

HEGESZTETT T-BORDÁK ALKALMAZÁSA NÉGY SARKUKON TÁMASZTOTT CELLALEMEZEK MINIMÁLIS KÖLTSÉGRE VALÓ MÉRETEZÉSÉHEZ

APPLICATION OF WELDED T-STIFFENERS IN THE MINIMUM COST DESIGN OF CELLULAR PLATES SUPPORTED AT FOUR CORNERS

Dr. Farkas József*

ABSTRACT

Cellular plates consist of two face plates and a grid of stiffeners welded between them. The cells produce a large torsional stiffness, thus, the cellular plates can be calculated as isotropic ones. In previous studies the author has designed cellular plates with halved rolled I-stiffeners. In the present study these rolled stiffeners are replaced by welded T-stiffeners. Constraints on stresses, deflection, stiffeners web buckling and fabrication are formulated. The cost function contains the cost of material, assembly, welding and painting. The optima are found by a systematic search using a MathCAD algorithm. Mass and cost savings can be achieved by using welded T-stiffeners instead of rolled ones.

$$B_{xy} = \frac{GI_y}{a_y}; B_{yx} = \frac{GI_x}{a_x}; G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{\nu}{2}(B_x + B_y) = \frac{E_1}{2} \left(\frac{I_y}{a_y} + \frac{I_x}{a_x} \right) \quad (5)$$

Négyszetszimmetrikus lemezekre

$$H = B_x = B_y \quad (6)$$

Tehát a cellalemezek csavarási merevsége megegyezik a hajlításival, ezért a cellalemezek izotropként számíthatók.

1. CELLALEMEZ HAJLÍTÁSI ÉS CSAVARÁSI MEREVSÉGE

Ortotrop lemezek Huber féle differenciálegyenlete síkjukra merőleges egyenletesen megoszló teher esetén

$$B_x w'''' + 2Hw'''' + B_y w'''' = p \quad (1)$$

ahol

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

Az ortotrop lemez csavarási merevsége. Ebben

$$B_x = \frac{E_1 I_y}{a_y}; B_y = \frac{E_1 I_x}{a_x}; E_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (3)$$

cellalemezekre

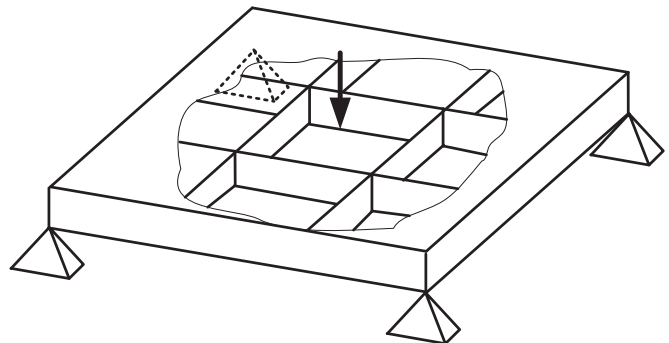
2. HAJLÍTÓ NYOMATÉKOK ÉS LEHAJLÁS

Lee és szerzőtársai [1] a (1) egyenletet polinóm függvényvel megoldották négy sarkukon alátámasztott lemezekre. Négyszetszimmetrikus lemezek legnagyobb hajlító nyomatéka

$$M_{max} = 0.15pL^2 \quad (7)$$

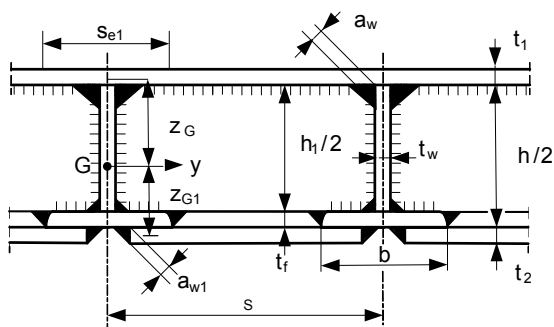
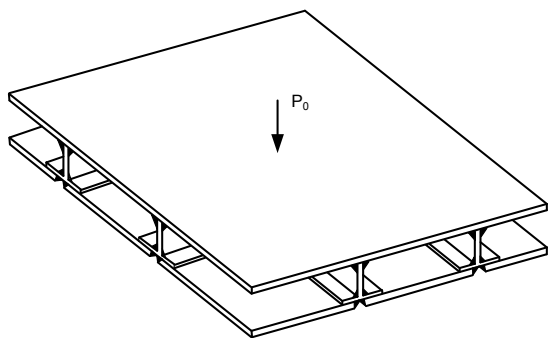
és legnagyobb lehajlása

$$w_{max} = 0.025p_0L^4/B_x \quad (8)$$



1. ábra. Négy sarkán támasztott cellalemez

*professzor emeritus, Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszéke



2. ábra. Cellalemez és a hegesztett T-szelvényű bordák méretei

L a lemez oldalhossza, p_0 az egyenletesen megoszló teher biztonsági tényezővel szorzott intenzitása, p a teherintenzitás, melyben figyelembe vesszük a saját tömeget is.

Izotrop négyzetlemezre Timoshenko & Woinowsky-Krieger [2] $\nu = 0.3$ esetére az alábbiakat vezette le

$$M_{max} = 0.1404pL^2 \quad (9)$$

$$w_{max} = 0.0249p_0L^4/B_x \quad (10)$$

Látható, hogy a számértékekben nincs nagy különbség.

3. GEOMETRIAI JELLEMZŐK

A hajlításból a cellalemez felső lemezrészében nyomás keletkezik. Ezek horpadását együtdolgozó lemezszélességgel küszöböljük ki. Az Eurocode 3 (2007) [3] szerint

$$s_e = \rho s, s = \frac{a}{n} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0.22}{\lambda_p^2}, \lambda_p = \frac{s}{56.8et_1}, \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (12)$$

n a bordaosztások száma, f_y a folyáshatár.

Egy T-borda keresztmetszeti területe

$$A_s = \frac{h_1 t_w}{2} + bt_f, \quad h_1 = h - 2t_f \quad (13)$$

Egy lemez-szekcióra

$$A = s_e t_1 + at_2 + A_s, \quad a = \frac{L}{n+1} \quad (14)$$

Súlyponti távolságok

$$z_G = \frac{1}{A} \left[at_2 \left(\frac{h}{2} + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \right) + bt_f \left(\frac{h_1 + t_1 + t_f}{2} \right) + \frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} \right) \right] \quad (15)$$

$$z_{G1} = \frac{h + t_1 + t_2}{2} - z_G \quad (16)$$

Másodrendű nyomaték

$$I_y = s_e t_1 z_G^2 + at_2 z_{G1}^2 + bt_f \left(\frac{h_1 + t_1 + t_f}{2} - z_G \right)^2 + I_{y1} \quad (17)$$

$$I_{y1} = \frac{h_1^3 t_w}{96} + \frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} - z_G \right)^2 \quad (18)$$

Hajlítási merevség

$$B_x = \frac{E_1 I_y}{a}, E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (19)$$

Az egyes gyártási fázisoknak megfelelő szerkezet-térfogatok

$$V_1 = L^2 t_1, V_2 = V_2 + (n+2)A_s L, V_3 = V_2 + (n+2)A_s L \quad (20)$$

$$V_4 = V_3 + L^2 t_2 \quad (21)$$

Teherintenzitás a saját tömeg figyelembe vételével

$$p = p_0 + \frac{\rho_0 V_4}{L^2} \quad (22)$$

4. MÉRETEZÉSI FELTÉTELEK

4.1. Feszültségi feltételek

A külső teherből a felső lemezrészében helyi hajlító nyomatékok is keletkeznek. A kerületén befogott izotrop lemez legnagyobb hajlító nyomatéka Timoshenko & Woinowsky-Krieger [2] szerint

$$\sigma_p = 0.0513 \frac{p_0 a^2}{t_1^2 / 6} = 0.3078 \frac{p_0 a^2}{t_1^2} \quad (23)$$

A feszültségi feltétel a kétféle feszültség összegezésével

$$\sigma_2 = \frac{0.15 p L^2 z_G}{I_y} + \sigma_p \leq \frac{f_y}{1.1} \quad (24)$$

Az alsó fedőlemez feszültségi feltétele

$$\sigma_1 = \frac{0.15 p L^2 z_{G1}}{I_y} \leq \frac{f_y}{1.1} \quad (25)$$

A lehajlási feltétel

$$w_{\max} = \frac{0.025 p_0 L^4}{B_x} \leq w_{\text{allow}} = \frac{L}{300} \quad (26)$$

Nyírófeszültségi feltétel a támaszoknál

$$\tau = \frac{p L^2}{4 h_1 t_w} \leq \frac{f_y}{1.1 \sqrt{3}} \quad (27)$$

4.2. A T-bordák gerinclemez-horpadási feltétele

Az Eurocode 3-1-5 [3] szerint lineárisan változó normálfeszültségekre

$$\frac{0.15 p L^2 z_G}{I_y} \leq C_x f_y \quad (28)$$

ahol

$$C_x = 1 \text{ ha } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (29a)$$

$$C_x = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ ha } \bar{\lambda}_p \geq 0.673 \quad (29b)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_1 / 2}{t_w} \frac{1}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (30)$$

ha $-1 \leq \psi < 0$

$$k_\sigma = 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 \quad (31)$$

$$\psi = -\frac{h_1 / 2 - z_G}{z_G} \quad (32)$$

4.3. Gyártási feltételek

Lemezvastagság-korlátozás: $t_{\min} = 4 \text{ mm}$.

A bordagerincek hegesztésének megkönnyítése érdekében biztosítani kell a megfelelő szabad helyet a bordaövek között:

$$a - b \geq 300 \text{ mm} \quad (33)$$

5. VÁLTOZÓK

A bordák száma egy irányban (négyzetes szimmetria) n fedőlemezek vastagsága t_1 and t_2 , bordák magassága $h/2$.

6. SZÁMADATOK

$L = 18 \text{ m}$, $p_0 = 150 \text{ kg/m}^2 = 0.0015 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 355 \text{ MPa}$, rugalmassági modulus $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, Poisson szám $\nu = 0.3$, acél térfogatsúly $\rho = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, $\rho_0 = 7.85 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$. $b = 30 \text{ mm}$ és $t_f = t_2$.

7. KÖLTSÉGFÜGGVÉNY

A költségfüggvényt a gyártási fázisoknak megfelelő sorrendben fogalmazzuk meg [4,5]

(a) A $18 \times 18 \text{ m}$ méretű felső fedőlemez hegesztése 36 ($6 \times 1.5 \text{ m}$ méretű) darabból CO_2 hegesztésű tempavarratokkal

$$K_{w1} = k_w \left[\Theta \sqrt{36 \rho V_1} + 1.3 C_1 t_1^{n1} 13 L \right] \quad (34)$$

A hegesztési költségtényező $k_w = 1 \text{ \$/kg}$, az összeállítás bonyolultsági tényezője $\Theta = 3$,

$$\text{ha } t_1 < 15 \text{ mm } C_1 = 0.1939 \text{ és } n1 = 2 \quad (35a)$$

$$\text{ha } t_1 > 15 \text{ mm } C_1 = 0.1496 \text{ és } n1 = 1.9029. \quad (35b)$$

(b) Az $n+2$ számú folytonos borda-gerinc hegesztése a felső fedőlemezhez az egyik irányban kettős CO_2 sarokvarratokkal

$$K_{w2} = k_w \left[\Theta \sqrt{(2n+5) \rho V_2} + 1.3 \times 0.3394 \times 10^{-3} a_w^2 4(n+2)L \right] \quad (36)$$

$$a_w = 0.4 t_w, \text{ de } a_{w\min} = 4 \text{ mm}.$$

(c) Az $n+2$ számú megszakított borda-gerinc hegesztése a felső fedőlemezhez és a másik irányú borda-gerinchez kettős CO_2 sarokvarratokkal

$$K_{w3} = k_w \left[\Theta \sqrt{(2n^2 + 6n + 5) \rho V_3} + T_1 + T_2 \right] \quad (37)$$

$$T_1 = 1.3 \times 0.3394 \times 10^{-3} a_w^2 (h_1 + b) 2(n+1)(n+2) \quad (38)$$

$$T_2 = 1.3 C_1 t_f^{n1} 2b(n+1)(n+2) \quad (39)$$

(d) Az alsó fedőlemez-mezők hegesztése a bordák övéhez CO_2 sarokvarratokkal

$$K_{w4} = k_w \left[\Theta \sqrt{(n^2 + 2n + 2) \rho V_4} + 1.3 \times 0.3394 \times 10^{-3} a_{w1}^2 4L(n+1) \right] \quad (40)$$

$$a_{w1} = 0.4 t_2, \text{ de } a_{w1\min} = 3 \text{ mm}.$$

$$K_M = k_M \rho V_4, \quad k_M = 1 \text{ \$/kg}, \quad (41)$$

$$K_P = k_P \Theta_P S_P, \quad \Theta_P = 3, \\ k_P = 14.4 \times 10^{-6} \text{ \$/mm}^2 \quad (42)$$

$$S_P = 3L^2 + 2L(h_1 + b)(n + 2) \quad (43)$$

Teljes költség

$$K = K_M + K_{w1} + K_{w2} + K_{w3} + K_{w4} + K_P \quad (44)$$

8. OPTIMÁLÁS ÉS EREDMÉNYEI

Az optimalálás során keressük azokat a változókat, amelyek minimalják a térfogatot illetve költséget és megfelelnek a feltételeknek. A MathCAD algoritmus segítségével végzett szisztematikus keresés eredményeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az optimalálás eredményei: optimális méretek minimális térfogat illetve költség esetén. Az optimumokat vastagított betűk jelölik. Megengedett feszültség (σ_2) 322 MPa, megengedett lehajlás $w_{max} = 60$ mm. Méretek mm-ben

h	n	t_1	t_2	t_w	σ_1 MPa	w mm	gerinchorpadás (28) MPa	$V \times 10^{-9}$ mm^3	$K \times 10^{-5}$ \\$
1400	4	7	4	6	309	12	187<201	4.492	1.075
1300	5	6	4	6	320	16	204<215	4.247	1.074
1200	3	9	4	6	321	16	206<232	4.877	1.073
1100	4	8	4	6	309	20	215<251	4.622	1.068
1000	5	7	4	7	317	24	232<310	4.469	1.070
900	4	9	4	5	311	26	237<258	4.720	1.070
800	5	8	4	7	322	37	258<375	4.622	1.072

Összehasonlítással a 2. táblázatban megadjuk a hengerelt bordás cellalemez optimális adatait.

2. táblázat. Félbevágott hengerelt I-bordás cellalemez optimális adatai.

h/t_w	n	t_1	t_2	σ_1 MPa	w_{max} mm	$V \times 10^{-9}$ mm^3	$K \times 10^{-5}$ \\$
607.6/11.1	4	11	4	316	50	6.400	1.224
607.6/11.1	7	8	4	313	52	6.197	1.277

9. KÖVETKEZTETÉSEK

Az optimális méretek különböznek a minimális térfogat illetve a minimális költség esetén. Ennek a magas gyártási költségek az okai.

A hegesztett T-bordás cellalemez gazdaságosabb, mint a félbevágott hengerelt I-bordás, mert térfogata $(6.197-4.247)/6.197 \times 100 = 31\%$ -kal kisebb és költsége $(1.224-1.068)/1.224 \times 100 = 12\%$ -kal kisebb. A csökkenést az okozza, hogy hegesztett lemezbordák esetén sokkal kisebb lehet a bordák gerinclemez-vastagsága.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatás az OTKA 75689 program támogatásával készült.

IRODALOM

- [1] LEE SL, KARASHUDI P, ZAKERIA M, CHAN KS.: Uniformly loaded orthotropic rectangular plate supported at the corners. Civil Engineering Transactions Institution of Engineering Australia 13 (1971) (2): 101-106.
- [2] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY-KRIEGER S.: Theory of plates and shells. 2nd ed. New York-Toronto-London: McGraw-Hill, 1959.
- [3] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. ENV 1993-1-5. (2007)
- [4] VIRÁG Z., JÁRMAI K.: Bordázott lemezek fáradás vizsgálata különböző bordatípusokra, GÉP, Vol. LXIII, No. 2. 2012, pp. 41-44.
- [5] JÁRMAI, K., IVÁNYI, M.: Acélszerkezetek tűzvédelmi tervezése, Bevezetés az acélszerkezetekkel kapcsolatos európai szabványokba és alkalmazásukba. Gazdász-Elasztik Kft. Miskolc, 259 old. 2008.