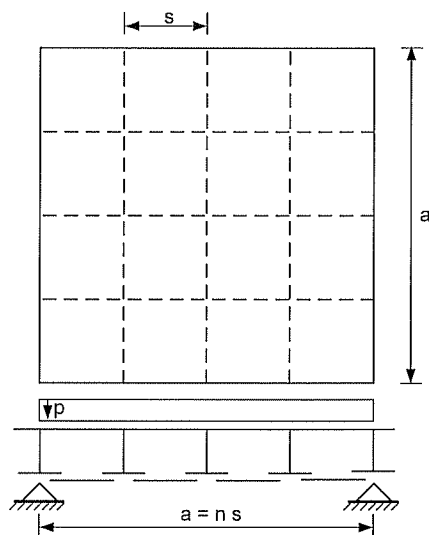
Négyzetes szimmetria esetén

$$I_y = I_x = I, a_y = a_x = a \quad (7)$$

$$H = \frac{E_1 I}{a} = B_x \quad (8)$$

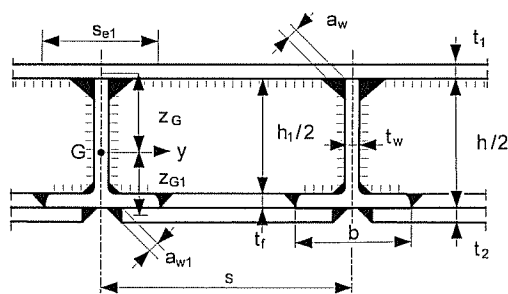
2. Geometriai jellemzők

Az 1. és 2. ábrán vázolt cellalemez esetén hajlításból a felső fedőlemezben nyomás keletkezik. Az ennek hatására keletkező horpadás megakadályozására együttdolgozó lemezszélességgel számolunk



1. ábra.

Csuklós kerületű négyzetes cellalemez n osztátszámú bordaráccsal



2. ábra.

A cellalemez keresztmetszete a félbevágott hengerelt I szelvényű bordákkal

$$s_{e1} = \rho s, s = \frac{a}{n} \quad (9)$$

Az Eurocode 3 [5] szerint

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0.22}{\lambda_p^2}, \lambda_p = \frac{s}{56.8 \varepsilon t_1}, \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (10)$$

Az egy osztásnak megfelelő keresztmetszeti terület

$$A_e = \frac{h_1 t_w}{2} + b t_f + s_{e1} t_1 + s t_2 \quad (11)$$

$$h_1 = h - 2t_f \quad (12)$$

h a hengerelt I szelvény teljes magassága. A G súlypont távolsága

$$z_G = \frac{1}{A_e} \left[\frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} \right) + b t_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} \right) + s t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} \right) \right] \quad (13)$$

Az alsó szélső szál távolsága

$$z_{G1} = \frac{h_1}{2} + t_f + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} - z_G \quad (14)$$

A másodrendű nyomaték

$$I_{ye} = s_{e1} t_1 z_G^2 + \frac{h_1^3 t_w}{96} + \frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} - z_G \right)^2 + I_{y1} \quad (15a)$$

$$I_{y1} = b t_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} - z_G \right)^2 + s t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} - z_G \right)^2 \quad (15b)$$

3. Méretezési feltételek

A felső fedőlemez s oldalhosszúságú, befogott kerületű négyzetes izotrop elemei a teherből helyi hajlítást kapnak. Timoshenko és Woinowsky-Krieger [4] szerint a legnagyobb hajlító nyomaték ebből a hatásból

$$M_L = 0.0513 p_0 s^2, \quad p_0 = \gamma_M p, \gamma_M = 1.5 \quad (16)$$

γ_M biztonsági tényező.

Az ebből származó feszültség

$$\sigma_L = \frac{M_L}{t_1^2 / 6} \quad (17)$$

A felső fedőlemezekre vonatkozó feszültségi feltétel

$$\sigma_{\max 1} = \frac{M_{\max z_G}}{I_{ye}} + \sigma_L \leq f_y \quad (18)$$

$$M_{\max} = \left(p_0 + 1.1 \rho_1 \frac{V}{a^2} \right), \rho_1 = 7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3 \quad (19)$$

A második tag a saját tömeg hatását fejezi ki, ahol a szerkezet térfogata

$$V = 2a(n+1) \left(\frac{ht_w}{2} + bt_f \right) + a^2(t_1 + t_2) \quad (20)$$

$n+1$ a bordák száma beleértve a kerületi bordákat is.

Az alsó fedőlemezre vonatkozó feszültségi feltétel

$$\sigma_{\max 2} = \frac{M_{\max} z_{G1}}{I_{ye}} \leq f_y \quad (21)$$

A lehajlási feltétel

$$w_{\max} = 0.00406 \frac{pa^4}{B_x} \leq w_{\text{allow}} = \frac{a}{\Phi}, \Phi = 300 \quad (22)$$

$$B_x = \frac{E_1 I_{ye}}{s}, E_1 = \frac{E}{1-\nu^2}, \nu = 0.3 \quad (23)$$

4. Gyártási feltétel

A bordáknak a felső fedőlemezhez való hegesztését úgy tesszük lehetővé, hogy a bordák övei között megfelelő, legalább 300 mm nagyságú távolságot hagyunk szabadon, vagyis

$$s - b \geq 300 \text{ mm} \quad (24)$$

Ez a feltétel megszabja a legnagyobb bordaszámot.

5. Szám adatok

A lemez befoglaló mérete $a = 12000$ mm, terhelése $p = 500 \text{ kg/m}^2 = 5 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$, az acél folyáshatára $f_y = 355 \text{ MPa}$

6. Költségfüggvény

A költségfüggvényt a gyártási folyamatnak megfelelően írjuk fel.

- (1) A felső fedőlemez hegesztése 16 elemből, egyenként 1500x6000 mm mérettel, fedett ívű hegesztésű tompavarratokkal. Varrathossz $L_{w1} = 8a$, az összeszerelt elemek száma $\kappa_1 = 16$, a szerkezet-térfogat $V_1 = a^2 t_1$, az összeszerelés nehézségi fokának tényezője $\Theta = 2$, a hegesztési költség

$$K_{w1} = k_w \left(C_1 \Theta \sqrt{\kappa_1 \rho V_1} + 1.3 C_w a_w^{n_1} L_{w1} \right), C_1 = 1 \text{ min/kg}^{0.5} \quad (25)$$

$$t_1 > 15 \text{ mm esetén } C_w a_w^{n_1} = 0.1346 \times 10^{-3} t_1^2 \quad \dots\dots\dots (26a)$$

$$t_1 < 15 \text{ mm esetén } C_w a_w^{n_1} = 0.1033 \times 10^{-3} t_1^{1.94} \quad (26b)$$

a hegesztési költség-tényező $k_w = 1.0 \text{ \$/kg}$.

- (2) A félbevágott hengerelt I szelvényű bordák hegesztése egyik irányban a felső fedőlemezhez fedett ívű hegesztésű kettős sarokvarratokkal. A bordák száma $n+1$, $\kappa_2 = n+2$, $L_{w2} = 2a(n+1)$

$$V_2 = V_1 + a(n+1) \left(\frac{h_1 t_w}{2} + b t_f \right) \quad (27)$$

$$K_{w2} = k_w \left(\Theta \sqrt{\kappa_2 \rho V_2} + 1.3 \times 0.2349 \times 10^{-3} a_w^2 L_{w2} \right) \quad (28)$$

$$a_w = 0.4 t_w, \rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$$

- (3) A megszakított bordák merőleges irányban való hegesztése a felső fedőlemezhez és az előző bordákhoz, a gerincek hegesztése kettős sarokvarratokkal, az övek hegesztése tompavarratokkal

$$\kappa_3 = 1 + n(n+1), V_3 = V_2 + a(n+1) \left(\frac{h_1 t_w}{2} + b t_f \right) \quad (29)$$

A sarokvarratok hossza

$$L_{w3} = 2a(n+1) + n(n+1)(h_1 + b) \quad (30)$$

$$K_{w3} = k_w \left(\Theta \sqrt{\kappa_3 \rho V_3} + 1.3 \times 0.3394 \times 10^{-3} a_w^2 L_{w3} + 1.3 C_{wf} t_f^{n_2} L_{wf} \right) \quad (31)$$

$$t_f > 15 \text{ mm esetén } C_{wf} t_f^{n_2} = 0.1496 \times 10^{-3} t_f^{1.9029} \quad (32a)$$

$$t_f < 15 \text{ mm esetén } C_{wf} t_f^{n_2} = 0.1939 \times 10^{-3} t_f^2 \quad (32b)$$

$$L_{wf} = 2bn(n+1) \quad (33)$$

- (4) Az $s_x s_x$ méretű alsó fedőlemezmezők hegesztése a bordák öveihez fedett ívű hegesztésű sarokvarratokkal

$$\kappa_4 = 1 + n^2, L_{w4} = 4an, V_4 = V_3 + a^2 t_2 \quad (34)$$

$$K_{w4} = k_w \left(\Theta \sqrt{\kappa_4 \rho V_4} + 1.3 \times 0.2348 \times 10^{-3} a^2 L_{w4} \right) \quad (35)$$

$$a_{w1} = 0.7 t_2.$$

$$\text{Az anyagköltség } K_M = k_M \rho V_4, k_M = 1.0 \text{ \$/kg} \quad (36)$$

$$\text{A teljes költség } K = K_M + K_{w1} + K_{w2} + K_{w3} + K_{w4} \quad (37)$$

7. Optimális méretezés és eredményei

Négy változót (h, n, t_1, t_2) kell optimalálni, hogy minimáljuk a V_4 szerkezet-térfogatot valamint a K költséget a feltételek betartása mellett. A félbe vágott hengerelt I szelvények UB (Universal Beam) méretválasztékát az Arcelor katalógusból választottuk ki az 1. táblázat szerint.

1. táblázat. Választott UB profilok, méretek mm-ben

Profil	H	b	t_w	t_f
UB 305x102x28	308.7	101.8	6.0	8.8
UB 356x127x39	353.4	126.0	6.6	10.7
UB 457x152x60	454.6	152.9	8.1	13.3
UB 533x210x92	533.1	209.3	10.1	15.6
UB610x229x113	607.6	228.2	11.1	17.3

Csak egész-számú lemezvastagságokat veszünk figyelembe $t_{\min} = 4, t_{\max} = 40$ mm határok között, osztás-számokra $n_{\min} = 3$, az n_{\max} értéket a gyártási feltétel szabja meg.

Az optimumokat Mathcad programmal, szisztematikus kereséssel állapítottuk meg. A 2. táblázat tünteti fel a térfogat- illetve költség-minimumokat a választott UB profilok sorrendjében

2. táblázat. Térfogat- illetve költség-minimumok a választott UB profilok szerint. Az abszolút minimumokat vastag számokkal jelöltük. Méretek mm-ben, feszültségek MPa-ban, térfogat mm^3 -ben, költségek \$-ban. Határfeszültség

$$f_y = 355 \text{ MPa, megengedett lehajlás } w_{\text{allow}} = 40 \text{ mm. } K_w = \sum_{i=1}^4 K_{wi} \text{ a teljes hegesztési költség}$$

h	n	t_1	t_2	$\sigma_{\max 1}$	$\sigma_{\max 2}$	w	$V_4 \times 10^{-9}$	K_M	K_w	K
308.7	7	11	4	183	89	39.6	2.500	19620	9374	29000
	16	7	4	160	79	39.9	2.306	18100	15520	33630
353.4	7	9	4	241	76	38.0	2.341	18380	8810	27190
	9	8	4	217	73	37.0	2.315	18170	10280	28450

454.6	5	9	4	326	60	28.0	2.414	18950	7689	26640
	8	6	4	340	57	33.0	2.254	17690	9783	27480
533.1	6	7	4	350	48	23.0	2.558	20080	9097	29180
607.6	5	8	4	336	41	16.0	2.754	21620	8904	30530

Az optimumok a következők: minimális térfogatra $h = 454.6$, $n = 8$, $t_1 = 6$, $t_2 = 4$, minimális költségre $h = 454.6$, $n = 5$, $t_1 = 9$, $t_2 = 4$ mm. A különbséget az okozza, hogy a hegesztési költség a teljes költség jelentős hányadát képezi (K_w/K több mint 30%).

Látható továbbá, hogy kisebb h értékek esetén a lehajlási, nagyobb h értékeknél a feszültségi feltétel aktív.

8. Következtetések

Négyzetes cellalemezek esetén a csavarási merevség megegyezik a hajlítási merevséggel, ezért a cellalemez hajlító nyomatéka és lehajlása izotropként számítható.

Kis magasságú cellalemezek előnyösen gyárthatók félbevágott hengerelt I szelvényű bordákkal. A bordák gerinclemeze kis méretű sarokvarratokkal hegeszthető a felső fedőlemezhez, az alsó fedőlemezmezők pedig szintén kis méretű sarokvarratokkal hegeszthetők a bordák öveihez.

A négy változó optimális értékeit Mathcad programmal úgy határoztuk meg, hogy minimálják a szerkezet-térfogatot illetve költségek a méretezési és gyártási feltételek betartása mellett.

A minimális térfogathoz illetve minimális költséghez tartozó optimális értékek sok esetben nem egyeznek meg egymással, ezt a különbséget a magas hegesztési költségek okozzák.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/konv-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alap OTKA T 75678 támogatásával készült.

Irodalmi hivatkozások

- [1] J.FARKAS, K.JÁRMAI: Analysis and optimum design of metal structures. Rotterdam, Brookfield, Balkema, 1997.
- [2] J.FARKAS, K.JÁRMAI: Economic design of metal structures. Rotterdam, Millpress, 2003.
- [3] J.FARKAS, K.JÁRMAI: Design and optimization of metal structures. Chichester, Horwood Publishing, 2008.
- [4] S.TIMOSHENKO, S.WOINOWSKY-KRIEGER: Theory of plates and shells. New York, etc. McGraw Hill, 1959.

- [5] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. ENV 1993-1-5. (2007).