



ACÉLGERENDA ÉS BETONOSZLOP KÖZÖTTI KAPCSOLAT ELEMZÉSE

ANALYSIS OF STEEL BEAM-TO-CONCRETE COLUMN CONNECTION

Török István,¹ Lőrincz Barnabás-Attila,² Sütő Abigail-Bethsabé,³ Urszuly Nóra,⁴ Nagy Zsolt⁵

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia

¹torok.an.istvan@student.utcluj.ro, ²barnabas.lorincz@campus.utcluj.ro,

³suto.at.abigail@student.utcluj.ro, ⁴urszuly.sz.nora@student.utcluj.ro, ⁵zsolt.nagy@dst.utcluj.ro

Abstract

This study investigates the load-bearing capacity of an external steel beam-to-concrete column connection formed with post-installed anchorage systems, derived from the connection presented in reference [1]. Two connection types are analysed: chemical and mechanical anchor solutions. Both analytical and numerical methods were applied in the investigation. The analytical calculations were carried out based on the European standard EN 1992-4:2018 [2], while the numerical analyses were performed using the Hilti PROFIS Engineering software. The aim of the study is to determine the ultimate moment capacity of the examined connections, identify the governing failure component, and compare the analytical and software-based results. A parametric study was also conducted to evaluate the influence of the anchor embedment depth on the load-bearing capacity of the connection. The comparison of the obtained results with previous studies [1, 3] on steel and composite connections contributes to a deeper understanding of the behaviour of post-installed anchorage systems in steel-to-concrete joints.

Keywords: *steel beam-to-concrete column connection, post-installed anchorage system, chemical anchor, mechanical anchor.*

Összefoglalás

Ez a tanulmány egy külső, acélgerenda és betonoszlop közötti, utólagos rögzítésekkel kialakított kapcsolat teherbírását vizsgálja, amely az [1] hivatkozásban bemutatott kísérleti konfigurációkból lett elkülönítve. A kutatás két kapcsolattípus viselkedésének elemzésére fókuszál: a ragasztott dübeles, illetve a mechanikus dübeles megoldásra. A vizsgálatok során analitikus és szoftveres módszerek voltak alkalmazva. Az analitikus számítások az EN 1992-4:2018 szabvány [2] alapján készültek, míg a szoftveres vizsgálatok a Hilti PROFIS Engineering szoftverrel valósultak meg. A kutatás célja a vizsgált kapcsolatok végső nyomatéki teherbírásának meghatározása, a tönkremenetelt meghatározó komponens azonosítása, valamint az analitikus és szoftveres eredmények összevetése. Emellett parametrikus vizsgálatok is megvalósultak a dübelek befogási mélységének függvényében. Ezek az elemzések eredményei rámutatnak arra, hogyan változik a kapcsolat teherbírása a vizsgált paraméter hatására. Az eredmények összehasonlítása korábbi acél- és öszvércapcsolatokra vonatkozó kutatásokkal [1, 3] hozzájárul az utólagos rögzítéses kapcsolatok viselkedésének mélyebb megértéséhez.

Kulcsszavak: *acélgerenda-betonoszlop kapcsolat, utólagos rögzítési rendszer, ragasztott dübel, mechanikus dübel.*

1. Bevezetés

A kapcsolatok viselkedése alapvetően meghatározza az épületek szerkezetének globális teherbírását és merevségét. Számos kutatás foglalkozott az acél- és öszvérkapcsolatok teherbírásának és merevségének vizsgálatával, kísérleti és numerikus módszerekkel egyaránt. A jelen tanulmányban vizsgált utólagos rögzítési megoldások – amelyek acélgerenda és betonoszlop közötti kapcsolatok kialakítására vonatkoznak – az [1] hivatkozásban bemutatott, acéloszlop és öszvérgerenda közötti kapcsolati konfigurációkra épülnek.

Az [1] hivatkozásban vizsgált kísérleti konfigurációkat az 1. ábra szemlélteti. A szerzők alternatív kapcsolati kialakításokat vizsgáltak, amelyek között egy belső (T1) és két külső (T2, T3) kapcsolat szerepelt. A külső kapcsolati kialakításra tett javaslat különös jelentőséggel bír, hiszen hagyományos kialakításuk gyakran igényel egy kisebb konzolt a vasalás megfelelő lehorgonyzási hosszának biztosítására, ami sok esetben építészeti korlátokat eredményez. Ennek elkerülése érdekében az [1] kísérleti program egyik kiemelt célja az volt, hogy megvizsgálja a konzol elhagyásának lehetőségét félmerev külső kapcsolatok esetén. A javasolt megoldás szerint a vasalást az acéloszlop övein keresztül vezették át, majd a külső övhöz csavarmenettel kialakított véggel vagy fejképpel rögzítették.

A vizsgált külső kapcsolati konfigurációk egy 1,30 m hosszú, konzolban álló IPE270 öszvérgerenda és egy, a két végén csuklósan megtámasztott HEB240 acéloszlop találkozásánál kialakított kapcsolatokból álltak. Az IPE270 acélgerendához egy 10 cm vastag, 1 m széles vasbeton lemez csat-

lakozott 19 mm átmérőjű, 75 mm magas nyírócsapok alkalmazásával. A vasbeton lemez összesen 11 nyírócsappal került rögzítésre az acélgerendához 10 cm-es kiosztással. A gerenda szabad végénél elhelyezett terhelési pont 1,20 m távolságban helyezkedett el az acéloszlop tengelyétől. A gerenda vége egy 10 mm vastag színelő homloklemezrel zárult, amelyet négy darab M16-os, 10,9 szilárdsági osztályú csavar rögzített az oszlophoz. Az oszlop és a gerenda S275 minőségű acélból készült.

Az [1] hivatkozásban bemutatott külső öszvérkapcsolatok (T2, T3) nyomatéki teherbírására (M_{j,Rd}) vonatkozó eredményeit az 1. táblázat foglalja össze. Az említett hivatkozásban bemutatott kísérleti eredményekre építve a [3] tanulmány az ott ismertetett konfigurációkból elkülönített acélgerenda és acéloszlop közötti kapcsolatokat vizsgálta analitikus és numerikus módszerekkel. Ezen elemzések elsősorban a kapcsolat merevségének, teherbírásának és komponenseinek paraméteres analízisére fókuszált. A [3] tanulmányban vizsgált 10 mm vastag homloklemezű (P10mm) acélkapcsolat nyomatéki teherbírására vonatkozó eredmények a 2. táblázatban figyelhetők meg.

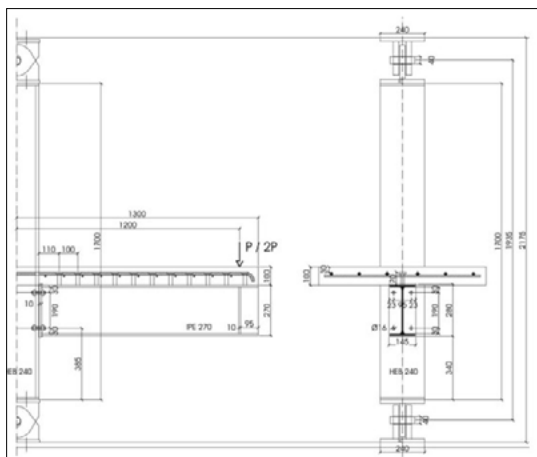
A jelen tanulmány az előző kutatások folytatásaként egy módosított kapcsolati kialakítást vizsgál, amelyben az acéloszlopot betonoszlop váltja fel, miközben az acélgerenda, a kapcsolódó homloklemez geometriája és a csavarok pozíciója változatlan marad. A kapcsolat kialakításához utólagos rögzítési módszer került alkalmazásra, amely ragasztott vagy mechanikus dübelekkel valósítható meg. Az ilyen típusú kapcsolatok a modern építési gyakorlatban egyre szélesebb körben alkalmazottak, mivel kivitelezésük több szempontból előnyös, ugyanakkor a teherátadási mechanizmusuk összetett, és viselkedésük pontos jellemzése további vizsgálatokat igényel.

1. táblázat. A T2, T3 öszvérkapcsolatok nyomatéki teherbírása [1]

Kapcsolat	M _{j,Rd} [kNm]
T2	147,4
T3	163,1

2. táblázat. A 10 mm homloklemezű acélkapcsolat (P10mm) nyomatéki teherbírása [3]

Kapcsolat	M _{j,Rd} [kNm]		
	Analitikus számolás	Consteel	Idea StatiCa
P10mm	34,28	34,00	31,02



1. ábra. Az [1] kísérleti program keretében vizsgált konfigurációk geometriai kialakítása

Az utólagos rögzítésekkel kialakított kapcsolatok nyomatékai teherbírását számos tényező befolyásolja, többek között a dübelek befogási mélysége, a beton szilárdsága, a vasalás elrendezése, a dübelek távolsága az összekapcsolt elemek szélétől, valamint az acéllemez merevsége. E kapcsolatok teherbírásának pontos ismerete elengedhetetlen a biztonságos tervezéshez és a számítási modellek validálásához.

A vizsgálatok során analitikus és szoftveres módszerek kerültek alkalmazásra. Az analitikus számítások az EN 1992-4:2018 szabvány [2] előírásai alapján készültek, míg a szoftveres elemzések a Hilti PROFIS Engineering szoftverrel valósultak meg. Az elemzés kizárólag a nyomatéki teherbírásra terjed ki, és egy parametrikus vizsgálattal egészült ki, amely a dübel befogási mélységének hatását értékeli a kapcsolat nyomatéki teherbírására nézve.

2. Analitikus és szoftveres vizsgálatok

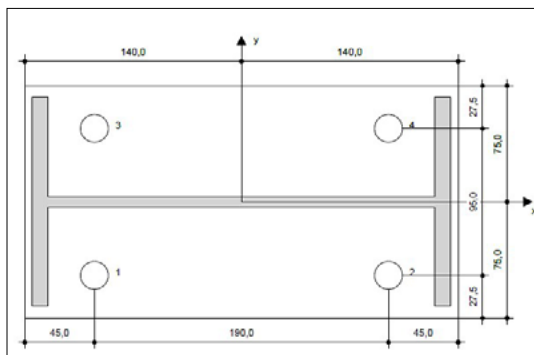
Az elvégzett analitikus vizsgálatok az EN 1992-4: 2018 szabvány [2] előírásain alapulnak. A szabvány négy lehetséges tönkremeneteli módot határoz meg húzott dübelek esetén, amelyek közé tartozik a rögzítő elem acélszárának szakadásából eredő tönkremenetel, a beton szakadó kúpos tönkremenetele, a rögzítő elem kihúzóódása a betonelemből, valamint a betonelem felhasadása.

A szoftveres vizsgálatok a Hilti PROFIS Engineering szoftver alkalmazásával készültek. A szoftver számítási eljárása az EN 1992-4:2018 szabvány [2], valamint a különböző bevizsgálási tanúsítványok [4, 5] alapján felépített komponensmodellre épül. A szoftver a kapcsolatot részletes modellként értelmezi, amelyben külön kezeli az acél-, a beton- és a lehorgonyzási rendszer teherátadását, továbbá figyelembe veszi ezek kölcsönhatását. A számítási folyamat során minden egyes dübélre és dübélcsoportha meghatározásra kerülnek a húzási, nyírási és ezek kombinációjából származó igénybevételek, valamint az ezekhez tartozó tönkremeneteli módok. A szoftver által szolgáltatott eredmények tartalmazzák a dübelenkénti igénybevételeket, az egyes komponensek kihasználtságának mértékét, valamint a domináns tönkremeneteli módot. A PROFIS Engineering használatának előnye, hogy a beton repedéseit, a betonkúpok átfedéseit és a vasalás hatását háromdimenziós modell alapján vizsgálja, figyelembe véve a gyártói előírásokat a minimális távolságokra, az elemek szelvényre mért elhelyezésére és a befogási mélységre vonatkozóan.

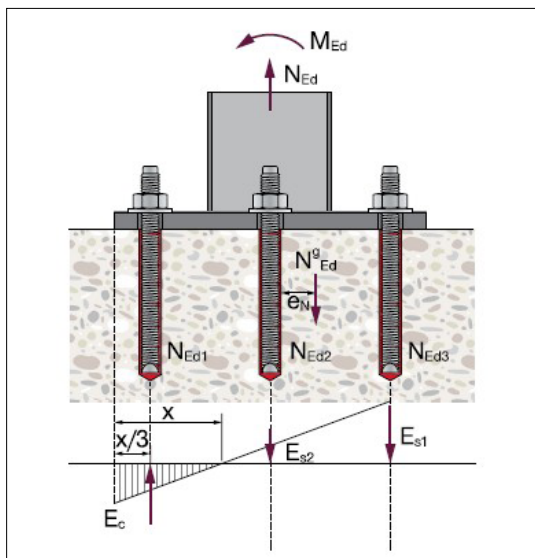
A vizsgálatok során Hilti HIT-RE 500 V4 ragasztott dübel, Hilti HAS-U-típusú, M16-os átmérőjű, 8.8 szilárdsági osztályú menetes szár, valamint Hilti HST3 beütő ék került alkalmazásra. A mechanikus dübeles rögzítések 160 mm-es maximális befogási hosszra voltak vizsgálva, mivel a szoftver a termékkatalógusban elérhető M16 × 260- és M16 × 300-típusok ellenére legfeljebb az M16 × 220 beütő éket engedélyezi. A vizsgálatok C25/30 szilárdsági osztályú betonból készült, 50 × 50 cm keresztmetszetű betonoszlopon történtek, amely a vizsgált kapcsolati konfiguráció alapvető geometriai és anyagi paramétereit adja. Az analitikus és szoftveres vizsgálatok eredményei lényegében megegyeztek, ezért a további számításokhoz első sorban a szoftveres eljárás került alkalmazásra.

A szoftver a lyuk közepétől a lemez széléig mért minimális távolság meghatározásában eltér az EN 1993-1-8:2005 szabvány [6] előírásától. A PROFIS Engineering a minimális szelvtávolságot a furatátmérő másfélszeresének, míg a [6] hivatkozás a furatátmérő 1,2-szeresének veszi. Emiatt a homloklemez szélességét a modellben 145 mm-ről 150 mm-re kellett növelni. A 2. ábrán látható a kapcsolat módosított homloklemeze.

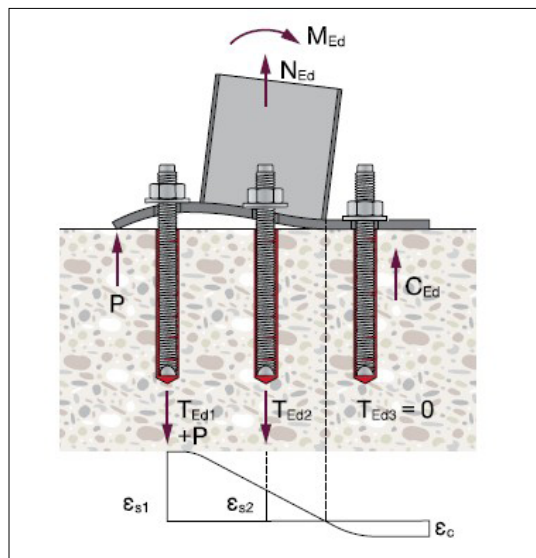
A vizsgálatok során összehasonlításra került a merev és flexibilis lemez viselkedésének hatása. Az acél homloklemez viselkedési módjait a [7] hivatkozás is részletesen ismerteti. A merevlemez viselkedését feltételező modellben a homloklemez nem képes számottevő alakváltozásra, ezért a lehorgonyzó dübelek igénybevételei közel lineárisan oszlanak meg, és a dübelcsoport szélső elemei veszik fel a legnagyobb igénybevételt. A 3. ábra a merevlemez feltételezéséhez tartozó erőeloszlást mutatja, ahol a dübelek húzóerői lineáris jelleggel növekednek. A kapcsolat acélelemeinek méretei és anyagjellemzői megegyeznek a [1] tanulmányban alkalmazottakkal.



2. ábra. A vizsgált kapcsolat szoftverben módosított homloklemeze



3. ábra. Az alakváltozások és erők lineáris eloszlása hajlítónyomaték és normálerő terhelése alatt álló rögzítési rendszerben, merevlemez esetén [7]



4. ábra. Az alakváltozások és erők nemlineáris eloszlása hajlítónyomaték és normálerő terhelése alatt álló rögzítési rendszerben, flexibilis lemez esetén [7]

Ezzel szemben a flexibilis lemez viselkedése jelentős lemezdeformációt tesz lehetővé a terhelés hatására. Ilyenkor a teherátadás nem tekinthető merev elemek közötti teherátvitelnek: az alaplemez deformációja miatt a dübelcsoport elemei között nemlineáris húzóerő-eloszlás alakul ki. A lemez peremén elhelyezkedő dübelekre a lemez lokális alakváltozása miatt nagyobb húzóerők jutnak, míg a belső zónában lévő dübelek kisebb igénybevételt vesznek fel, szélsőséges esetben akár tehermentessé is válhatnak. Jelentősebb mértékű nyomatékok esetén ez a jelenség tovább erősödik, mivel a hajlítónyomaték hatásvonala a lemez külső tartományába koncentrálja a húzóerőket. A 4. ábra bemutatja a flexibilis lemezre jellemző erőeloszlást, valamint az ezzel összefüggő deformációs képet.

A [2] szabványban ismertetett számítási módszer kizárólag merev homloklemez használata esetén érvényes, amelyben a terhek lineárisan oszlanak meg, és a lemez alakváltozásai elhanyagolhatóak. Ezzel szemben a Hilti PROFIS Engineering szoftver képes a flexibilis lemezek viselkedésének modellezésére is, mivel az igénybevételek meghatározásához végelem-alapú (VEM) numerikus módszert alkalmaz. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a szoftver a vizsgált kapcsolatok valós viselkedését modellezze.

A vizsgált acélgerenda és betonoszlop között kialakított, színelő homloklemezes kapcsolat ese-

tében a hajlítónyomaték hatására a dübeleket döntően húzási igénybevételre kell ellenőrizni. A vizsgált terhelési tartományban a homloklemez alakváltozása elhanyagolható, ezért a lemez deformációja gyakorlatilag nem befolyásolja az igénybevételek eloszlását. Ennek következtében a merev és a flexibilis lemez feltételezésével számított nyomatéki teherbírások között csak csekély eltérés mutatkozik.

Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a hajlítónyomatékok viszonylag kicsik, így a 10 mm vastagságú homloklemez – amely nagyobb igénybevételek esetén már jelentős alakváltozásra lenne hajlamos – ebben a terhelési tartományban még nem szenved számottevő deformációt. Mivel a lemez alakváltozása nem válik meghatározóvá, a dübelcsoporton belüli erőeloszlás közel azonos marad a merev és a flexibilis lemez modelljében egyaránt.

A 3. táblázat a merev és flexibilis homloklemezes kapcsolatok nyomatéki teherbírását mutatja be.

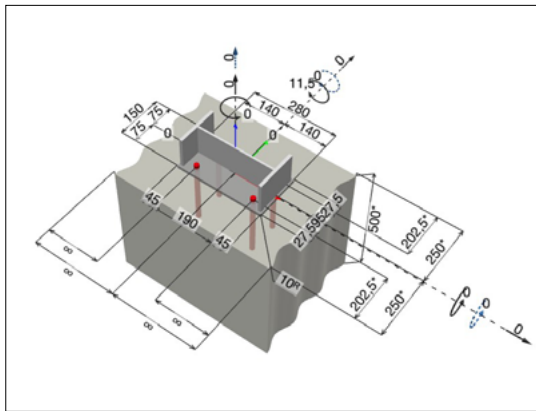
Az acélgerenda és a betonoszlop közötti kapcsolat vizsgálata során összehasonlításra kerültek a ragasztott és a mechanikus dübeles utólagos rögzítési megoldások. A két dübeltípus teherátadási mechanizmusa eltérő, ami különbségeket eredményezhet a nyomatéki teherbírásban. A ragasztott dübelek esetében a húzóerő elsősorban a beton és a ragasztóanyag közötti felületi tapadá-

3. táblázat. A merev és flexibilis homloklemez-es kapcsolat nyomatéki teherbírásai 100 mm-es befogási mélység esetén

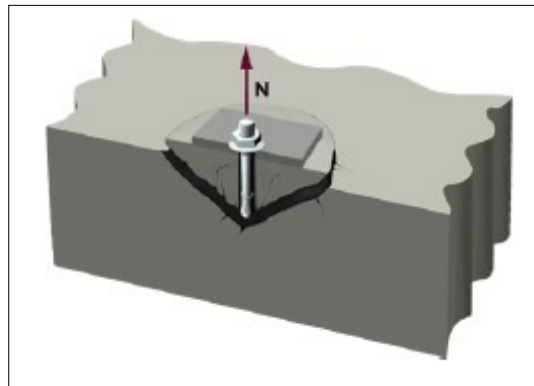
Kapcsolat h_{ef} 100mm	$M_{j,Rd}$ [kNm]		$\Delta M_{j,Rd}$ [%]
	Merev lemez	Flexibilis lemez	
Ragasztott dűbel	7,10	6,80	- 4,23
Mechanikus dűbel	7,25	7,30	0,69

4. táblázat. A ragasztott és mechanikus dübeles kapcsolat nyomatéki teherbírásai 100 mm-es befogási mélység esetén

Kapcsolat h_{ef} 100mm	$M_{j,Rd}$ [kNm]		$\Delta M_{j,Rd}$ [%]
	Ragasztott dűbel	Mechanikus dűbel	
Merev lemez	7,10	7,25	2,11
Flexibilis lemez	6,80	7,30	7,35



5. ábra. A vizsgált kapcsolat szoftveres modellje



6. ábra. Szakadó kúpos tönkremeneteli mód az utólagos rögzítések kapcsolat esetén [8]

son keresztül adódik át, így a lehorgonyzás teljes hosszában aktiválódik a teherátvitel. Ezzel szemben a mechanikus dübelek expanziós működése a lehorgonyzási zónában koncentráltabb feszültségállapotot hoz létre, amely bizonyos befogási mélységek mellett kedvezőbb teherfelvételt eredményezhet.

Az eredmények azt mutatták a vizsgált kapcsolatok esetén, hogy 100 mm-es befogási mélység esetén a mechanikus dübelek nyomatéki teherbírása valamivel meghaladja a ragasztott dübelekét. A különbség azonban mérsékelt, és nem tekinthető jelentősnek a vizsgált terhelési tartományban.

A **4. táblázat** a ragasztott és mechanikus dübeles kapcsolatok nyomatéki teherbírási értékeit szemlélteti.

A számítások minden esetben kiegészítő vasalás alkalmazása nélkül készültek. Ennek megfelelően a betonoszlopban kizárólag az alapvető szerkezeti vasalás szerepel, de nem kerültek elhelyezésre olyan kiegészítő húzott vasak, amelyek növelnék a kapcsolat teherbírását. Az **5. ábra** a vizsgált kapcsolat Hilti PROFIS Engineering szoftverben létrehozott modelljét szemlélteti.

3. Eredmények tárgyalása

A megfigyelések alapján mind az analitikus, mind a Hilti PROFIS Engineering szoftverrel végzett numerikus vizsgálatok során 100 mm befogási mélység mellett a szakadó kúpos tönkremenetel bizonyult a domináns tönkremeneteli módnak mind a ragasztott, mind a mechanikus dübelek esetében. Mivel a kapcsolat nyomatéki teherbírását ebben az esetben a beton szakadó kúpos kapacitása korlátozza, a parametrikus vizsgálatok középpontjába e tönkremeneteli mód kapacitásnövelési lehetőségei kerültek. A szakadó kúpos tönkremeneteli módot utólagos rögzítések kapcsolat esetén a **6. ábra** szemlélteti.

A szakadó kúpos tönkremenetelre több geometriai és anyagjellemző is hatással van. A vizsgált kapcsolati kialakításban azonban számos paraméter – így a dübelektől számított éltávolság és a dübelek közötti távolság – adott, mivel ezek meg egyeznek az [1] hivatkozásban bemutatott színelő homloklemez-es kapcsolat eredeti csavarkiosztásával és a jelen tanulmányban nem kerültek ezek a paraméterek módosításra. Emiatt a nyomatéki

teherbírás reálisan csak a befogási mélység (h_{ef}) növelésével és a beton szilárdságának megváltoztatásával növelhető.

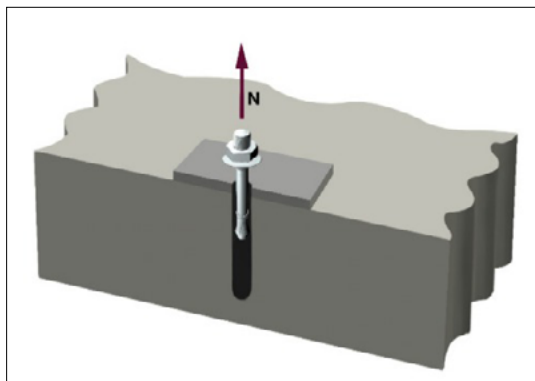
A Hilti PROFIS Engineering szoftverrel végzett parametrikus vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a befogási mélység növelésével mindkét dübeltípus esetén növekedett a kapcsolat nyomatéki teherbírása, azonban eltérő mértékben és eltérő tönkremeneteli módok mellett.

A ragasztott dübeleknél a parametrikus vizsgálat a befogási mélység növelésével fokozatosan emelkedő teherbírási növekedést mutatott. A 100 mm-ről 200 mm-re történő növelés mintegy 66% teherbírási növekedést eredményezett, amely az **5. táblázat** adataiban is megfigyelhető. A befogási mélység növelésével a ragasztott dübeleknél mindvégig a szakadó kúpos tönkremenetel maradt a domináns mód.

A mechanikus dübeleknél a teherbírás növekedése lényegesen mérsékeltebb volt, amit a **6. táblázat** is alátámaszt.

5. táblázat. A ragasztott dübeles kapcsolat nyomatéki teherbírása a befogási mélység függvényében flexibilis homloklemez esetén

Flexibilis lemez Ragasztott dübel	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$\Delta M_{j,Rd}^{100}$ [%]
$h_{ef}=100\text{mm}$	6,80	0
$h_{ef}=120\text{mm}$	8,75	28,68
$h_{ef}=140\text{mm}$	10,30	51,47
$h_{ef}=160\text{mm}$	10,65	56,62
$h_{ef}=180\text{mm}$	10,95	61,03
$h_{ef}=200\text{mm}$	11,30	66,18



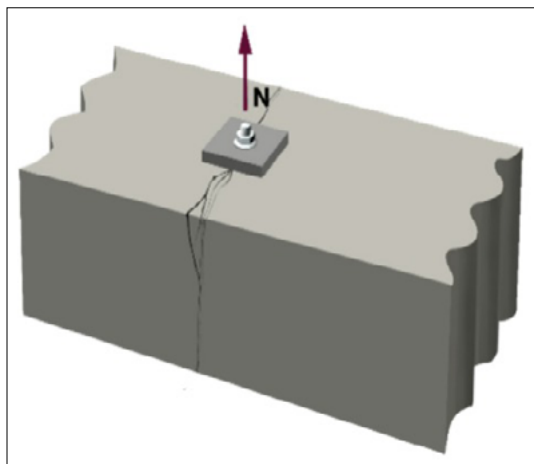
7. ábra. Kihúzódasos tönkremeneteli mód az utólagos rögzítéses kapcsolatok esetén [8]

A 120 mm-es befogási mélységnél a nyomatéki teherbírás 19,2%-kal, 140 mm-es mélységnél szintén 19,2%-kal haladta meg a 100 mm-es referenciaértéket. Mindkét tartományban a domináns tönkremeneteli mód a kihúzódasos tönkremenetel volt. Kihúzódas esetén a rögzítő elem az egész befogási zónából kihúzódik anélkül, hogy a betontest jelentősen sérülne. Ezt a tönkremeneteli módot a **7. ábra** szemlélteti.

A befogási mélység 160 mm-re történő növelésével azonban a meghatározó tönkremeneteli mód betonfelhasadásra váltott (**8. ábra**). Ennek következtében a teherbírás már nem nőtt tovább, hanem csekély mértékben, 1,37%-kal csökkent a 100 mm-es alapértékhez viszonyítva. A beton felhasadása akkor következik be, amikor a dübel expanziója által létrehozott sugárirányú feszültségek meghaladják a beton húzószilárdságát. A felhasadás tipikus jellegzetessége a dübel tengelyéből kiinduló, többirányú repedéssávok kialakulása.

6. táblázat. A mechanikus dübeles kapcsolat nyomatéki teherbírása a befogási mélység függvényében flexibilis homloklemez esetén

Flexibilis lemez Mechanikus dübel	$M_{j,Rd}$ [kNm]	$\Delta M_{j,Rd}^{100}$ [%]
$h_{ef}=100\text{mm}$	7,30	0
$h_{ef}=120\text{mm}$	8,70	19,18
$h_{ef}=140\text{mm}$	8,70	19,18
$h_{ef}=160\text{mm}$	7,20	-1,37



8. ábra. A beton felhasadásának tönkremeneteli módja az utólagos rögzítéses kapcsolatok esetén [8]

A tönkremeneteli módok változását jól magyarázza, hogy a kihúzódasos tönkremenetel elsősorban a dübelek számától, átmérőjétől és a beton szilárdságától függ, míg a beton felhasadásának tönkremeneteli módja érzékeny a dübelek közötti távolságra, a dübelek éltől való távolságára, a beton húzószilárdságára, a beton vastagságára, valamint a befogási mélység növekedésére. A vizsgált kapcsolati kialakításban a dübelszám és -átmérő, az él- és dübeltávolságok rögzítettek és nem módosíthatók, ezért a mechanikus dübelek befogási mélységének növelése egy ponton – megközelítőleg 160 mm körül – eléri azt a tartományt, ahol a beton felhasadásának tönkremeneteli kockázata már dominánsabbá válik, mint a kihúzódasási mód. Ennek következtében a teherbírás a nagyobb befogási mélységek esetén már nem nő tovább, hanem csökkenni kezd, ami egyértelműen jelzi a mechanikus dübelek konstrukciós működéséből fakadó lehorgonyzási mélység korlátját.

Következő lépésben a szerzők a beton szilárdsági osztályának hatását értékelték a kapcsolat nyomatéki teherbírására nézve. Ennek vizsgálatához, a befogási mélység elemzéséhez hasonlóan, paraméteres számítások készültek C25/30 és C30/37 betonminőségek alkalmazásával.

A ragasztott dübelek esetében a beton szilárdságának növelése minden vizsgált befogási mélységnél változatlanul a szakadó kúpos tönkremenetelt eredményezte domináns tönkremeneteli módként. A beton szilárdsági osztályának C25/30-ról C30/37-re történő növelésével elért nyomatéki teherbírási változásokat a **7. táblázat** foglalja össze.

A **7. táblázat**ban bemutatott eredmények azt mutatják, hogy a szilárdsági osztály növelése a befogási mélységtől függetlenül megközelítőleg 10% körüli nyomatéki teherbírás-növekedést

eredményez. A legnagyobb kapacitás a vizsgált kapcsolatok esetén a 200 milliméteres befogási mélységnél jelentkezett, ahol a kapcsolat teherbírása elérte a 12,45 kNm értéket.

A mechanikus dübelek esetében a beton szilárdságának növelésekor – hasonlóan a befogási mélység hatásának vizsgálatánál tapasztaltakhoz – a tönkremeneteli mód ismét nem maradt egységes, hanem a befogási mélységtől függően változott. A szoftveres eredmények azt mutatták, hogy 100 mm befogás mellett továbbra is a szakadó kúpos tönkremenetel lépett fel, 120 mm és 140 mm esetén már a kihúzódasos tönkremenetel vált meghatározóvá, míg 160 mm befogási mélységnél a felhasadásos tönkremenetel dominált. A **8. táblázat** a megfelelő befogási mélységekhez tartozó nyomatéki teherbírási értékeket foglalja össze.

A teherbírás alakulását tekintve a C25/30-ról C30/37 betonminőségre történő átállás a mechanikus dübelek esetében minden vizsgált befogási mélységnél körülbelül 10%-os nyomatéki teherbírás-növekedést eredményezett. A nyomatéki teherbírás javulása tehát ebben az esetben is egyértelműen megfigyelhető, ugyanakkor a nagyobb befogási mélységeknél jelentkező felhasadásos tönkremenetel miatt a teherbírás további növelésének lehetősége korlátokba ütközik.

A paraméteres vizsgálatok eredményei alapján a ragasztott dübelek esetében a legnagyobb nyomatéki teherbírás a 200 mm befogási mélységű, C30/37 szilárdságú betonba rögzített kapcsolati kialakítással érhető el, amely 12,45 kNm nyomatéki teherbírást biztosított. A mechanikus dübelek esetében a legnagyobb teherbírás a 120–140 mm befogási mélységű, C30/37 betonba ágyazott konfigurációnál jelentkezett, ahol a kapcsolat nyomatéki kapacitása 9,60 kNm volt. A két rögzítési technológia legkedvezőbb kialakításait össze-

7. táblázat. A ragasztott dübeles kapcsolat nyomatéki teherbírása a befogási mélység függvényében flexibilis homloklemez és C30/37 szilárdságú beton esetén

Flexibilis lemez Ragasztott dübel	$M_{i,Rd}$ [kNm]		$\Delta M_{i,Rd}^{100}$ [%]
	C25/30	C30/37	
$h_{ef} = 100\text{mm}$	6,80	7,5	10,29
$h_{ef} = 120\text{mm}$	8,75	9,6	9,72
$h_{ef} = 140\text{mm}$	10,30	11,40	10,68
$h_{ef} = 160\text{mm}$	10,65	11,75	10,33
$h_{ef} = 180\text{mm}$	10,95	12,10	10,50
$h_{ef} = 200\text{mm}$	11,30	12,45	10,18

8. táblázat. A mechanikus dübeles kapcsolat nyomatéki teherbírása a befogási mélység függvényében flexibilis homloklemez és C30/37 szilárdságú beton esetén

Flexibilis lemez Mechanikus dübel	$M_{i,Rd}$ [kNm]		$\Delta M_{i,Rd}^{100}$ [%]
	C25/30	C30/37	
$h_{ef} = 100\text{mm}$	7,30	8,05	10,27
$h_{ef} = 120\text{mm}$	8,70	9,60	10,34
$h_{ef} = 140\text{mm}$	8,70	9,60	10,34
$h_{ef} = 160\text{mm}$	7,20	7,95	10,42

vetve megállapítható, hogy a ragasztott dübeles kapcsolat mintegy 30%-kal nagyobb nyomatéki teherbírást biztosít, mint a mechanikus megoldás. Ennek megfelelően a vizsgált konfigurációk közül a legnagyobb nyomatéki teherbírást a ragasztott dübeles, 200 mm befogási mélységű, C30/37 betonminőségű oszlopba ágyazott kapcsolat adta.

A **9. táblázat** a különböző gerenda-oszlop kapcsolatok nyomatéki teherbírását foglalja össze, amely kísérleti úton meghatározott, numerikusan számított és szabványos tervezési eljárással becsült eredményeket egyaránt tartalmaz. A táblázat első két konfigurációja (T2 és T3) az [1] hivatkozásban bemutatott öszvérkapcsolatokra vonatkozik, és laboratóriumi kísérletekben mért teherbírési értékeket mutat. Mivel ezek valós mérési eredmények, a későbbi összehasonlítások során referenciaértékként szolgálnak.

A [3] hivatkozásban szereplő NI és NC jelölésű kapcsolatok acélgerenda és acéloszlop közötti kapcsolatokra vonatkoznak, amelyek teherbírását numerikus úton határozták meg. Az NC jelölés a Consteel szoftver komponens módszeren alapuló számításait takarja, míg az NI az Idea StatiCa program CBFEM-eljárással (Component-Based Finite Element Method) készített végelemes modelljeit jelöli. E numerikus módszerek különböző biztonsági tényezőket és idealizált anyagmodelleket alkalmaznak, ami miatt a számított teherbírás jellemzően konzervatív; a tényleges, kísérletileg mérhető teherbírás ennél magasabb is lehet.

A táblázat utolsó két sora az ebben a tanulmányban vizsgált utólagos rögzítésű, acélgerenda-betonoszlop kapcsolatok eredményeit mutatja. A CA jelölés a ragasztott, míg az MA a mechanikus dübelekkel kialakított kapcsolatot jelenti. A p10mm a 10 mm vastag színelő homloklemezt jelöli, a hef

9. táblázat. Az öszvérgerenda-acéloszlop [1], acélgerenda-acéloszlop [3], illetve az acélgerenda és betonoszlop közötti kapcsolatok teherbírési értékei és összehasonlítása

Kapcsolat	$M_{i,Rd}$ [kNm]	$\Delta M_{i,Rd}^{-T3}$ [%]
T3 [1]	163,10	0
T2 [1]	147,40	-9,62
NC-p10mm [3]	34,00	-79,15
NI-p10mm [3]	31,02	-80,98
CA-p10mm- h_{ef} 200mm-C30/37	12,45	-92,37
MA-p10mm- h_{ef} 140mm-C30/37	9,60	-94,11

pedig az alkalmazott befogási mélységet. Ezeknek a konfigurációknak a nyomatéki teherbírása a Hilti PROFIS Engineering által alkalmazott, az EN 1992-4:2018 [2] szabvány szerinti részletes ellenőrzési eljárásból származik, amely több biztonsági tényezőt is tartalmaz. Emiatt a számított teherbírás jellemzően alulbecsüli a valóságban elérhető kísérleti kapacitást.

A **9. táblázatból** jól látható, hogy a T3-konfiguráció az abszolút referenciaérték (163,10 kNm). Ehhez viszonyítva az acéloszlop-acélgerenda kapcsolatok nyomatéki teherbírési értékei (NC- és NI-modellek) mintegy 80%-kal kisebbek. Az utólagos rögzítésű kapcsolatok teherbírása pedig további csökkenést mutat: a ragasztott dübeles, 200mm befogási mélységű konfiguráció 12,45kNm teherbírást ért el, a mechanikus dübeles megoldás pedig 9,60 kNm-t. Ezek az értékek a referencia T3 kísérleti kapacitáshoz viszonyítva rendre mintegy 92% és 94% mértékű csökkenést jelentenek.

A táblázat eredményei így rámutatnak arra, hogy bár a vizsgált dübeles kapcsolatok megfelelő nyomatékátadási képességgel rendelkeznek, teherbírásuk nagyságrendekkel elmarad az acél- vagy öszvérkapcsolatokétól. A Hilti PROFIS Engineering számításaiban alkalmazott biztonsági tényezők miatt ezek az értékek várhatóan konzervatívak, így a tényleges viselkedés a kísérletekben kedvezőbb is lehetne – ahogy azt a T2 és T3 csomópontok mérései is illusztrálják.

4. Következtetések

A tanulmány célja az acélgerenda és vasbeton oszlop közötti, utólagos rögzítésekkel kialakított színelő homloklemezes kapcsolat nyomatéki teherbírásának vizsgálata volt. A vizsgálat az EN 1992-4:2018 [2] szabvány előírásaira épülő analitikus számítások és a Hilti PROFIS Engineering szoftver numerikus eredményeinek összevetésével valósult meg. A két módszer jó egyezést mutatott, ami megerősíti, hogy a szoftver helyesen implementálja a szabvány szerinti ellenőrzéseket, és alkalmas a vizsgált kapcsolati konfigurációk teherbírásának megbízható becslésére.

A parametrikus vizsgálatok rámutattak, hogy a vizsgált kapcsolat nyomatéki teherbírását elsősorban két tényező befolyásolja: a dübelek befogási mélysége és a beton szilárdsági osztálya. A geometriai korlátok (éltávolság, csavarkiosztás) miatt más paraméterek nem voltak módosíthatók.

A ragasztott dübeles kapcsolatok a befogási mélység növelésére érzékenyen reagáltak: a te-

herbírási 100 mm-ről 200 mm-re növelt lehorgonyzási hossz mellett mintegy 66%-kal emelkedett, miközben a tönkremeneteli mód végig szakadó kúpos maradt. A beton szilárdságának C25/30-ról C30/37-re történő növelése további, közel 10%-os kapacitásjavulást eredményezett minden vizsgált mélységnél. A legnagyobb teherbírási 12,45 kNm értékkel a 200 mm befogási mélységű, C30/37 szilárdságú betonra rögzített ragasztott dübeles kapcsolat esetében jelentkezett.

A mechanikus dübelek viselkedése a lehorgonyzási mechanizmus sajátosságai miatt eltérően alakult. Bár 120–140 mm befogási mélységig mintegy 19% teherbírási-növekedés volt tapasztalható, 160 mm-es lehorgonyzásnál a felhasadásos tönkremenetel vált meghatározóvá, ami a teherbírási csökkenését eredményezte. A beton szilárdságának növelése itt is közel 10%-os teherbírási-javulást eredményezett, de a mechanikus rögzítések esetében a korlátot a felhasadás kockázata szabja meg, ami a nagyobb befogási mélységek alkalmazhatóságát korlátozza. A legnagyobb elért kapacitás 9,60 kNm volt ennél a megoldásnál.

A különböző kapcsolattípusok összehasonlítása azt mutatja, hogy a vizsgált utólagos rögzítéssel kialakított beton-acél kapcsolatok teherbírási jelentősen elmarad mind a kísérletileg vizsgált öszvércapcsolatok (T2, T3), mind a numerikusan elemzett acél-acélkapcsolatok teherbírástól. Ennek oka egyrészt a dübeles kapcsolatok korlátozott teherátadási képessége, másrészt az EN 1992-4:2018 [2] szerinti ellenőrzésekben alkalmazott biztonsági tényezők konzervativizmusa, amely a tényleges viselkedést várhatóan alulbecsüli.

Összességében megállapítható, hogy az utólagos rögzítésekkel kialakított acélgerenda és vasbeton oszlop közötti kapcsolatok alkalmasak a nyoma-

tékátadás biztosítására, azonban kapacitásuk a hagyományos acél-acél vagy kompozitkapcsolatokhoz képest lényegesen kisebb. A vizsgálatok ugyanakkor rávilágítanak arra, hogy megfelelő paraméter-választással a kapcsolat teljesítménye optimalizálható, és a rendszer bizonyos mérnöki alkalmazásokban életképes alternatívát kínálhat.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek e külső kutatási projekt keretében nyújtott támogatásáért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gil B., Bayo E.: *An Alternative Design for Internal and External Semi-Rigid Composite Joints. Part I: Experimental Research*. Engineering Structures, 2008/30. 218–231.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.009>
- [2] EN 1992-4:2018: Design of Concrete Structures-Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete, 2018.
- [3] Sütő A. B., Urszuly N., Lőrincz B. A., Nagy Zs., Buru M. Ş.: *Acéloszlop és acélgerenda közötti homloklemez kapcsolatok viselkedésének analitikus és numerikus vizsgálata*. In: Műszaki Tudományos Közlemények, 22. (2025) 106–109.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2025.22.18>
- [4] ETA-20/0541: Hilti HIT-RE 500 V4 Injection mortar, 2025.
- [5] ETA-98/0001: Hilti HST3 Expansion Anchor, 2023.
- [6] EN 1993-1-8:2005: Design of Steel Structures-Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [7] Das A., Genesio G.: *Steel-to-Concrete Connections Using Post-Installed Systems*. Ver 1.0. Hilti Aktiengesellschaft, Schaan, 2025.
- [8] Gubskly A., Figoli R.: *Anchor Fastening Technology Manual*. Hilti Aktiengesellschaft, Schaan, 2023.