

# KALAPSZELVÉNYŰ GERENDAELEMÉK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

*Honfi Dániel\* – Dunai László\*\**

## RÖVID KIVONAT

A cikk vékonyfalú, hidegen hajlított kalapszelvényű gerendaelemek kísérleti vizsgálatával foglalkozik. A kutatás célja a lyukas gerincű szelvény viselkedésének meghatározása a tömör gerincű kialakításhoz képest. A kutatás során teljes léptékű kialakítással végeztünk összesen 24 db kísérletet gravitációs teher alkalmazásával és meghatároztuk a jellemző tönkremeneteli módokat. A cikkben ismertetjük a vizsgálatok eredményeit.

## 1. BEVEZETÉS

### 1.1. Kísérleti vizsgálat célja

A hidegen hajlított kalapszelvényű gerenda szerkezeti elemek gyakoriak a könnyűszerkezetes épületrendszerekben. Ilyen rendszer a Lindab Familyline, melyben új elemként jelenik meg a lyukas gerincű kalapszelvény, mely az eddigiekben alkalmazott tömör gerincű kalapszelvényt váltja fel. A szerkezetváltás oka, hogy az új szelvény alkalmazásával lehetővé válik – a hőtechnikailag szükséges – átszellőztetett rétegrend kialakítása.

A lyukas gerincű kalapszelvényhez kapcsolódó kísérleti vizsgálatok célja az új szelvény viselkedésének meghatározása az eredetileg alkalmazott tömör gerincű kalapszelvényhez viszonyítva. A tömör gerincű szelvény esetén célként jelenik meg a szelvény teherbírásának összehasonlítása a szabványos méretezési eredményekkel.

### 1.2. Vizsgálat stratégiája

Az előbbieken felsorolt célok eléréséhez olyan kísérleti programot állítottunk össze, amely lefedi a Lindab Familyline rendszerben alkalmazott szerkezeti kialakításokat, hogy pontos képet kapjunk a szelvények valós viselkedéséről. A kísérleti programban többféle statikai váz vizsgálatát tűztük ki célul, úgy, mint kéttámaszú, kéttámaszú konzolos, kétféle konzolhosszal és háromtámaszú tartó. A statisztikai kiértékelhetőség miatt a lyukas gerincű kalapszelvények esetén szerkezeti kialakításonként 3-3 kísérletet terveztünk, valamint mindegyik lyukas gerincű szelvény mellé terveztünk egy ugyanolyan geometriával rendelkező tömör gerincű kísérletet is.

---

\* okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\* okl. építőmérnök, Dr. habil., egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

## 2. KÍSÉRLETI PROGRAM

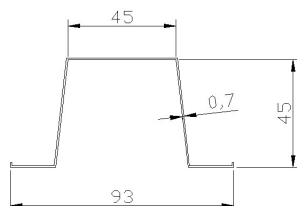
### 2.1. Előkészítés

A kísérleti előkészítés része volt a tömör gerincű kalapszelvények teherbírásának szabványos méretezési eljárás alapján való meghatározása. A lyukas gerincű szelvény esetében nem állt rendelkezésünkre szabványos méretezési eljárás, így annak teherbírására a tömör gerincű szelvények teherbírása szolgált iránymutatóul.

Megjegyezzük, hogy egy lyukakkal sűrűn gyengített gerincű szelvény teherbírásának meghatározására létezik egy elméleti levezetésen alapuló méretezési eljárás [1], azonban az itt alkalmazásra kerülő újfajta kalapszelvény nem felel meg az ott támasztott kritériumoknak, mert a viszonylag kis kiterjedésű lyukak távol helyezkednek el egymástól.

### 2.2. Kísérleti próbatetek

A kísérleti programban kétféle szelvényt vizsgáltunk, az S7 45 jelzésű tömör gerincű kalapszelvényt, illetve az OPR jelzésű, lyukas gerincű kalapszelvényt. A két szelvény geometriai méretei azonosak (1. ábra). Lyukas gerincű szelvény esetén a gerincekben lévő 20 mm átmérőjű lyukak egymástól 200 mm-re helyezkedtek el (2. ábra). Mindkét próbatestet a svédországi Lindab Profile AB bocsátotta rendelkezésünkre.



1. ábra: Szelvények geometriai méretei    2. ábra: Lyukak elhelyezkedése a gerincen

### 2.3. Kísérleti elrendezés

A kétféle szelvényű próbatetekből az 1. táblázatban feltüntetett kísérleti elrendezéseket állítottuk össze.

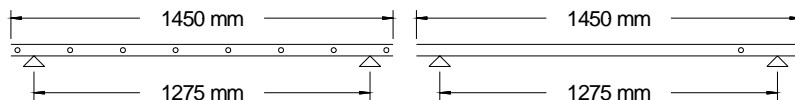
A kéttámaszú kialakítások jele lyukas szelvény esetén OK, tömör gerincű szelvény esetén pedig K. A kísérleti elrendezés a 3. ábrán látható.

A kéttámaszú konzolos kialakításokból kétfélét vizsgáltunk. Az egyik a rövid konzolhossz, 600 mm-es hosszal, ezek jele OKR lyukas gerincű szelvény esetén, míg KR tömör gerincű szelvény esetén. Ezek láthatóak a 4. ábrán. A másik kialakításban hosszú, 1000 mm-es konzolt alkalmaztunk. Ezek jele az eddigi jelöléseknek megfelelően OKH, illetve KH volt. Ebben az esetben megvizsgáltuk azt is, hogy mennyire befolyásolja a teherbírást az, hogy a lyuk a konzol felőli támasz felett helyezkedik el. Ennek a jele OKHO volt és az 5. ábrán látható a többi hosszú konzolos kialakítással együtt.

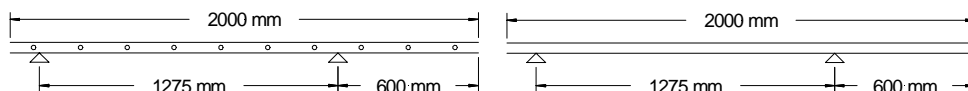
Az utolsó statikai váz a háromtámaszú tartó volt. Itt is megvizsgáltuk a lyukas gerincű (OH), illetve a tömör gerincű (H) szelvényt és a lyuk középső támasz feletti helyzetének hatását (OHO). Ezek az elrendezések a 6. ábrán láthatóak.

1. táblázat: A kísérleti program

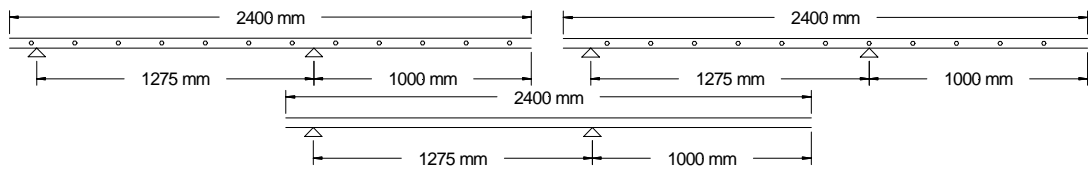
Kísérlet	Jel		Leírás
1.	OK	/1	Kéttámaszú kialakítás, lyukas gerincű kalapszelvényből
2.		/2	
3.		/3	
4.	K	/1	Kéttámaszú kialakítás, tömör gerincű kalapszelvényből
5.	OKR	/1	Kéttámaszú kialakítás, rövid konzollal (600 mm), lyukas gerincű kalapszelvényből
6.		/2	
7.		/3	
8.	KR	/1	Kéttámaszú kialakítás, rövid konzollal (600 mm), tömör gerincű kalapszelvényből
9.	OKH	/1	Kéttámaszú kialakítás, hosszú konzollal (1000 mm), lyukas gerincű kalapszelvényből, a konzol felőli támasz felett nincs lyuk
10.		/2	
11.		/3	
12.	OKHO	/1	Kéttámaszú kialakítás, hosszú konzollal (1000 mm), lyukas gerincű kalapszelvényből, a konzol felőli támasz felett lyuk van
13.		/2	
14.		/3	
15.	KH	/1	Kéttámaszú kialakítás, hosszú konzollal (1000 mm), tömör gerincű kalapszelvényből
16.	OH	/1	Háromtámaszú kialakítás, lyukas gerincű kalapszelvényből, a középső támasz felett nincs lyuk
17.		/2	
18.		/3	
19.	OHO	/1	Háromtámaszú kialakítás, lyukas gerincű kalapszelvényből, a középső támasz felett lyuk van
20.		/2	
21.		/3	
22.	H	/1	Háromtámaszú kialakítás, tömör gerincű kalapszelvényből
23.		/2	
24.		/3	



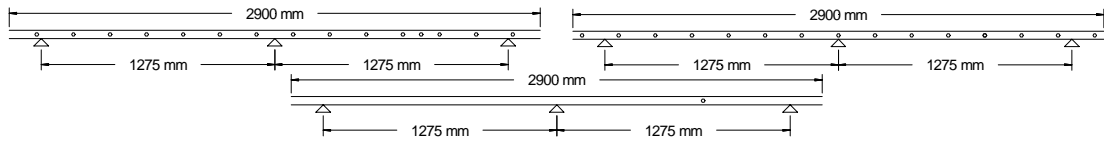
3. ábra: OK és K kísérleti elrendezések



4. ábra: OKR és KR kísérleti elrendezések



5. ábra: OKH, OKHO és KH kísérleti elrendezések



6. ábra: OH, OHO és H kísérleti elrendezések



7. ábra: OK kísérlet

A kísérleti elrendezésre a 7. ábrán mutatunk be egy példát. Itt a bal felső képen a kalapszelvények láthatóak a Lindab C 200/2.0-es szelvényekből kialakított támaszok felett. A támaszokat a laboratórium padlójához, illetve egymáshoz rögzítettük, hogy a másodlagos hatásokra ne tudjanak vízszintes irányban elmozdulni. A kalapszelvényeket, egymástól 400 mm-re elhelyezve LD 6T típusú önfűró csavarokkal rögzítettük a támaszokhoz, majd Lindab LTP 20-as, 0.5 mm vastag trapézlemezzel fedtük be.

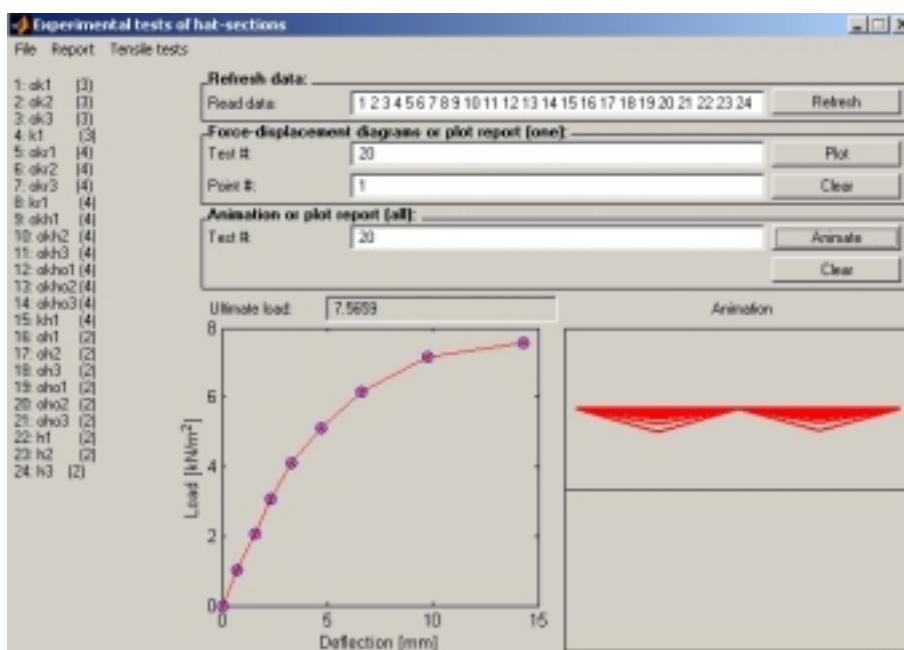
Ez látható az ábra jobb felső sarkában. A trapézlemez minden második hullámvölgyben rögzítettük a kalapszelvényekhez, szintén önfűrő, LD3T típusú csavarokkal.

A kísérletek során függőleges lehajlásokat mértünk. A 7. ábra bal felső sarkában látható, ahogy a középső kalapszelvény alatt elhelyezkedő csigák megvezetik a mágnes segítségével a kalapszelvényhez rögzített zsinórokat, amik az induktív adónak továbbítják az elmozdulást. Kéttámaszú esetben a középső keresztmetszet három pontjának a lehajlását, a konzolos esetekben ugyanezen három pont és a konzolvég lehajlását, háromtámaszú esetben pedig a két támaszközép egy-egy lehajlását mértük.

A terhelés az ábra bal alsó sarkában látható homokzsákokkal történt. Egy homokzsák tömege 5 kg volt, amiket több sorban egymás felett helyeztünk el (a sor  $\sim 0,92 \text{ kN/m}^2$  egyenletesen megoszló felületi tehernek felel meg), minden sornál mérve az elmozdulásokat, amíg végül megkaptuk a jobb alsó sarokban látható tönkremenetelt.

## 2.4. Mérési eredmények feldolgozása

Az előző pontban ismertetett nagy számú mérési eredmények feldolgozására kifejlesztettünk egy Matlab alapú programot, amely képes ábrázolni az erő-elmozdulás grafikonokat, és gerendák lehajlását. A program vezérlőablaka látható a 8. ábrán.



8. ábra: A kísérleti eredményeket feldolgozó Matlab alapú program

## 2.5. Húzókéísérletek

A kísérletben szereplő próbatetek anyagmodelljének meghatározása céljából húzókéísérleteket hajtottunk végre mindkét – lyukas és tömör gerincű – kalapszelvény övéből és gerincéből vett szabványos méretű próbapálcákon.

### 3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

#### 3.1. Kísérleti eredmények értékelése

A kísérleti programban szereplő próbatestek teherbírását a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat: A kísérlet eredményeinek összefoglaló táblázata

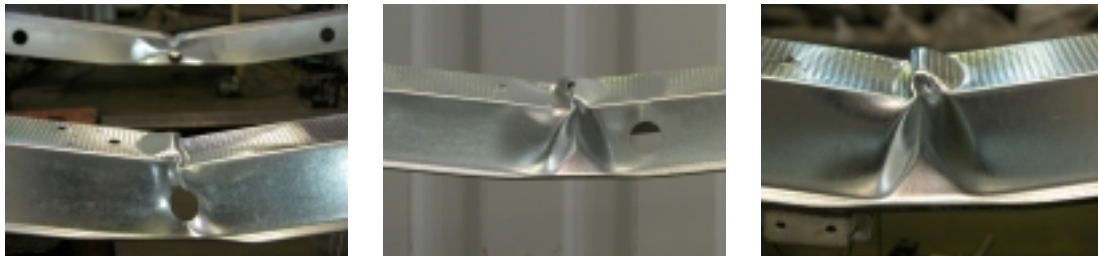
Kísérlet	Jel		Teherbírás [kN/m <sup>2</sup> ]	Átlag teherbírások [kN/m <sup>2</sup> ]	Tönkremeneteli mód
1.	OK	/1	5,85	5,74	hajlítási tönkremenetel a támaszközben
2.		/2	5,69		
3.		/3	5,69		
4.	K	/1	5,69	5,69	
5.	OKR	/1	4,68	4,66	hajlítás és beroppanás kölcsönhatása a támasz felett a konzol felőli oldalon
6.		/2	4,63		
7.		/3	4,66		
8.	KR	/1	4,55	4,55	
9.	OKH	/1	1,81	1,81	
10.		/2	1,81		
11.		/3	1,81		
12.	OKHO	/1	1,81	1,81	
13.		/2	1,81		
14.		/3	1,81		
15.	KH	/1	1,81	1,81	
16.	OH	/1	6,92	7,61	képlékeny csukló kialakulása a középső támasznál, majd hajlítási tönkremenetel a támaszközben
17.		/2	8,08		
18.		/3	7,82		
19.	OHO	/1	7,82	7,82	
20.		/2	7,57		
21.		/3	8,08		
22.	H	/1	6,58	7,30	
23.		/2	7,83		
24.		/3	7,50		

Kéttámaszú esetben mindig a támaszközben következett be a tönkremenetel. Lyukas gerincű szelvény esetén általában a lyuk környezetében, illetve egy olyan kísérlet volt, amikor a három kalapszelvény közül a két szélsőnél nem a lyukak fölött horpadt a szelvény. Mindkét – rövid és hosszú – konzolos kéttámaszú esetben a konzol felőli támasznál következett be a tönkremenetel. Az alsó öv a nyomás hatására „kihajlott”, torzulási horpadás következett be. A stabilitásvesztés a lerögzítésként működő csavarnál kezdődött és a hossza körülbelül 50 mm volt. A kísérletek során azt tapasztaltuk, hogy a lyuk támasz fölötti helyzete nem volt hatással a teherbírásra. Háromtámaszú statikai váz esetén, a középső támasz tönkremenetele után még tovább

terhelhető volt a tartó, a végső tönkremenetel az egyik támaszközben, vagy mindkét támaszközben egyszerre következett be. A teherbírást itt sem befolyásolta a középső támasz feletti lyuk helyzete. Bár a két szelvénytípus teherbírásának egymással való összehasonlítása nem volt cél, ellentmondásnak tűnhet, hogy a lyukas gerincű szelvények teherbírása – igaz csekély mértékben, de – meghaladta a tömör gerincűekét. Erre a két szelvény anyagjellemzői közti különbségek adnak magyarázatot, melyet részletesebben a 3.3. pontban tárgyalunk.

### 3.2. Tönkremeneteli módok bemutatása

Kéttámaszú esetben a támaszközben következett be hajlítási tönkremenetel. Először a felső övben alakult ki folyás a nyomás hatására, majd helyi horpadás kezdett kialakulni ugyanitt és a gerincben. Ekkor a szerkezet már nem tudott több terhet felvenni, az elmozdulások megnöttek mind a felső övben, mind a gerincben. A tönkremenetel a 9. ábrán látható attól függően, hogy a mezőközépen található-e lyuk vagy sem, illetve tömör szelvény esetén.



9. ábra: Hajlítási tönkremenetel (a) lyuknál, (b) lyuk mellett, (c) tömör gerinc esetén

Konzolos kialakítások esetén a tönkremenetel mindig a támaszerő és nyomaték interakciójából kialakuló beroppanás jelensége volt a konzol felőli oldalon, ahol a gerinc alsó része megfolyt, ezután kialakultak, a már szabad szemmel is látható, helyi horpadások és az alsó öv lassan kezdett felhajlani a nyomás hatására. Végül az elmozdulások tovább növekedtek, a gerinchorpadások nagysága és területe, valamint az öv felhajlásának mértéke is rohamosan nőtt. A stabilitásvesztés módja így torzulási horpadás volt, mely a lerögzítésként működő csavarnál kezdődött és hossza körülbelül 50 mm volt.



10. ábra: Hajlítási-beroppanási tönkremenetel (a) lyuk a támasz mellett, (b) lyuk a támasz felett, (c) tömör gerinc

Háromtámaszú esetben kombinálódott az ismertetett kétféle tönkremeneteli mód. Először lejátszódott a már bemutatott hajlítási-beroppanási tönkremenetel a középső támasz felett, de a képlékeny csukló kialakulása után a tartó még tovább terhelhető és a végső tönkremenetel a már szintén bemutatott hajlítási tönkremenetel mezőközében.

### 3.3. Húzókísérleti eredmények értékelése

A kalapszelvényekből kivágott húzó próbatesteken 4 kísérletet végeztünk el. A kísérletek alapján meghatározott anyagjellemzőket – folyáshatár és szakítószilárdság – a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. táblázat: Anyagjellemzők

Anyagjellemzők	Tömör gerincű		Lyukas gerincű	
	gerinc	öv	gerinc	öv
Folyáshatár [N/mm <sup>2</sup> ]	266	228	316	276
Szakítószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]	334	273	353	331

Az eredményekből jól látszik, hogy az övek folyáshatára és szakítószilárdsága a teljes vastagságra kiterjedő megmunkálás (felületi domborítás) miatt körülbelül 15 %-kal kisebb. Továbbá a lyukas gerincű kalapszelvény anyagának szilárdsága, mind a gerinc, mind pedig az öv esetén körülbelül szintén 15 %-kal nagyobb. A kétféle szelvény különböző anyagminősége magyarázza a teherbírásokban jelentkező különbséget a lyukas gerincű kialakítás javára, melyre a 3.1. pontban utaltunk.

## 4. KÍSÉRLET ALAPÚ TERVEZÉSI TEHERBÍRÁSOK MEGHATÁROZÁSA

A kísérletek alapján egy tervezési útmutató készült a vizsgált szerkezeti kialakításokra gravitációs, egyenletesen megoszló teher esetén. A kísérleti teherbírásokból [2] alapján az alábbiak szerint számíthatjuk a teherbírások tervezési értékét, amelyeket a 4. táblázatban foglaltunk össze. A teherbírési értékek kéttámaszú és háromtámaszú esetben a támaszközben bekövetkező, konzolos kialakításnál a konzol felőli támasznál bekövetkező tönkremenetelhez tartoznak.

A mért értékből a vastagság és a folyáshatár aktuális – a húzókísérletekből kapott – értékeivel módosított teherbírások meghatározhatók:

$$g_{adj} = g_{obs} / \mu_R \qquad \mu_R = \left( \frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{t_{obs,cor}}{t_{cor}} \right)^\beta$$

A szabvány alapján  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$  a vizsgált lemezek esetén, így a módosított teherbírás alapján a karakterisztikus érték az alábbiak szerint számítható:



$$g_k = 0,9 \cdot \eta_k \cdot g_{adj} \quad - 1 \text{ kísérlet esetén}$$

$$g_k = \eta_k \cdot g_{adj} \quad - 2 \text{ vagy } 3 \text{ kísérlet esetén}$$

Az adott képlékeny lokális horpadás esetén  $\eta_k = 0,8$ .

A teherbírás tervezési értéke:

$$g_d = \frac{g_k}{\gamma_M \cdot \gamma_{sys}} \quad \gamma_{sys} = 1,0 \quad \gamma_M = 1,1$$

4. táblázat: A teherbírások tervezési értékei

Kísérlet száma	Kísérlet jele		Támaszok száma	Támaszköz [mm]	Konzol hossza [mm]	Teherbírás $g_{obs}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Átlagos teherbírás [kN/m <sup>2</sup> ]	Módosított teherbírás átlaga $g_{adj}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Teherbírás karakterisztikus értéke $g_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Teherbírás tervezési értéke $g_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Eurocode alapú teherbírás $g_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1.	OK	/1	2	1275	-	5,85	5,74	5,07	4,05	3,69	3,36
2.		/2				5,69					
3.		/3				5,69					
4.	K	/1	2	1275	-	5,69	5,69	5,25	3,78	3,44	3,36
5.	OKR	/1	2	1275	600	4,68	4,66	4,11	3,29	2,99	2,54
6.		/2				4,63					
7.		/3				4,66					
8.	KR	/1	2	1275	600	4,55	4,55	4,20	3,02	2,75	2,54
9.	OKH	/1	2	1275	1000	1,81	1,81	1,60	1,28	1,16	1,10
10.		/2				1,81					
11.		/3				1,81					
12.	OKHO	/1	2	1275	1000	1,81	1,81	1,60	1,28	1,16	1,10
13.		/2				1,81					
14.		/3				1,81					
15.	KH	/1	2	1275	1000	1,81	1,81	1,67	1,20	1,09	1,10
16.	OH	/1	3	1275	-	6,92	7,61	6,71	5,37	4,88	4,73
17.		/2				8,08					
18.		/3				7,82					
19.	OHO	/1	3	1275	-	7,82	7,82	6,90	5,52	5,02	4,73
20.		/2				7,57					
21.		/3				8,08					
22.	H	/1	3	1275	-	6,58	7,30	6,74	5,39	4,90	4,73
23.		/2				7,83					
24.		/3				7,50					

A táblázat utolsó oszlopa a [2] alapján számított teherbírási értékeket tartalmazza tömör gerincű esetre.

## 5. ÖSSZEFOGLALÓ MEGÁLLAPÍTÁSOK

A kísérleti programban meghatároztuk a kétféle kalapszelvényből kialakított gerendák szerkezeti viselkedését gravitációs teher esetén. Definiáltuk és jellemeztük a különböző szerkezeti kialakításokra vonatkozó tönkremeneteli módokat. Részletesen elemeztük a lyukgyengítés hatását a különböző tönkremenetek esetén.

A kísérletből származtatható szabványos teherbírasi értékeket a [2] alapján és a [2] szerinti méretezési eljárások számított értékei tömör gerincű szelvény esetén jó egyezést mutattak. Lyukas gerincű kialakítás esetén szabványos méretezési eljárás nem áll rendelkezésre, ezért további célként jelenik meg egy méretezésre alkalmas módszer kidolgozása, további vége-selemes analízissel végrehajtott virtuális kísérletek alapján.

A kísérleti eredmények jelenlegi feldolgozási szintjén általában megállapítható, hogy a lyukas gerincű kalapszelvények teherbírása elhanyagolható mértékben kisebb a tömör gerincű szelvény teherbírásához képest, de ennek részletes elemzésére is a numerikus vizsgálatok elvégzésével nyílik majd lehetőség.

### JELÖLÉSEK

$f_{yb}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	–	a folyáshatár nominális értéke
$f_{yb,obs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	–	a folyáshatár aktuális értéke (húzókérdések alapján)
$g_{adj}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	–	módosított teherbírás (átlag)
$g_d$ [kN/m <sup>2</sup> ]	–	teherbírás tervezési értéke
$g_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	–	teherbírás karakterisztikus értéke
$g_{obs}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	–	kísérleti teherbírás
$t_{cor}$ [mm]	–	az acél lemezzvastagság nominális értéke
$t_{obs,cor}$ [mm]	–	az acél lemezzvastagság aktuális értéke
$\gamma_{sys}$	–	a tényleges és a kísérleti elrendezés különbségét figyelembe vevő tényező
$\gamma_M$	–	parciális biztonsági tényező
$\eta_k$	–	kísérleti teherbírást módosító tényező
$\mu_R$	–	a tönkremenetel típusától függő tényező

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutatást támogatta a Lindab Kft. ipari K+F projektje és az OTKA T035147 számú alapvetési programja.

### HIVATKOZÁSOK

- [1] Ádány, S. - Dunai, L. - Kollár, L.P.: Behaviour and design of cold-formed slotted studs, *Stability and Ductility of Steel Structures*, Budapest, 2002, pp. 195-202.
- [2] Eurocode 3 (2002): *Design of Steel Structures*, Part 1-3: General Rules – Supplementary Rules for Cold-formed Thin Gauge Members and Sheeting.