



Szétszerelhető acél-beton öszvérgerendák vizsgálata és méretezése

PhD Disszertáció összefoglalása

Király Krisztián

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Témavezető:

Dr. Dunai László

Egyetemi tanár

Szakmai tanácsadó:

András Balázs Kocsis

Európai Mérnök

Tanácsadó:

Dr. Luis Calado

Professor

Budapest

2026

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
1 Bevezetés.....	2
2 A javasolt szétszerelhető acél-beton együttdolgozó szerkezeti rendszer.....	3
3 A nyírt kapcsolóelemek vizsgálata és viselkedése.....	5
4 Az öszvérgerendák kísérleti vizsgálata és viselkedése.....	8
5 Az öszvérgerendák numerikus vizsgálata és viselkedése.....	12
6 A tervezési módszer kidolgozása.....	16
7 A disszertáció következtetései.....	19
7.1 Új tudományos eredmények.....	19
1. Tézis.....	19
2. Tézis.....	20
3. Tézis.....	20
4. Tézis.....	21
7.2 A tézisekkel kapcsolatos publikációk.....	22
7.3 További kutatási és fejlesztési lehetőségek.....	24
Hivatkozások.....	24

1 Bevezetés

Az építőipar körforgásos gazdaság felé történő átállása olyan tartószerkezeti rendszerek alkalmazását igényli, amelyek csökkentik a környezeti hatásokat és a beépített szén-dioxid-kibocsátást, valamint – ahol ez megvalósítható – lehetővé teszik az elemek közvetlen újrafelhasználását. A szétszerelésre való tervezés ezt a szemléletet támogatja azáltal, hogy az épületeket visszanyerhető anyagkészletként kezeli, és előnyben részesíti azokat a megoldásokat, amelyek az elemek értékét egyetlen életcikluson túl is megőrzik [1]. Az acél-beton öszvérszerkezetek alkalmasak a körforgásos tervezés megvalósítására, amennyiben az acél- és betonrészek elválasztását elfogadható mértékű károsodással biztosítani lehet. Ennek eredményeként jelentek meg a szétszerelhető öszvérszerkezetek, amelyekben az oldható nyírt kapcsolóelemek kulcsszerepet töltenek be: üzemi állapotban biztosítják az együttdolgozást, ugyanakkor lehetővé teszik a szerkezet szétszerelését és újrafelhasználását. A szerkezeti acél jól újrahasznosítható, ugyanakkor a legújabb kutatások szerint a közvetlen újrafelhasználás jelentősen nagyobb beépített szén-dioxid-megtakarítást eredményezhet, mint az újrahasznosítás [2,3]. Az előregyártott beton javítja a minőségellenőrzést, valamint csökkenti a helyszíni munkaidőt és a hulladék-képződést. Karboncsökkenése a monolit szerkezetekhez képest projektfüggő, ugyanakkor alacsony kibocsátású kötőanyagok, újrahasznosított adalékanyagok és az újrafelhasználásra optimalizált szerkezeti kialakítás alkalmazásával tovább fokozható [4,5]. Esettanulmányok igazolják a szétszerelhető szerkezetek gyakorlati megvalósíthatóságát, különösen ideiglenes vagy rugalmasan alakítható rendeltetésű létesítmények – például rendezvényhelyszínek [6], parkolóépületek [7] és irodaépületek [8] – esetében, ahol a rendszerelvű előregyártás és a száraz kapcsolatok gyors, alacsony hulladékképződéssel járó átalakítást tesznek lehetővé.

A gyakorlati szerelési tűrések általában túlméretes furatok alkalmazását igénylik, amely a nyírt kapcsolóelem kezdeti megcsúszását okozza, csökkentve ezáltal a szétszerelhető öszvérszerkezetek kezdeti merevségét [9,10]. Ennek megfelelően a kapcsolóelemek részletkialakításának és beépítésének egyensúlyt kell teremtenie a szerelhetőség, valamint a megfelelő merevség, teherbírás, alakváltozási képesség (duktilitás), valamint a megbízható szétszerelhetőség követelményei között. Számos kutatásban vizsgálták és fejlesztettek oldható nyírt kapcsolóelemeket, pl. nagy szilárdságú feszített kapcsolatként működő csavarok alkalmazásával [11], vagy túlméretezett furatokba injektált műgyantával a kezdeti megcsúszás csökkentése érdekében [12].

A közelmúlt kutatásai különböző oldható nyírt kapcsolóelem koncepciókat javasoltak mind monolit, mind előregyártott födémelekhez, és nagyléptékű gerendakísérletek igazolták, hogy a szétszerelhető öszvérszerkezetek globális viselkedése megfelelő, továbbá összevethető a

hegesztett fejes csapokkal kialakított rendszerekével, miközben biztosítják a szétszerelést és az újrafelhasználást [13,14]. Fejlett végeelemes modellezési eljárások feltárták a lokális mechanizmusokat és reprodukálták a kísérletek során megfigyelt viselkedést [15], ugyanakkor számos modell egy adott kapcsolóelem részletéhez kötődik, amely korlátozza azok közvetlen alkalmazhatóságát az általános gerendaméretezésben.

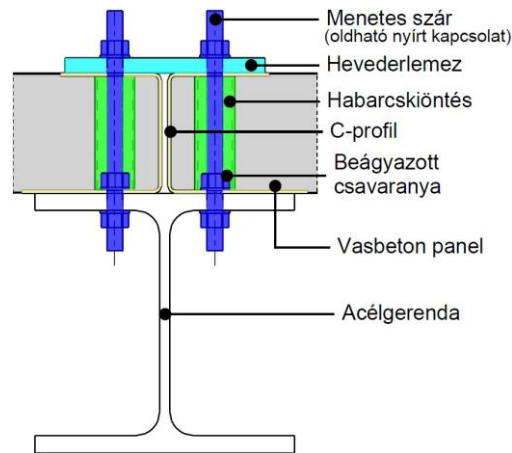
A szétszerelhető öszvérgerendák méretezésére jelenleg korlátozott, mivel az Eurocode 4 [16] előírásai elsősorban a hagyományos (nem szétszerelhető) nyírt kapcsolatokra vonatkoznak. E hiány pótlására Kozma [17] egy Eurocode-kompatibilis számítási módszert dolgozott ki, amely a szétszerelhető – jellemzően nem duktilis – nyírt kapcsolóelemek megfigyelt, több lineáris szakaszból álló erő-megcsúszás kapcsolatát egy feltételezett hosszirányú megcsúszás-eloszlás alkalmazásával hatékony nyírási teherbírássá alakítja az öszvérgerendák méretezéséhez. A közelmúltban megjelent útmutató a szétszerelhető öszvérszerkezetek tervezéséhez [18] gyakorlati ajánlásokat fogalmaz meg, melyek azonban adott kapcsolóelemtípusokra korlátozódnak, illetve túl általános megközelítést alkalmaznak, amely korlátozza a megalapozott tervezői döntéshozatalt. Ezért pontosabb méretezési eljárás szükséges, amely figyelembe veszi az oldható nyírt kapcsolóelemek részletkialakítását, különösen azokban az esetekben, amikor a túlméretes furatok és a kivitelezési tűrések jelentősen befolyásolják a szerkezeti viselkedést.

A jelen kutatás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint a KÉSZ Csoport, bim.GROUP Kft. ipari partner együttműködésében valósult meg, melynek célja egy újrafelhasználható, szétszerelhető acél-beton öszvérfödém kifejlesztése. A rendszer előregyártott elemeket és újszerű részletkialakítást ötvöz, javítva a gyártási és szerelési tűrések kezelését, csökkentve a helyszíni munkaigényt, amely egyszerű és költséghatékony építési megoldásokkal gyors szerelést és bontást tesz lehetővé. A kutatás célja továbbá a javasolt rendszer tudományos megalapozása laboratóriumi kísérletek és numerikus szimulációk segítségével, a rendszer egyedi mechanikai viselkedésének értékelésén keresztül. A munka elsődlegesen a javasolt rendszerre kidolgozott, Eurocode-alapú számítási eljárás létrehozására irányul, amely meghatározza a kapcsolóelemek hatékony nyírási teherbírását, az öszvérgerenda rugalmas és képlékeny nyomatéki teherbírását, valamint a használhatósági határállapotokban történő ellenőrzést – lehajlást és végmegcsúszást – a szétszerelés és újrafelhasználás figyelembevételével.

2 A javasolt szétszerelhető acél-beton együttdolgozó szerkezeti rendszer

A javasolt szerkezeti rendszer melegen hengerelt acélgerendákból és előregyártott vasbeton panelekből áll. Az együttdolgozást a panelekbe ágyazott menetes száruk biztosítják, amelyek oldható nyírt kapcsolóelemként működnek. Az *1. ábra* bemutatja azokat a kulcsfontosságú

fejlesztési részleteket, amelyek a túlméretes furat kedvezőbb kezelését, a gyártási és kivitelezési megvalósíthatóság javítását, valamint a nyírt kapcsolóelemek szerkezeti viselkedésének – különösen a kezdeti merevség, a teherbírás és a képlékeny alakváltozási képesség – fejlesztését célozzák, melyek az alábbiak:



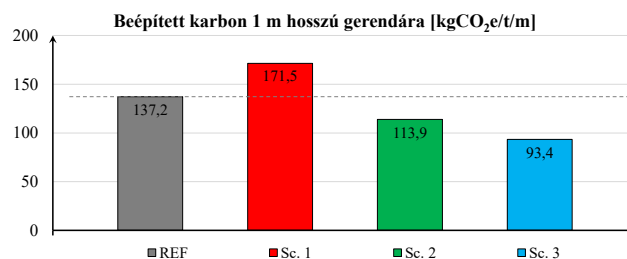
1. ábra: A javasolt oldható nyírt kapcsolat

- előregyártott vasbeton panelek, helyszíni betonozás nélkül,
- panelekbe ágyazott acél C-profilok a panelgeometria és a csavarok helyzetének pontosabb igazításához,
- habarcskitöltés a kapcsolóelemek körül a kedvezőbb tűrések elérésére,
- habarcsba ágyazott csavaranyák a kedvezőbb szerelés és kapcsolóelem merevség érdekében,
- hevederlemezek a panelek között a globális szerkezeti merevség fokozására.

A beágyazott C-profilok előfúrt furatai 2 mm hézaggal fogadják az oldható nyírt kapcsolóelemeket az acél övben. A menetes szárat alulról meghúzzák, majd az előregyártott panelekbe helyezett bordázott csöveket habarccsal töltik ki, így az övben lévő furatok üresek maradnak, és a kapcsolóelemek továbbra is oldhatók maradnak. A födém felső síkjára hevederlemez helyeznek a globális merevség és a tárcsaszerű viselkedés javítása érdekében. Egyszerűsített alternatívaként a kapcsolóelemek habarcs nélkül is elhelyezhetők a panelekben, azonban ekkor a gyártási tűrések kezeléséhez 4 mm-es túlméretes furat szükséges. Mindkét esetben a szétszerelés a csavaranyák meglazításával történik, amely lehetővé teszi az elemek vágás nélküli szétválasztását, miközben biztosítja az együttdolgozást. A sérült kapcsolóelem fúrással eltávolítható, majd új kapcsolóelemmel és a megfelelő szerkezeti viselkedés megőrzése érdekében az eredeti minőségű habarccsal vagy betonnal újra elkészíthető.

A javasolt szétszerelhető rendszer a fenntarthatósági célokkal összhangban lehetővé teszi az előregyártást, a gyors szerelést és bontást, valamint az elemek újrafelhasználását. Ezáltal

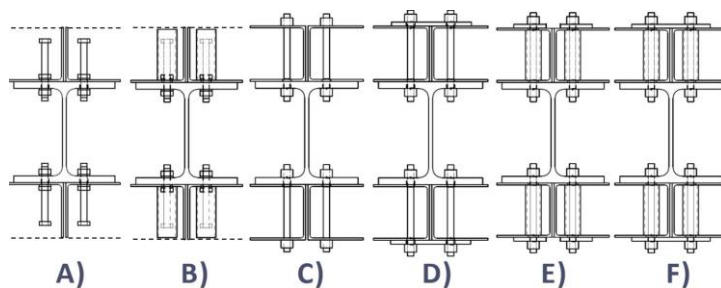
csökkenti a beépített szén-dioxid mennyiséget, minimalizálja a hulladékot, és a hagyományos, hegesztett fejes csapos öszvérfödémekhez képest mérsékli a károsanyag kibocsátást. Egy egyszerűsített beépített karbonlábnyom elemzés rávilágít a rendszer újrafelhasználási potenciáljára, összehasonlítva egy hagyományos öszvérfödémet különböző újrafelhasználási kimenetekkel. Csak újrahasznosítást feltételezve (Sc. 1), a kifejlesztett rendszer beépített szén-dioxidja a referenciaérték 1,25-szöröse a javasolt részletkialakítások miatt. Alacsony fokú újrafelhasználás esetén (Sc. 2), 80%-os elem-újrahasznosítással és az összes kapcsolóelem cseréjével a referenciaérték 83%-át éri el, míg nagy fokú újrafelhasználás esetén (Sc. 3), 95%-os elem- és 80%-os kapcsolóelem-újrafelhasználással 68%-ot ér el, amely azt mutatja, hogy már mérsékelt újrafelhasználás is ellensúlyozza a kezdeti karbonlábnyomot, és alátámasztja a rendszer alkalmazhatóságát a körforgásos tervezésben. Az egységnyi (1 m) hosszú öszvérgerenda beépített szén-dioxid-értékeinek összehasonlítását a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: Egységnyi (1 m) hosszú öszvérgerenda beépített szén-dioxid értékeinek összehasonlítása

3 A nyírt kapcsolóelemek vizsgálata és viselkedése

A javasolt szétszerelhető nyírt kapcsolóelemek viselkedését hat különböző kialakításban kinyomókísérleti program keretében vizsgáltuk, minden konfigurációt három névlegesen azonos próbatesten. A vizsgálat a túlméretes furatok, a beágyazott C-profilok, a menetes szárak, a habarccsal történő kitöltés és a hevederlemez hatását elemezte. Minden próbatest egy HEB260 S235 acélgerendából és négy előregyártott C50/60 panelből állt, panelenként két M16 8.8 kapcsolóelemmel (próbatestenként nyolc kapcsolóelemmel). Az A-B konfigurációk referenciaként L-profilokkal, beágyazott csavarokkal és anyákkal készültek, míg a C-F kialakítások beágyazott C-profilokat, menetes szárakat és a panel felső részén, valamint az acél öv alatt elhelyezett anyákat tartalmaztak. A kapcsolóelemeket kézi erővel rögzítettük a gyakorlati helyszíni szerelést reprezentálva. A B, E és F próbatesteknél a menetes szárak köré helyszíni habarcskiöntést alkalmaztunk, miután a beton elérte a szükséges szilárdságot, és a kapcsolóelemeket a panelekbe előre beépített bordázott acélcsövekbe helyeztük. A habarcs jellemző nyomószilárdsága 62 MPa, rugalmassági modulusa 26 GPa. Ezen felül a D és F próbatesteknél hevederlemez helyezettünk a panelek tetejére, a nyírt kapcsolóelemek merevségének növelése érdekében. A próbatestek konfigurációját a 3. ábra, az előkészített próbatestet pedig a 4. ábra szemlélteti.



3. ábra: A kinyomókísérleti próbatestek típusai

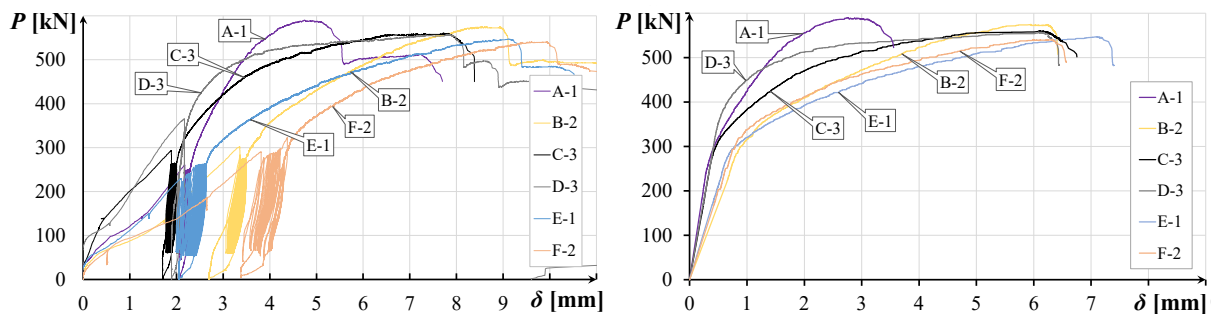


4. ábra: Egy előkészített kinyomókísérleti próbatest

A kinyomókísérleteket az Eurocode 4 szerinti terhelési történet szerint végeztük, amely 25 előterhelési ciklusból, majd monoton terhelésből állt, egy 6000 kN kapacitású terhelőberendezésben. Az elmozdulásmérő szenzorok a globális és a relatív elmozdulások nyomonkövetésére szolgáltak, míg a csavarok mellett, az acél övben elhelyezett nyúlásmérő bélyegek a feszültségeloszlást mérték. Az anyagvizsgálatok szerint a beton jellemző nyomószilárdsága 70,7 MPa, a habarcsé 59,4 MPa, a csavar húzószilárdsága pedig 944,6 MPa.

Az előterhelési ciklusokat a szerelési bizonytalanságok kiküszöbölésére alkalmaztuk, a csavarok beállításának és a panelek elmozdulásának aktiválásával, így a mért maradó megcsúszás (kb. 1,5-3,4 mm) a kapcsolóelem kezdeti megcsúszása, amelynek megfelelően eltoltuk az erő-relatív elmozdulás görbéket a különböző konfigurációjú kapcsolóelemek merevségének, teherbírásának és duktilitásának következetes összehasonlítása érdekében. Mind a közvetlenül mért, mind az átalakított erő-relatív elmozdulás görbéket kiértékeltek, melyeket az 5. ábrán láthatunk minden kapcsolóelem típusra. Az egyes változatok hasonló viselkedési karakterisztikával jellemezhetők, egységesen három lineáris szakaszból álló erő-megcsúszás görbével: (i) rugalmas, (ii) képlékeny átrendeződés és (iii) képlékeny alakváltozás szakasz, miközben a javasolt részletkialakítások kedvezően befolyásolták a viselkedést. A teherbírások viszonylag

szűk tartományba estek, a csavarok nyírási-hajlítási duktilis tönkremenetelével jellemezhető módon, amelyet a kapcsolóelemek körüli lokális beton vagy habarcs repedése és leválása kísért, amint azt a 6. ábrán láthatjuk.



5. ábra: Erő-relatív elmozdulás diagramok minden próbatestre kezdeti szakasszal (bal) és anélkül (jobb)

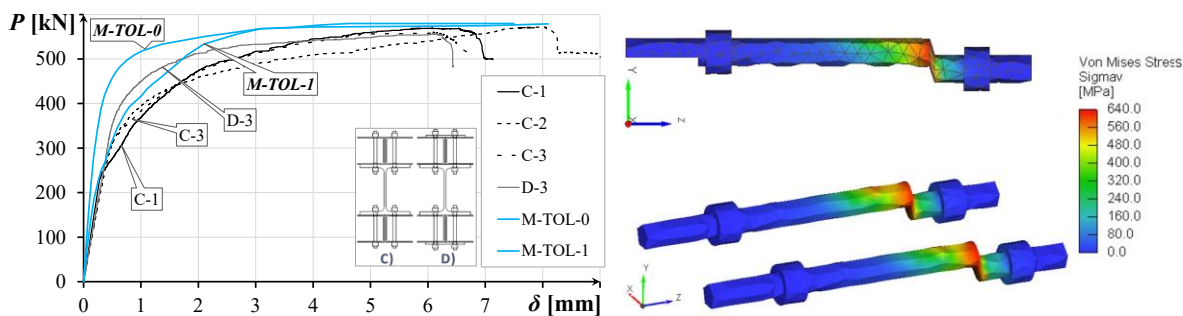


6. ábra: Csavarok tönkremenetele (bal), betonrepedés és habarcskitöltés a csavar alakváltozásával (jobb)

A habarcskiöntés növeli a megcsúszási kapacitást és a csavarok közötti erőeloszlását, anélkül, hogy jelentősen csökkentené a teherbírást, ugyanakkor mérsékli a kezdeti merevséget. A beágyazott anya növeli a kapcsolóelem merevségét, és habarcskiöntéssel kombinálva kedvező felkeményedő szakaszt eredményez, miközben a megcsúszás csak kissé nő a többi konfigurációhoz képest, így ez bizonyult a leghatékonyabb megoldásnak. A kapcsolóelem közvetlen környezetében lévő beton vagy habarcs, a megfelelően szabályozott furat toleranciák mellett, a szerkezeti viselkedés kulcsfontosságú tényezői, míg a hevederlemeznek nincs hatása.

Az ATENA [19] programban kidolgozott numerikus modellek megfelelően követik a kapcsolóelemek merevségét, teherbírást és tönkremeneteli módjait, ahogyan azt a 7. ábra erő-relatív elmozdulás diagramja, és a reprodukált tönkremeneteli mód szemlélteti. A validált modellek alapján paramétervizsgálatot végeztünk, amely kimutatta, hogy a csavar helyzete és anyagminősége elsősorban a szétszerelhető nyírt kapcsolat merevségét és teherbírást szabályozza, míg a beton minősége és vastagsága főként a repedésképződésre és a tartósságra hat, ugyanakkor nem változtatja meg a kapcsolóelemek alapvető viselkedését.

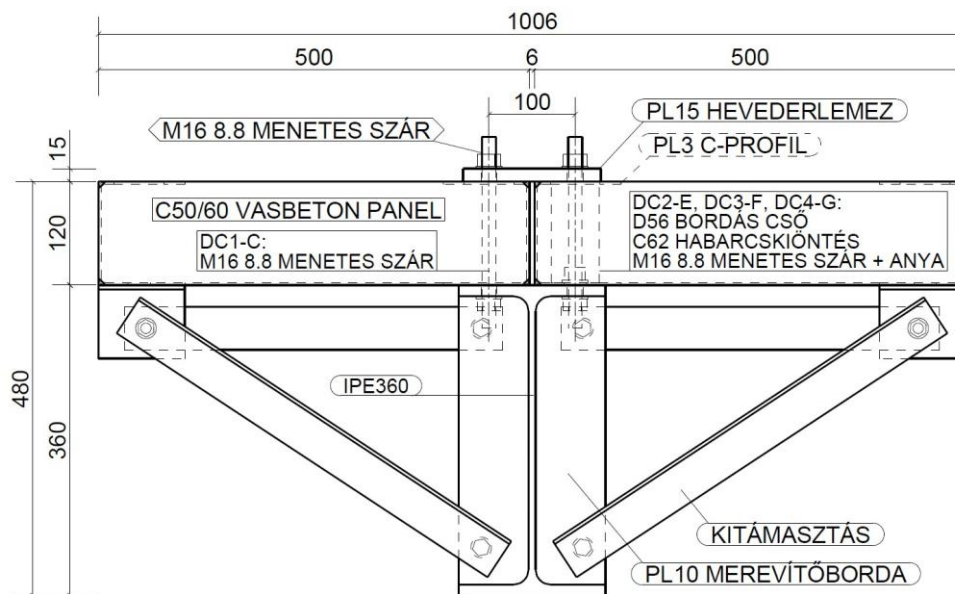
A javasolt szétszerelhető kapcsolóelem konfigurációk megfelelő merevséget, teherbírást és képlékeny alakváltozási képességet biztosítanak a gyakorlati alkalmazáshoz szétszerelhető öszvérgerendákban.



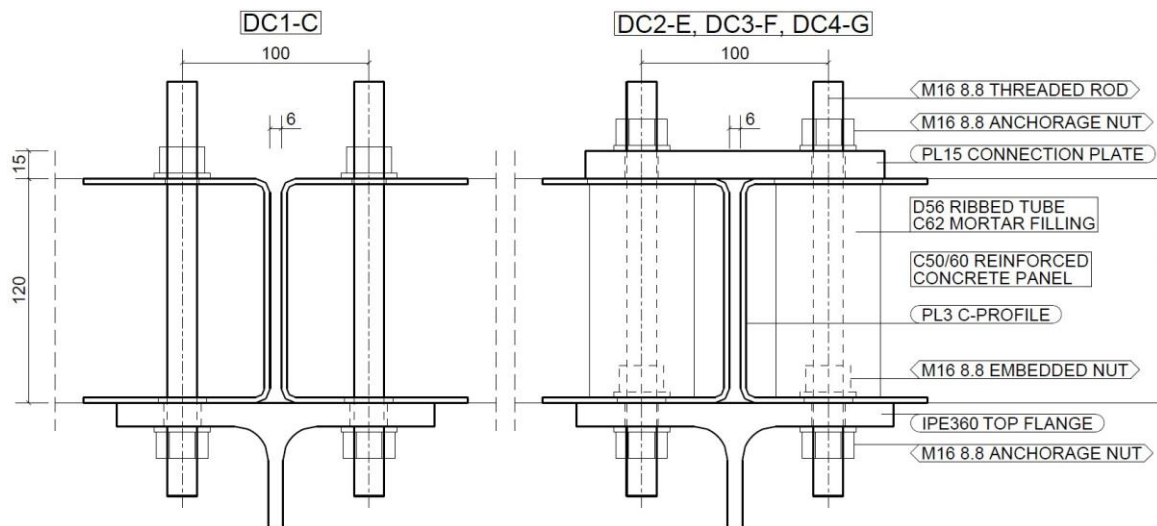
7. ábra: C-D típusú próbatestek erő-relatív elmozdulás diagramja (bal) és a csavarok tönkremenetele (jobb)

4 Az öszvérgerendák kísérleti vizsgálata és viselkedése

A javasolt szétszerelhető öszvérgerendák globális viselkedésének jellemzése érdekében a végektől számított 1,45 m távolságban, negyedelőpontjaiban terhelt gerendavizsgálatot hajtottunk végre, 5,8 m fesztávú, négy különböző kialakítású próbatesten. Minden próbatest IPE360 S355 acélgerendából és a keresztmetszetben két, egyenként 120 mm vastag előregyártott C50/60 vasbeton panelből állt, S235 acél C-profil kerettel ellátva. A DC1-C, DC2-E és DC3-F próbatestek két, hosszában folytonos panelből tevődtek össze, míg a DC4-G próbatest 5-5 elkülönített panelből állt. A DC1-C közvetlenül beágyazott kapcsolóelemekkel, a többi próbatest habarcskitöltéssel és azokba ágyazott anyákkal készült. A nyírt kapcsolóelemek 290 mm hosszanti kiosztásban, a középvonaltól szimmetrikusan 50 mm-re helyezkedtek el, melyeket 40 Nm nyomatékra húztunk meg. A DC3-F és DC4-G próbatestek esetében hevederlemezek helyeztünk el a panelek tetején. Az öszvérgerenda és a nyírt kapcsolatok általános részleteit a 8-9. ábrák szemléltetik, míg a 10. ábra az előkészített DC2-E és DC4-G próbatesteket illusztrálja, kiemelve az összeszerelt előregyártott paneleket és a kapcsolóelemek elrendezését.



8. ábra: Az öszvérgerenda általános kialakítása



9. ábra: A szétszerelhető nyírt kapcsolatok részletkialakításai



10. ábra: Az előkészített próbatestek

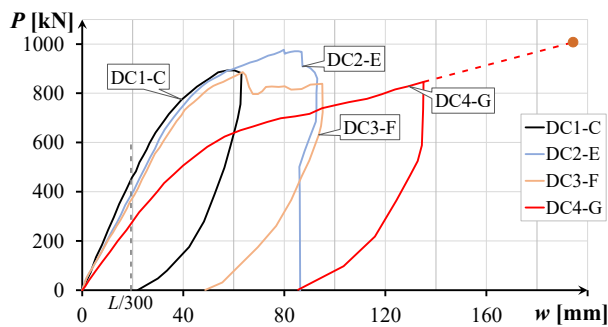
A négyponos hajlítóvizsgálat során elmozdulásmérő műszerek segítségével mértük a középső keresztmetszet lehajlását, a végmegcsúszást és a közbenső megcsúszást több pontban. Az acél szelvényen és a beton paneleken elhelyezett nyúlásmérő bélyegek a feszültségeloszlást követték. Az anyagvizsgálatok alapján a beton nyomószilárdsága 76,2 MPa, a habarcskiöntésé 70,6 MPa, míg a kapcsolóelemek szakítószilárdsága 941,8 MPa, az IPE360 szelvényé 544,6 MPa, a C-profiloké pedig 508,0 MPa. Az előkészített próbatestet a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra: DC4-G próbatest vizsgálati elrendezése – terhelőkeretek és mérőberendezések

A próbatesteket képlékeny globális viselkedés jellemzi. A tönkremenetel, a kinyomókísérleteknél tapasztaltakkal összhangban, a kapcsolóelemek nyírási-hajlítási tönkremenetelével következett be, amelyet jelentős gerenda lehajlás és a panelmegcsúszás kísért. A 12. (bal) ábra

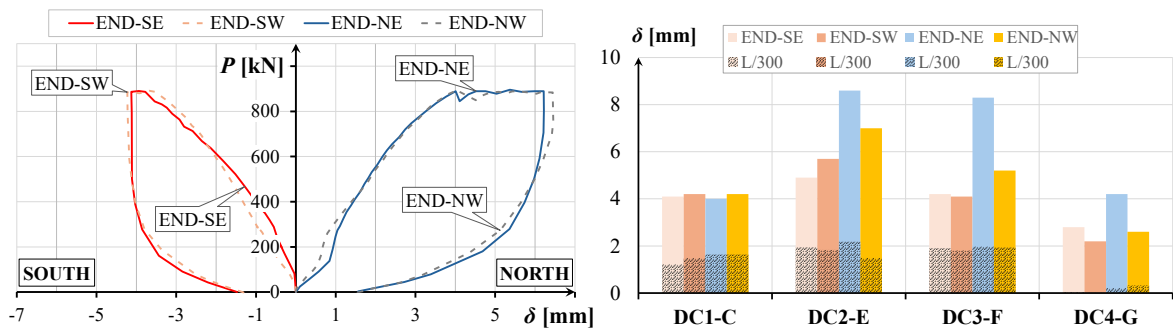
szemlélteti az egyes próbatestek erő-lehajlás görbéit, melyek kezdeti szakaszban lineárisak az acélgerenda alsó övének folyásáig, majd képlékeny szakasz következik a teherbírás eléréséig, melyet mérsékelt képlékeny leszálló ág követ. A betonpanelek túlnyomórészt rugalmas tartományban maradtak, és a tönkremenetel teher szintjén csak kisebb repedések jelentek meg a húzott szálban. A jelentős képlékeny alakváltozást a 12. (jobb) ábra demonstrálja.



12. ábra: Erő-lehajlás diagramok összehasonlítása (bal) és a DC4-G próbatest képlékeny alakváltozása (jobb)

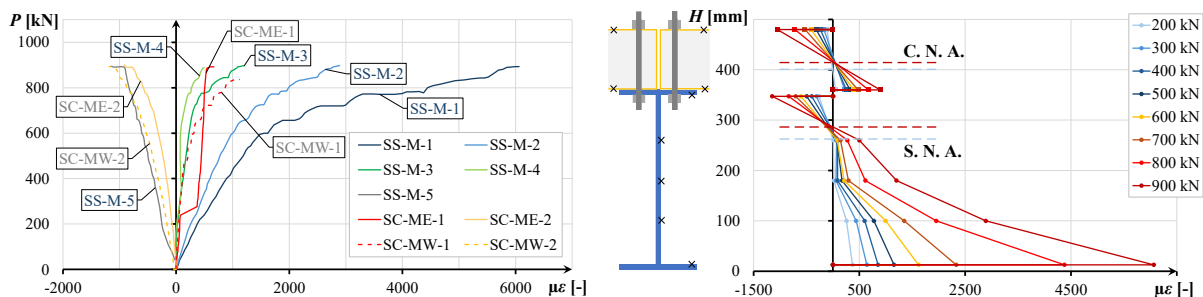
A két folytonos panelből álló gerendák (DC1-C, DC2-E, DC3-F) hasonló merevséget és teherbírást mutattak, mérsékelt duktilitás mellett. A DC1-C bizonyult a legmerevebbnek, amely a beton nagyobb nyomószilárdságnak és a közvetlenül beágyazott kapcsolati kialakításnak tulajdonítható. A DC2-E és DC3-F esetében az habarcskiöntés alkalmazása lágyabb viselkedést eredményezett, és javította a kapcsolóelemek közötti erőmegoszlást anélkül, hogy a teherbírás számottevően növekedett volna. A DC3-F próbatestnél a hevederlemezek nem növelték a teherbírás, ugyanakkor a viselkedést a némileg alacsonyabb teherbírással, az egyenlőtlen megcsúszás és a korlátozott csavarok közötti erőátadódás határozta meg. A hosszirányban elkülönített panelekkel ellátott DC4-G mutatta a legnagyobb képlékeny alakváltozási képességet, valamint ez érte el a legnagyobb teherbírás. Ez összhangban áll a panelek közötti relatív elmozdulásból adódó, kapcsolóelemek között hatékonyabb nyíróerő-eloszlásával. Jelen esetben a hevederlemezek kulcsszerepet játszanak a panelek közötti hosszirányú erőátadásban.

Az erő-végmegcsúszás görbék jól reprezentálják a nyírt kapcsolóelemek és a panelek együttdolgozási jellemzőit: a végmegcsúszás kismértékű és alapvetően szimmetrikus maradt, míg a DC2-E és DC3-F esetében a megcsúszás alakulásában enyhe aszimmetria jelentkezett. A DC4-G próbatestnél megoszló megcsúszás és több nemlineáris átmenet alakult ki az egyes panelek fokozatos aktiválódása miatt, ami egyenletesebb nyíróerőeloszlást tett lehetővé a kapcsolóelemek között. A 13. ábra a DC1-C erő-végmegcsúszás diagramját, valamint a végmegcsúszások összehasonlítását szemlélteti.



13. ábra: A DC1-C próbatétel erő-végmegcsúszás diagramjai (bal) és a végmegcsúszások összehasonlítása (jobb)

A nyúlásmérések a teher növekedésével először az acél alsó övének folyását jelezték, majd nagyobb terhelésnél a képlékeny tartomány a gerinc irányába is kiterjedt, miközben a beton a tönkremenetelig közel lineáris viselkedést mutatott. A semleges tengely a terhelés során elmozdult, ami a részleges nyírt kapcsolat következtében létrejött erőátrendeződére utal. A DC1-C próbatétel erő-megnyúlás diagramja és a megnyúlások eloszlása a 14. ábrán látható.



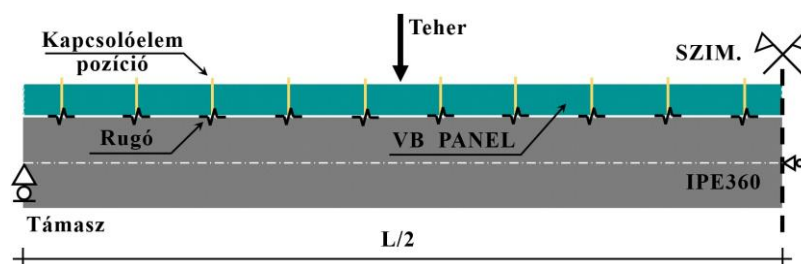
14. ábra: Erő-megnyúlás diagramok (bal) és a DC1-C próbatétel megnyúláseloszlási diagramjai (jobb)

A használhatósági határállapotban vett lehajlási határnál ($L/300 = 19,3$ mm) a szerkezet rugalmas tartományban maradt, képlékeny alakváltozás nem jelentkezett. A mért legnagyobb végmegcsúszás 2,2 mm volt, repedésképződés nélkül, amely biztosítja a szétszerelhetőséget, ugyanakkor közvetlenül a szét- és összeszerelést nem hajtottuk végre.

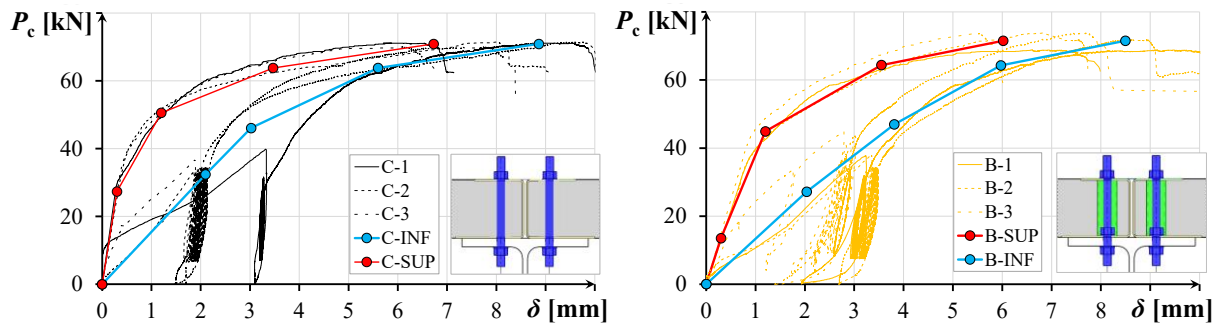
Összegzésként kijelenthető, hogy a habarcskiöntés és az abba ágyazott anyák, a kedvezőbb furat toleranciával együtt némileg csökkenti a kezdeti merevséget, ugyanakkor növeli a duktilitást és kedvezőbb nyíróerőeloszlást biztosít a kapcsolóelemek között. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a kivitelezési tűrések és a csavarok pontos pozicionálása meghatározó szerepet játszanak a nyírt kapcsolat hatékonyságában, valamint az öszvérgerenda merevségében és teherbírásában. Többpaneles kialakítás esetén a hevederlemezok létfontosságúak a szomszédos panelek közötti hosszirányú erök átviteléhez és a szerkezeti integritás fenntartásához. A kísérleti program igazolta, hogy a kifejlesztett rendszer megfelelő szerkezeti viselkedéssel rendelkezik, miközben lehetővé teszi a szét- és összeszerelést a mérnöki gyakorlatban.

5 Az öszvérgerendák numerikus vizsgálata és viselkedése

Az öszvérgerenda vizsgálatának kiterjesztése, valamint a mechanikai modell kidolgozása és az Eurocode-alapú tervezési eljárás támogatása érdekében numerikus modellt fejlesztettünk ANSYS programban [20], a folytonos panelekkel rendelkező próbatestekre alkalmazva: DC1-C-re és DC2-E/DC3-F-re. A hosszában nem folytonos panelekből álló DC4-G próbatest összetettsége miatt a jelen kutatásban nem vizsgáljuk. A globális modell a gerenda felét tartalmazza, a középső keresztmetszetenél szimmetria feltételt definiálva. Az IPE360 acélgerenda héjelemekből, míg a betonpanelek és a C-profilok testelemekből készült. A nyírt kapcsolóelemet az acél öv és a panelek között nemlineáris rugóelemekkel modelleztük. A releváns felületek között súrlódásmentes kontaktokat definiáltunk, így csak a függőleges erőátvitel valósult meg, összhangban a kísérleti körülményekkel. Az acél anyagviselkedését a mért tulajdonságokon alapuló multilineáris lineárisan rugalmas-keményedően képlékeny modellel definiáltuk, míg a betont lineárisan rugalmasnak modelleztük, mivel a kísérletek során képlékeny viselkedést nem tapasztaltunk. A szimulációt elmozdulás teherrel végeztük, legfeljebb 0,2 mm lépésnövekedéssel, maximális 25 mm nagyságú elemmérettel, a konvergenciavizsgálatot követően. A numerikus modell általános részleteit a 15. ábra szemlélteti. A kapcsolóelem rugókarakterisztikáit a kinyomókísérletek alapján kalibráltuk, két szélsőértéket definiálva: SUP (supremum) és INF (infimum). A SUP modell figyelmen kívül hagyja az előterhelést, kedvező csavarpozicionálásnak felel meg, így magasabb kezdeti merevséggel rendelkezik; míg az INF az előterhelést is figyelembe veszi, kedvezőtlen elhelyezést modellez, így a kezdeti megcsúszás következtében csökkentett merevséggel, de nagyobb a duktilitással rendelkezik. A rugókarakterisztikák a 16. ábrán láthatók.

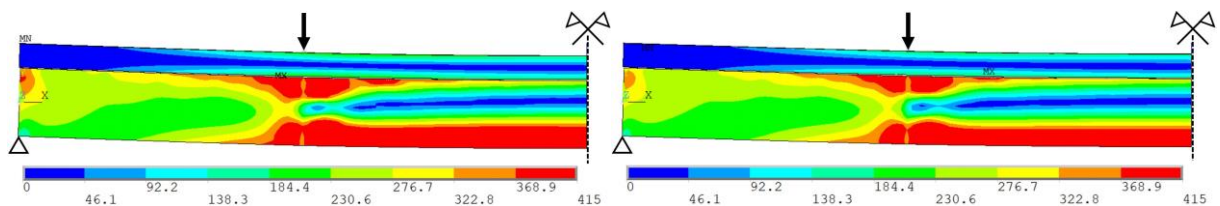


15. ábra: A numerikus modell általános részletei

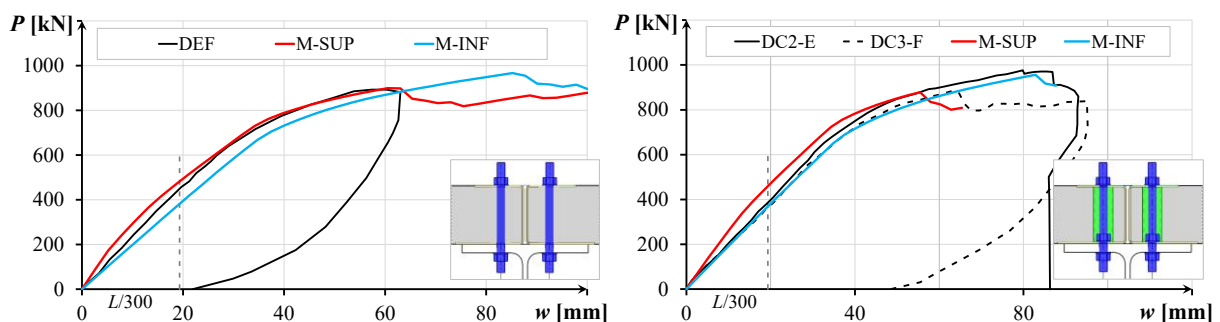


16. ábra: A kapcsolóelem rugókarakterisztikái DC1-C (bal) és DC2-E/DC3-F (jobb) esetében

A numerikus szimulációk sikeresen reprodukálták a kísérletek során megfigyelt viselkedést és tönkremeneteli módot, nevezetesen egy kezdeti lineáris szakaszt, majd az acélszelvény folyását és a jelentős képlékeny alakváltozások kialakulását. A SUP modellek esetén a DC1-C és DC2-E/DC3-F próbatetek teherbírási teherszinten mért elmozdult alakjai Huber-Mises-Hencky (HMH) ekvivalens feszültségeloszlással a 17. ábrán láthatók. A 18. ábra a numerikus SUP és INF határokat hasonlítja össze a mért erő-lehajlás görbékkel az elemzett próbateteknél, megmutatva, hogy a kísérletek a két burkológörbe közé esnek, összhangban a csavarok tényleges pozicionálásában, jellemzően a nyíróerőeloszlásában tapasztalt eltérésekkel. A teherbírási teherszinten az INF megközelítés nagyobb alakváltozási képességet biztosít, amely kedvezőbb kapcsolóelem mobilizálódáshoz és nyíróerőeloszláshoz, azaz jobb kihasználtsághoz vezet, növelve ezáltal a gerenda teherbírását (ahogyan a DC2-E esetében tapasztaltuk). Ezzel szemben a SUP modell jobban reprezentálja a kezdetben merevebb viselkedésű próbatesteket, és pontosabb lehajlás és teherbírási értékeket ad (DC1-C és DC3-F esetében), megerősítve, hogy a csavar pozíciója meghatározó tényező a teherbírási viselkedés szempontjából.



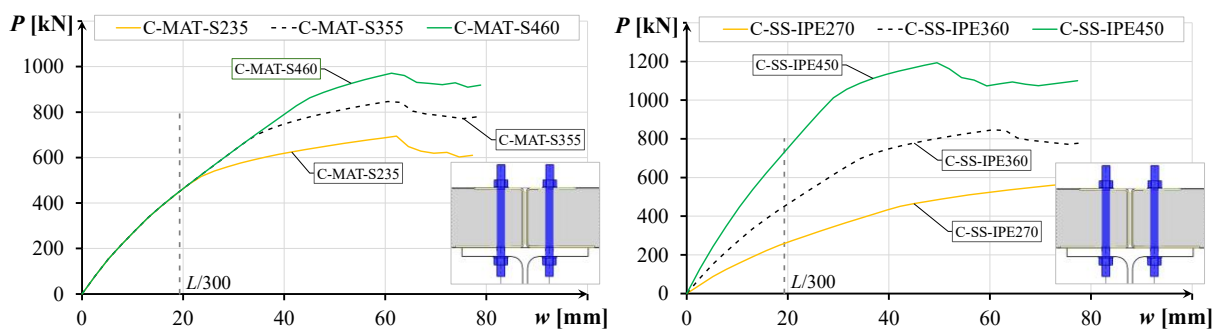
17. ábra: HMH feszültség a tönkremeneteli teherszinten: DC1-C (bal) és DC2-E/DC3-F (jobb) [MPa]



18. ábra: Numerikus eredmények-erő-lehajlás diagramok: DC1-C (bal) és DC2-E/DC3-F (jobb)

A numerikus szimulációk reprodukálták a kísérleti eredményekben megfigyelt

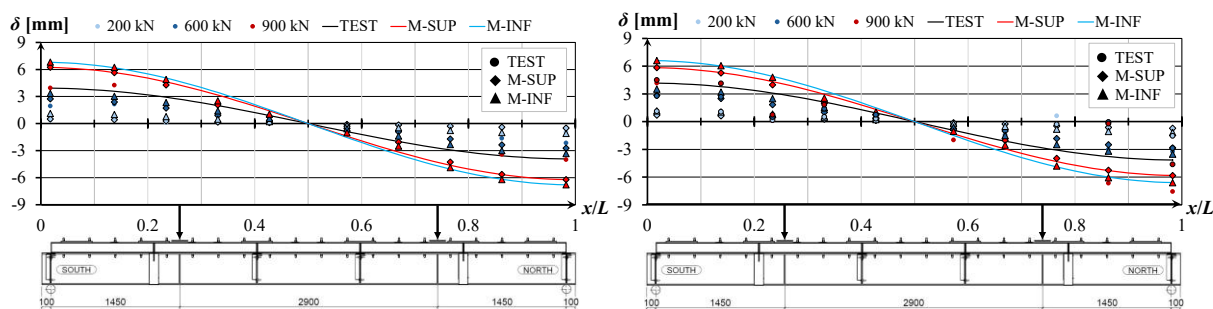
merevségi, teherbírási és lehajlási trendeket, így ezeknek megfelelően nagyléptékű paramétervizsgálatot végeztünk különböző acél és beton anyagminőség, szelvénygeometria, nyírási foksám és fesztáv hatásának elemzése érdekében, megerősítve a rendszer alkalmazhatóságát tipikus épületszerkezetek esetében. Az eredmények azt mutatják, hogy a merevséget és teherbírást elsősorban az acél anyagminősége, az acélszelvény geometriája és a nyírási foksám mértéke határozza meg. Ezzel szemben a beton anyagminősége és a panelvastagság csak másodlagos hatással bír. A panelekbe ágyazott C-profil kisebb abroncsoló hatása következtében képes javítani a lokális és globális szerkezeti viselkedést a gyártási és kivitelezési előnyök mellett, emiatt figyelembe kell venni a tervezés során. A 19. ábra szemlélteti az acél anyagminőségének és a szelvény méretének hatását a DC1-C próbatestre. Következtetésként levonható, hogy a nagyobb szilárdságú acél a gerendák nagyobb teherbírást eredményez, miközben megtartja ugyanazt a lehajlást, míg a szelvény növelése jelentősen javítja a kezdeti merevséget és a teherbírást, de csökkenti a tönkremenetelhez tartozó lehajlást, alacsonyabb duktilitást jelezve. Az eredmények stabil, kiszámítható viselkedést reprezentálnak a gyakorlati tervezési tartományban, amely a javasolt számítási módszer alapját képezi.



19. ábra: Az acél anyagminőségének (bal) és az acélszelvény méretének (jobb) hatása a DC1-C próbatestre

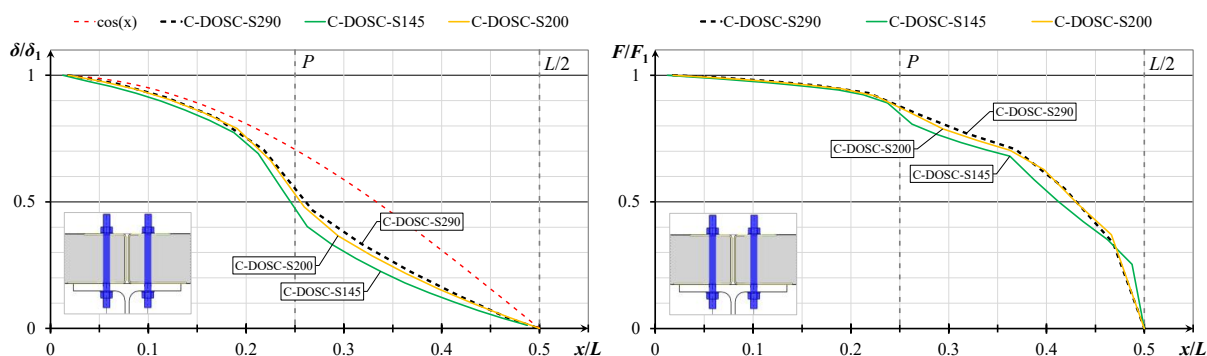
A hosszirányú megcsúszás-eloszlás alapvetően meghatározza az öszvérgerendák globális viselkedését, melyet a numerikus előrejelzésekkel és a kísérleti eredményekkel együtt vizsgáltuk 200 kN, 600 kN és 900 kN (teherbírási) terheléseknél. A 20. ábra a DC1-C és DC2-E/DC3-F eredményeit szemlélteti. A mért eloszlások aszimmetrikusak voltak a két oldalon, és a terhelés növekedésével a megcsúszás mértéke nőtt, valamint a görbe alakja változott, összhangban a mért erő-végmegcsúszás görbével. A numerikus modellek jól reprodukálják ezeket a trendeket és az eloszlás alakját, bár általában túlbecsülték a megcsúszás nagyságát a fesztáv mentén. A kísérlet során mért megcsúszás-eloszlás jól közelíthető koszinusz függvényvel, amely összhangban van a korábbi, öszvérgerendákkal végzett kutatási eredményekkel. A terhelés bevezetési pontjainál láthatóan megváltozik a megcsúszás profil, ezen túl pedig a megcsúszás mértéke jelentősen csökken. Az acél öv folyása után nem figyelhető meg számottevő képlékeny megcsúszás-átrendeződés, ellentétben a duktilisnak definiált fejes csapokkal rendelkező

öszvérgerendák viselkedésével. Mindazonáltal a nemlineáris viselkedés azt jelzi, hogy a kapcsolóelemek továbbra is dolgoznak a konstans nyomatékú tartományban, miközben hatékonyságuk a fesztáv közepéhez közeledve csökken.



20. ábra: A próbatetek megcsúszás-eloszlása: DC1-C (bal) és DC2-E/DC3-F (jobb)

A megcsúszás- és hosszirányú nyírőerőeloszlásokat a numerikus szimulációk során különböző nyírási fokszám mellett értékeltük ki, mint a globális viselkedés kulcsfontosságú paramétereit. A 21. ábra a DC1-C próbatest fél fesztávjára vonatkozó eredményeket reprezentálja, szimmetrikus viselkedést feltételezve. A megcsúszás-eloszlások hasonló alakot követnek különböző nyírási fokszámok mellett, és jól közelíthetők koszinusz függvénnyel, a terhelés bevezetési pontjánál megfigyelhető jellegzetes töréssel, ahogy korábban is észleltük. A nyírőerőeloszlások hasonló, monoton csökkenő jelleget mutatnak, jelezve, hogy a végkeresztmetszet kapcsolóelemei vannak a leginkább igénybe véve, továbbá az erő a terhelési pontokig közel állandó marad. Ez alátámasztja a közismert feltevést, mely szerint a gerendavégi kapcsolóelemek határozzák meg alapvetően a nyírőerőeloszlás hatékonyságát. A nyírási fokszám növelése csökkenti a megcsúszást és a nyírőerőt a fesztáv mentén, különösen a terhelési pontok és a fesztáv közepe között, miközben több kapcsolóelemet mozgósít, növelve ezáltal a globális teherbírást.



21. ábra: A különböző nyírási fokszám hatása a megcsúszás-eloszlásra (bal) és a hosszirányú nyírőerőeloszlásra (jobb) a DC1-C próbatest esetében

Az öszvérgerenda terhelési módja meghatározza a hajlítónyomatéki- és nyírőerőábrát, ezáltal befolyásolja a hosszirányú megcsúszást és nyírőerőeloszlást. A javasolt rendszerben az oldható nyírt kapcsolóelem rugalmas-képlékenyen viselkedik. Ennek következtében a

megcsúszás profil és a hosszirányú erőátadás a kapcsolóelemek aktuális teherbírásától függ, mely meghatározza a gerenda teherbírasi képességét. Az elemzések igazolták, hogy ez a hatás kulcsfontosságú paraméter a szerkezeti viselkedés szempontjából, különösen teherbírasi teher szinten.

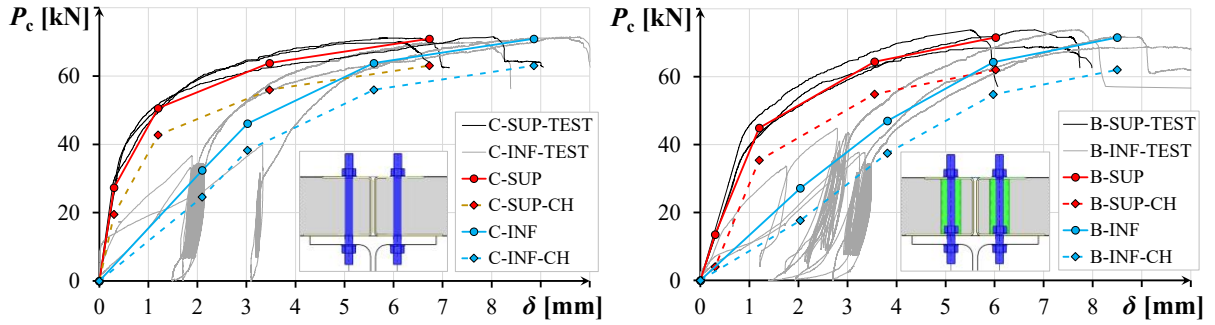
Ezeknek megfelelően, a rendszer képes a kapcsolóelemek közötti nyíróerő képlékeny átrendeződésére, összhangban a kapcsolóelemek mért alakváltozási képességével, bár alacsonyabb hatékonysággal, mint a fejes csapos kapcsolatok. Ezért az Eurocode 4 képlékeny méretezési eljárása alkalmazható a gerenda képlékeny nyomatéki teherbírás meghatározására, ugyanakkor módosítás szükséges, hogy a számításban figyelembe tudjuk venni a kifejlesztett rendszer sajátos megcsúszás-eloszlását és a kapcsolóelem megfigyelt jellemzőit.

6 A tervezési módszer kidolgozása

A javasolt, Eurocode-alapú számítási eljárás az öszvérgerenda hajlítási teherbírasi határállapotban rugalmas és képlékeny megközelítéssel egyaránt elemzi, és tartalmazza a használhatósági határállapotban lévő lehajlásra és a végmegcsúszásra vonatkozó ellenőrzéseit. A módszer koszinusz alapú megcsúszás-eloszlást alkalmaz, és figyelembe veszi a kapcsolóelem specifikus, multilineáris erő-megcsúszás görbe jellegét, beleértve a túlméretes furat hatását és a csökkentett kezdeti merevséget.

Az eljárás kéttámaszú, szimmetrikus öszvérgerendákra vonatkozik, alul húzott nyomatéki ábra mellett, 1. vagy 2. keresztmetszeti osztályú acél I vagy H szelvényvel (S235-S460 acélminőségben), amelyek hosszirányban folytonos C50/60 betonpanelhez csatlakoznak, egyenletes kiosztású, oldható nyírt kapcsolóelemekkel, legalább 45%-os nyírási fokszám mellett. A módszer épületszerkezeti alkalmazásokra készült, szobahőmérsékleten, függőleges terhelés esetén, 5-8 m fesztávval és 13-22 fesztáv/magasság aránnyal, valamint legfeljebb 4 mm csavar-furat toleranciát definiálva a kapcsolóelemek modelljeire.

Az Eurocode 4 B mellékletével összhangban, a kinyomókísérletekből származó karakterisztikus kapcsolóelem teherbírasi határt a legkisebb mért tönkremeneteli teher 0,9-szereseként határoztuk meg. A javasolt eljárásban a mért erő-megcsúszás görbét karakterisztikus, de ugyanúgy multilineáris modelleké alakítottuk lefelé történő eltolással, az eredeti jelleg megtartásával. Az így kapott SUP és INF karakterisztikus mechanikai modellek mindkét kapcsolóelemtípusra a 22. ábrán láthatók.



22. ábra: A karakterisztikus mechanikai modellek: DC1-C, C típusú kapcsolóelemre (bal) és DC2-E/DC3-F, B típusú kapcsolóelemre (jobb)

Teherbírési határállapotban a módszer megengedi az acélgerenda és a nyírt kapcsolóelemek képlékeny viselkedését, valamint a betonpanel korlátozott repedezését egészen az első kapcsolóelem tönkremeneteléig. A képlékeny nyomatóki teherbírást egy kapcsolóelem effektív nyírási ellenállás meghatározásával számítjuk, koszinusz alakú megcsúszás-eloszlást feltételezve, $s_1 = 4,0$ mm végmegcsúszás határértékkel. Az értékelés a konzervatív SUP kapcsolóelem modellel történik, melyet újszerű, koszinusz alapú súlyfüggvénnyel pontosítunk, amely igazodik a megcsúszás-eloszláshoz, továbbá figyelembe veszi az egyes kapcsolóelemek eltérő hatékonyságát a fesztáv mentén. A számítási eljárás lépései a következők:

1. A gerenda mentén koszinusz alapú $s(x)$ megcsúszás-eloszlást feltételezünk, $s_1 = 4,0$ mm végmegcsúszással, majd az (1) egyenlet szerint meghatározható az egyes kapcsolóelemekhez tartozó s_i csúszásértékek, ahol x a kapcsolóelem pozíciója, L pedig a gerenda fesztávja.

$$s_i = s(x_i) = s_1 \cos\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \quad (1)$$

2. Az egyes kapcsolóelemek P_i teherbírását az adott s_i megcsúszásérték és az ehhez tartozó SUP mechanikai modell alapján határozhatjuk meg (22. ábra).
3. A súlyozás koszinusz alapú $w(x)$ súlyfüggvény alkalmazásával történik, amelyből a (2) egyenlet alapján számíthatók az egyes kapcsolóelemekhez tartozó w_i súlyok:

$$w_i = w(x_i) = \cos\left(\frac{\pi x_i}{L}\right) \quad (2)$$

4. A súlyokat a (3) egyenlet szerint normalizáljuk, hogy megkapjuk $w_{i,norm}$ értékeit:

$$w_{i,norm} = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

5. Az egyes kapcsolóelemekhez tartozó $P_{i,w}$ súlyozott nyíróerő a (4) egyenlet alapján számítható:

$$P_{i,w} = P_i \cdot w_{i,norm} \quad (4)$$

6. Az összes kapcsolóelem súlyozott nyíróerejének összege adja a $P_{Rk,eff}$ karakterisztikus effektív nyírási ellenállást az (5) egyenlet szerint:

$$P_{Rk,eff} = \sum_{i=1}^n P_{i,w} \cdot w_{i,norm} \quad (5)$$

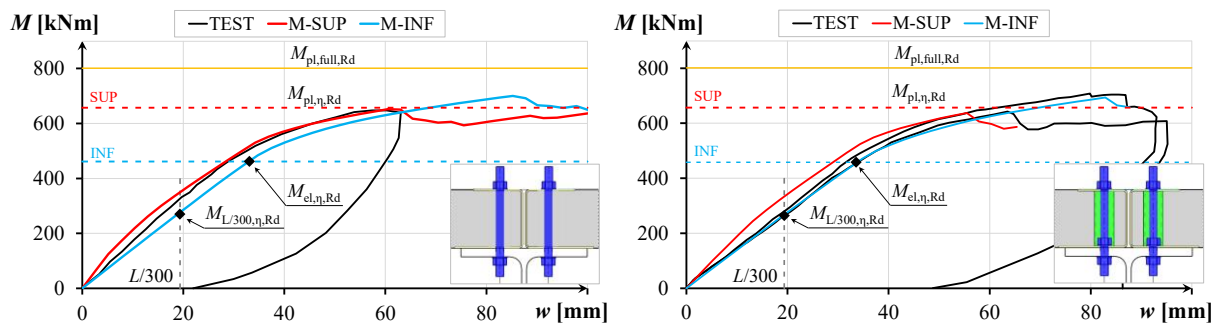
7. A $P_{Rd,eff}$ tervezési effektív nyírási ellenállást az az Eurocode 4 szerinti $\gamma_v = 1,25$ parciális biztonsági tényező alkalmazásával határozható meg.
8. Ezt követően az öszvérgerenda képlékeny nyomatóki teherbírását az Eurocode 4 képlékeny tervezési eljárása szerint számíthatjuk ki.

Alternatív megoldásként rugalmas tervezési megközelítés is alkalmazható, amely csak korlátozott képlékeny alakváltozást enged meg a nyírt kapcsolóelemekben, miközben az acélban és a betonban ébredő feszültségek az előírt határértékeken belül maradnak. A rugalmas nyomatóki teherbírást az $I_{y,comp}$ együttdolgozó keresztmetszet másodrendű nyomatékából, határozzuk meg, amelyet az acélszelvény és a panel geometriai jellemzői, valamint a $k_{sc,d}$ kapcsolóelemek merevsége, és az $s_{sc,eq}$ egyenértékű kapcsolóelemkiosztás alapján számítunk. Az így kapott teherbírást a [18]-ban meghatározott feszültséghatárok korlátozzák. A kapcsolóelemek $k_{sc,d}$ merevségét az INF mechanikai modellből határozzuk meg, amely konzervatív módon írja le a kezdeti rugalmas viselkedést, beleértve a kezdeti megcsúszás hatását is. A merevséget az erő-megcsúszás görbe kezdeti meredekségeként definiáljuk, amely a C típusú kapcsoló esetén 11,7 kN/mm, a B típusú kapcsoló esetén pedig 8,7 kN/mm.

Használhatósági határállapotban az öszvérgerenda üzemi viselkedését a feszültséghatárok, a lehajlás és a végmegcsúszás ellenőrzésével igazoljuk, különös tekintettel a végmegcsúszás korlátozására az újrafelhasználhatóság érdekében. Karakterisztikus teherkombinációk mellett az acélszelvénynek, a betonpanelnek és a nyírt kapcsolóelemeknek a rugalmas tartományban kell maradniuk. Az ellenőrzéseket az $I_{y,comp}$ együttdolgozó keresztmetszet másodrendű nyomatékából, valamint a rugalmas vizsgálatnál alkalmazott $k_{sc,d}$ kapcsolóelemek merevség figyelembevételével végezzük. A szerkezeti rendszerre vonatkozó kísérleti és numerikus eredmények alapján konzervatív határértékként 3,0 mm végmegcsúszási korlátot alkalmazunk, amely figyelembe veszi a túlméretes furatokat és a csavar rugalmas alakváltozását üzemi terhelés alatt, karakterisztikus teherkombináció esetén.

A 23. ábra a DC1-C és DC2-E/DC3-F próbatestek kísérleti és numerikus nyomaték-lehajlás görbéit hasonlítja össze a számított rugalmas és képlékeny nyomatóki teherbírásokkal, az anyagvizsgálatok során mért anyagjellemzők és az adott kapcsolóelemekhez tartozó mért mechanikai modellek figyelembevételével. Az összehasonlítás azt mutatja, hogy a SUP

határgörbével meghatározott képlékeny teherbírás jól reprodukálja a teherbírasi határállapotban lévő szerkezeti viselkedést, míg a rugalmas teherbírás és az $L/300$ használhatósági lehajlási követelmény az INF határgörbével áll összhangban. Az eljárás így pontos és konzervatív tervezési burkológörbéket biztosít, amelyben a SUP mechanikai modell határozza meg a teherbírasi teherbírasi határállapotban, míg az INF modell szabja meg merevséget használhatósági határállapotban.



23. ábra: A javasolt számítási eljárás validálása a DC1-C (bal) és DC2-E/DC3-F (jobb) próbatestekre – a nyomtérk-lehajlás diagrammok összehasonlítása

A kifejlesztett számítási módszert kísérleti és numerikus eredményekkel egyaránt validáltuk, majd a paramétervizsgálat során több esetre is alkalmaztuk. Az eljárás következetesen jó pontosságot mutatott, és lehetővé teszi a javasolt szétszerelhető öszvérgerendák megbízható tervezését az újrafelhasználtság figyelembevételével, hozzájárulva ezáltal a fenntarthatóbb építőipari gyakorlatokhoz.

7 A disszertáció következtetései

7.1 Új tudományos eredmények

1. Tézis

Kifejlesztettem egy újszerű, oldható nyírt kapcsolóelem rendszert acél-beton öszvérfödémhez, amely támogatja a fenntarthatóság-központú tervezést, figyelembe veszi az ipari partner műszaki igényeit, valamint lehetővé teszi az egyszerű gyártási, szerelési és bontási folyamatokat. Az ilyen típusú kapcsolat jellegzetességeit a szakirodalom korábban nem tárgyalta. A szerkezeti viselkedést kinyomókísérleti program és numerikus szimulációk segítségével elemeztem és értékeltem.

T1a) Javaslatot tettem egy teljes mértékben előregyártott, újrafelhasználható, szétszerelhető öszvérfödém szerkezeti rendszerre, amely melegen hengerelt acélgerendából, beágyazott acélprofilokkal ellátott előregyártott vasbeton panelekből, hevederlemezekből és habarcskiöntésekből áll, melyeket menetes szárazból és beágyazott anyagból kialakított oldható nyírt kapcsolóelemek kötnek össze. Ezen rendszer

keretében hat különböző nyírt kapcsolóelem kialakítást vizsgáltam kinyomókísérletekkel, amelyek alapján két optimalizált megoldást javasoltam.

T1b) A javasolt szétszerelhető nyírt kapcsolóelem szerkezeti viselkedését kinyomókísérletek alapján jellemeztem, és igazoltam az egységes, háromszakaszos erő-megcsúszás viselkedési jelleget, amely megfelelő merevséggel, teherbírással és képlékeny alakváltozó képességgel (duktilitással) rendelkezik, valamint azonosítottam a jellemző tönkremeneteli módokat. Kísérleti és numerikus vizsgálatokkal számszerűsítettem a kapcsolati részletkialakítás és a legfontosabb paraméterek hatását a kapcsolóelem szerkezeti viselkedésére.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [KK1] – [KK10]

2. Tézis

Megterveztem és elvégeztem egy teljes léptékű gerendakísérleti programot, amely keretében négy különböző szerkezeti kialakítást vizsgáltam 5,8 m fesztávú próbatesteken az öszvérgerenda globális viselkedésének elemzésének és kiértékelésének érdekében. A vizsgált szerkezeti konstrukciók a szakirodalomban korábban nem szerepeltek.

T2a) Igazoltam, hogy a javasolt szétszerelhető öszvérgerenda megfelelő merevséggel, teherbírással és duktilis globális tönkremeneteli mechanizmussal rendelkezik. A szerkezet használhatósági teherszinten rugalmasan viselkedett, vagyis alkalmas a szétszerelésre és az újrafelhasználásra. Kiértékeltem a különböző konfigurációk, szerkezeti kialakítások és nyírt kapcsolóelemek hatásait.

T2b) Demonstráltam, hogy a többpaneles födémkialakítás lényegesen nagyobb duktilitással rendelkezik, amely számottevő panelmozgásokkal és a kapcsolóelemek közötti kedvezőbb erőeloszlással jellemezhető. A hosszirányban folytonos, két panelből álló kialakításokhoz képest a többpaneles rendszer 10-13%-kal nagyobb teherbírással, miközben 2,4-3,6-szor nagyobb lehajlással és 30-40%-kal kisebb globális merevséggel jellemezhető. Igazoltam, hogy a hevederlemezek nélkülözhetetlenek a többpaneles konfigurációban a szomszédos panelek közötti hosszirányú erőátadás biztosításához, és a rendszer integritásának fenntartásához.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [KK11], [KK12]

3. Tézis

Numerikus modelleket fejlesztettem ki és validáltam a javasolt szétszerelhető acél-beton öszvérgerenda két panelből álló kialakításához, kiterjesztve ezzel a gerenda globális viselkedésének kísérleti vizsgálatát. Emellett részletes paramétervizsgálatot hajtottam végre, amely alátámasztotta a rendszer alkalmazhatóságát jellemző épületszerkezeti alkalmazásokra.

- T3a) Javaslatot tettem az oldható nyírt kapcsolóelemek kombinált mechanikai modelljeire, melyek a kinyomókísérletek eredményeiből származnak: a kedvező (SUP) modell merevebb, kezdeti megcsúszás nélkül rendelkező kapcsolóelemet, míg a kedvezőtlen (INF) modell lágyabb, kezdeti megcsúszást figyelembe vevő kapcsolóelemet jellemez, amely a túlméretes furat hatásából adódik. Ezzel a megközelítéssel a valós szerkezeti viselkedés burkológörbéje megfelelő biztonsággal reprezentálható, ezáltal felhasználható a globális numerikus modellekben, valamint a javasolt tervezési eljárásban.
- T3b) A paramétervizsgálat alapján azonosítottam a globális viselkedést meghatározó legfontosabb paramétereket, különösen az acél anyagminőségét, az acél keresztmetszet geometriai jellemzőit, valamint a nyírási foksám mértékét, igazolva ezáltal a rendszer gyakorlati alkalmazhatóságát.
- T3c) Elemeztem a megcsúszás- és a csavarok nyíróerőeloszlásait, és kimutattam, hogy négyponthas hajlítás esetén a megcsúszás-eloszlás elfogadhatóan jól közelíthető koszinusz-alapú függvényvel, mely kellően pontos alapot biztosít a gerenda teherbírásának becsléséhez. Az eloszlások alapján megállapítottam, hogy a gerenda közbelső szakaszán elhelyezett kapcsolóelemek hatékonyan vesznek részt az erőátvitelben a képlékeny megcsúszás és átrendezőség révén, továbbá, hogy mind a nyírási foksám mértéke, mind a terhelés módja jelentősen befolyásolja a teherbírást, főként a kapcsolóelemek hatékonysága által.
- T3d) Bizonyítottam, hogy a képlékeny nyomatéki teherbírást az Eurocode-alapú képlékeny tervezési eljárással meg lehet határozni, azzal a módosítással, hogy figyelembe kell venni a kapcsolóelem hatékony nyírási teherbírását a javasolt mechanikai modellek szerint, amely a gerenda hossza mentén kialakuló koszinusz-alapú megcsúszás-eloszlásából származik, tükrözve ezáltal a szétszerelhető kapcsolóelemek jellegzetes viselkedését.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [KK13], [KK14]

4. Tézis

Kifejlesztettem egy Eurocode-alapú tervezési eljárást a javasolt szétszerelhető öszvérfödém szerkezeti rendszerhez, amely kiterjeszti és alkalmazza a meglévő Eurocode 4 szerinti eljárást az öszvérgerendákra, az oldható nyírt kapcsolóelemek jellegzetes viselkedésének figyelembevételével. Az eljárás lehetővé teszi az öszvérgerenda nyomatéki teherbírásának meghatározását képlékeny és rugalmas módszerrel teherbírási határállapotban, valamint a lehajlás és végmegcsúszás ellenőrzését használhatósági határállapotban az adott vizsgált tartományban:

13-22 fesztáv/gerenda magasság arány, S235-S460 acélminőségek, C50/60 betonminőség és 45%-nál nagyobb nyírási fokszám esetén.

- T4a) Megfogalmaztam a képlékeny tervezési módszerhez szükséges kapcsolóelem hatékony nyírási teherbírásának meghatározási módját, melyet koszinusz-alapú megcsúszásfüggvény segítségével, 4 mm végmegcsúszási határértékkel, SUP kapcsolóelem modell alapján kell meghatározni, és tovább pontosítani a gerenda menti kapcsolóelemek változó hatékonyságának figyelembevételére javasolt újszerű, koszinusz-alapú súlyfüggvény alapján.
- T4b) Javaslatot tettem a nyírt kapcsolóelem $k_{sc,d}$ merevségére, az INF kapcsolóelem modell kezdeti merevségként definiálva, a rugalmas nyomatéki teherbírás, a lehajlás és a végmegcsúszás meghatározásához. A használhatósági határállapotban, karakterisztikus teherkombinációban keletkező végmegcsúszási határértékére 3,0 mm-t javasoltam, amely figyelembe veszi a rugalmas kapcsolóelem deformációját és a túlméretes furat hatását.
- T4c) Kísérleti és numerikus eredményekkel validáltam a javasolt méretezési eljárást, amelyet alkalmaztam a numerikus paramétervizsgálat különböző eseteire, megfelelő pontosságot igazolva, továbbá gyakorlati alapot biztosítva a megbízható tervezéshez, amely lehetővé teszi a szerkezet szétszerelését és újrafelhasználását.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [KK15], [KK16], [KK17]

7.2 A tézisekkel kapcsolatos publikációk

- [KK1] K. Király and L. Dunai, “Experimental Study of Novel Demountable Shear Connectors for Steel-concrete Composite Buildings,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 647–656, 2024, doi: 10.3311/PPci.22732.
- [KK2] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Demountable shear connectors – constructional details and push-out tests,” *CE/Papers*, vol. 6, no. 3–4, pp. 53–58, 2023, doi: 10.1002/cepa.2416.
- [KK3] K. Király, L. Borsi, L. Dunai, and N. Kovács, “Development and evaluation of demountable shear connectors for steel–concrete composite structures,” *Proc. Inst. Civ. Eng. – Struct. Build.*, 2025, doi: 10.1680/jstbu.24.00160.
- [KK4] K. Király, L. Borsi, N. Kovács, L. Dunai, and A. B. Kocsis, “Experimental and Numerical Studies of Novel Demountable Shear Connections,” in *Proc. 15th Nordic Steel Construction Conf. (Nordic Steel 2024)*, Luleå, Sweden, 2024.
- [KK5] K. Király, L. Borsi, N. Kovács, and L. Dunai, “Investigation of the behaviour of demountable shear connectors embedded in concrete and mortar,” in *Proc. 15th fib Int.*

- PhD Symp. in Civil Engineering*, Budapest, Hungary, 2024, no. 66, pp. 317–324.
- [KK6] K. Király, L. Borsi, N. Kovács, and L. Dunai, “Numerical studies on the local phenomena in the behaviour of demountable shear connections,” in *Proc. 14th Central European Congress on Concrete Engineering (CCC 2024)*, R. Nenadlová and P. Vejda Johová, Eds., 2024, pp. 253–266, ISBN: 978-80-908943-1-0.
- [KK7] K. Király, “Fenntartható öszvérszerkezetek; Doktoranduszi kutatás előkészítése [Sustainable composite structures: preparation for doctoral research],” *Acélszerkezetek (MAGÉSZ)*, vol. XIX, no. 1, pp. 38–43, 2022 (in Hungarian). [Online]. Available: <https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2201.pdf>
- [KK8] K. Király, “Beszámoló az Eurosteel 2023 konferenciáról. Központban a fenntartható építőipar [Report on the Eurosteel 2023 Conference: Focus on sustainable construction],” *Acélszerkezetek (MAGÉSZ)*, vol. XX, no. 4, pp. 10–12, 2023 (in Hungarian). [Online]. Available: <https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2304.pdf>
- [KK9] K. Király, “A fenntartható építőipar törekvései és a tartószerkezetek beépített karbonlábnyoma [Sustainable construction ambitions and the embodied carbon of structures],” *Mérnök Újság*, vol. XXXII, no. 7, pp. 42–45, 2024 (in Hungarian). [Online]. Available: <https://mernokvagyok.hu/wp-content/uploads/2024/12/Mernok-Ujsag-2407.pdf>
- [KK10] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Push-out tests of demountable shear connectors for sustainable composite structures,” *Steel Constr.*, vol. 17, no. 4, pp. 200–211, 2024, doi: 10.1002/stco.202300044.
- [KK11] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Experimental study on demountable steel-concrete composite beams,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 231, 2025, doi: 10.1016/j.jcsr.2025.109582.
- [KK12] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Development of a demountable steel-concrete composite structural frame system for buildings,” in *Proc. 13th Int. Conf. Adv. Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS)*, 2024, pp. 512–515.
- [KK13] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Experimental and numerical analysis of demountable composite beams,” in *Proc. Int. Colloq. Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2025)*, Barcelona, Spain, 2025.
- [KK14] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Numerical analysis of demountable composite beams,” *Engineering Structures*, submitted for publication, 2025.
- [KK15] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Development and design of

demountable composite beams,” *Structures*, submitted for publication, 2025.

[KK16] K. Király, L. Dunai, and A. B. Kocsis, “Szétszerelhető öszvérgerendák szerkezeti viselkedése és tervezése [Structural behaviour and design of demountable composite beams],” in *Proc. XXIX Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*. 2025.

[KK17] K. Király, L. Dunai, L. Calado, and A. B. Kocsis, “Design method development for demountable steel-concrete composite beams,” in *Proc. Eurosteel 2026*, Cracow, Poland, submitted for publication, 2026.

7.3 További kutatási és fejlesztési lehetőségek

A jövőbeni kutatás az ipari partnerrel történő termékfejlesztésre és pilot alkalmazásra összpontosít a KÉSZ Csoport, bim.GROUP Kft. együttműködésével, legfőképpen az előregyártott vasbeton panelek optimalizálására irányulva, beleértve a panelgeometria és a vasalási elrendezés pontosítását a kedvezőbb gyárthatóság, szállítás és szerelhetőség érdekében, továbbá az elemek megfelelő minőségének és hosszú távú tartósságának biztosítását, a fenntarthatósági igények figyelembevételével. A többpaneles kialakítások megfigyelt viselkedése alapján a födém tárcsahatásának vizsgálata oldalirányú terhelésre kiemelt kutatási irányt jelent. Vizsgálni szükséges a globális síkbeli merevséget és teherbírást, a panelek közötti teherátadási mechanizmusokat, valamint a csomóponti kialakítás hatását a tárcsaszzerű viselkedésére. Ezen túlmenően a kapcsolati viselkedés elemzését ki kell terjeszteni folytonos gerendákra és gerenda-oszlop csomópontokra is, elemezve a merevséget, a teherbírást, a károsodás lokalizációját és figyelembe venni az újrafelhasználhatóságot több életcikluson keresztül. Kiegészítő kutatási irányok a tűzzel szembeni viselkedés, a dinamika vizsgálatok, különösen a födém rezgésére irányulva, valamint a ciklikus és szeizmikus terhelés alatti diafragmahatásnak elemzése, beleértve a csomóponti hiszterézis viselkedést és az újrafelhasználhatósághoz kapcsolódó kritériumok vizsgálatát.

Hivatkozások

[1] S. Selvaraj and T. M. Chan, “Recommendations for Implementing Circular Economy in Construction: Direct Reuse of Steel Structures,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 214, 2024.

[2] A. Kanyilmaz, M. Birhane, R. Fishwick, and C. del Castillo, “Reuse of steel in the construction industry: Challenges and opportunities,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 23, no. 5, pp. 1399–1416, 2023.

[3] H. Bartsch, “Reuse of reclaimed steel components in construction: A systematic review of potential, challenges and future directions,” *Structures*, vol. 80, 2025.

[4] Y. H. Dong, L. Jaillon, P. Chu, and C. S. Poon, “Comparing carbon emissions of precast

- and cast-in-situ construction methods – A case study of high-rise private building,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 99, pp. 39–53, 2015.
- [5] J. Thorne, D. v. Bompa, M. F. Funari, and N. Garcia-Troncoso, “Environmental impact evaluation of low-carbon concrete incorporating fly ash and limestone,” *Clean. Mater.*, vol. 12, 2024.
- [6] Fenwick Iribarren Architects, “974 Stadium,” project description, 2024. [Online]. Available: <https://www.fenwickiribarren.com/project/974-stadium/>. Accessed: Dec. 23, 2025.
- [7] Haitsma Beton, “Demountable multi-storey car park for ASML,” project news, 2016. [Online]. Available: <https://www.haitsma.eu/nieuws/demountable-multi-storey-car-park-for-asml>. Accessed: Dec. 23, 2025.
- [8] cepezed, “Temporary Courthouse Amsterdam,” project description, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://files.cepezed.nl/production/downloads/publications/temporary-court-house-amsterdam-eng-cepezed.pdf>. Accessed: Dec. 23, 2025.
- [9] D. Lam, X. Dai, A. F. Ashour, and N. Rehman, “Recent research on composite beams with demountable shear connectors,” *Steel Constr.: Des. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 125–134, 2017.
- [10] M. Pavlovic, M. Spremic, Z. Markovic, and M. Veljkovic, “Headed shear studs versus high-strength bolts in prefabricated composite decks,” in *Composite Construction in Steel and Concrete VII*, 2013, pp. 687–702.
- [11] A. Kozma, C. Odenbreit, M. V. Braun, M. Veljkovic, and M. P. Nijgh, “Push-out tests on demountable shear connectors of steel–concrete composite structures,” *Structures*, vol. 21, pp. 45–54, 2019.
- [12] A. Sarri, *Assessment of Steel–Concrete Shear Connector System with Resin-injected Bolts*, Ph.D. dissertation, Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2019.
- [13] M. P. Nijgh, I. A. Gîrbacea, and M. Veljkovic, “Elastic behaviour of a tapered steel–concrete composite beam optimized for reuse,” *Eng. Struct.*, vol. 183, pp. 366–374, 2019.
- [14] A. Kozma, J. Yang, A. Ahmad, and C. Odenbreit, “Demountable composite beams for a circular economy: Large-scale beam tests,” *Steel Constr.*, vol. 17, no. 1, pp. 11–20, 2024.
- [15] A. Ataei, “Modelling of demountable steel–concrete composite connections: Validation of finite element model and parametric study,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 198, 2022.
- [16] EN 1994-1-1, *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Bruxelles, Belgium: CEN, 2004.
- [17] A. Kozma, A. G. Coelho, J. Yang, and C. Odenbreit, “A new concept and algorithm to transfer brittle and arbitrary load–slip curves into an effective shear resistance suitable for

- Eurocode 4,” *J. Theor. Appl. Mech.*, pp. 705–718, 2022.
- [18] A. M. G. Coelho, M. Lawson, D. Lam, and J. Yang, *Guidance on Demountable Composite Construction Systems for UK Practice*, SCI P428, 2020, ISBN 978-1-85942-245-8.
- [19] V. Červenka, *ATENA*, ver. 5.9.0, Červenka Consulting, 2023.
- [20] Ansys, *Ansys Academic Research Mechanical APDL*, release 2024 R1.

