

Szétszerelhető öszvérgerendák szerkezeti viselkedése és tervezése

Structural behaviour and design of demountable composite beams

KIRÁLY Krisztián^{1,2}, Dr. DUNAI László¹, KOCSIS András Balázs²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 1111 Műegyetem rkp. 3

kiraly.krisztian@emk.bme.hu, dunai.laszlo@emk.bme.hu

²bim.GROUP Kft., 1095 Budapest, Lechner Ödön fasor 10. b.

kocsisa@bimgroup.hu

Abstract

The aim of this research is to develop a sustainable, demountable steel-concrete composite slab system, consisting of precast reinforced concrete panels and demountable shear connectors. The system promotes the reuse of structural elements and significantly reduces the embodied carbon footprint of buildings. Push-out tests, full-scale beam experiments and numerical simulations confirmed the system's adequate stiffness, load-bearing capacity and ductility, for which a Eurocode-based design method has been developed.

Keywords: Demountable steel-concrete composite structure, Demountable shear connector, Experimental test, Numerical analysis, Design method

Kivonat

A kutatás célja egy fenntartható, szétszerelhető acél-vasbeton födém szerkezet kifejlesztése, amely előregyártott vasbeton panelekből és oldható nyírt kapcsolóelemekből tevődik össze. A rendszer elősegíti a szerkezeti elemek újrafelhasználását, valamint az épület beépített karbonlábnyomának jelentős csökkentését. Kinyomókísérletek, gerendakísérletek és numerikus szimulációk igazolták a rendszer megfelelő merevségét, teherbírását és képlékeny alakváltozási képességét, amelyhez Eurocode-alapú méretezési módszert dolgoztunk ki.

Kulcsszavak: Szétszerelhető acél-vasbeton öszvérszerkezet, Oldható nyírt kapcsolóelem, Kísérleti vizsgálatok, Numerikus vizsgálatok, Méretezési eljárás

1. BEVEZETÉS

A szétszerelhető acél-vasbeton öszvérszerkezetek fejlesztése jelentős előrelépést jelent a fenntartható építés irányába, összhangban a körforgásos gazdaság alapelveivel és a beépített szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló törekvésekkel. Ezen rendszerek célja, hogy lehetővé tegyék a szerkezeti elemek szétszerelését, majd azok újrafelhasználását, csökkentve ezáltal az építési hulladék mennyiségét, valamint növelve az építőanyagfelhasználás hatékonyságát, a tartószerkezeti tulajdonságok megtartása mellett.

A hagyományos, betonba ágyazott, hegesztett fejes csapok nem teszik lehetővé a szerkezeti elemek oldhatóságát. Ezzel szemben a csavarozott nyírt kapcsolatok megfelelő alternatív megoldást jelentenek, mivel a csapokhoz hasonló szerkezeti viselkedési jellemzőkkel rendelkeznek, ugyanakkor biztosítják az elemek szétszerelhetőségét. A csavarok alkalmazásával figyelembe kell venni, hogy a toleranciák miatt alkalmazott nagyobb furatátmérőben a csavarok mozognak, melynek következtében megjelenik az öszvérgerenda kedvezőtlen kezdeti merevségcsökkenésének hatása. A legfrissebb kutatások számos új működő megoldást vizsgáltak, például menetes végű fejes csapokat [1], vagy betonba ágyazott csavarokat [2-3]. Gerendakísérletek igazolták, hogy a szétszerelhető öszvérgerendák teherbírása és képlékeny szerkezeti viselkedése összevethető a hagyományos rendszerekével, miközben lehetővé teszik az elemek sikeres szétszerelését és újrafelhasználását [4-5].

A jelenlegi kutatási program – amely a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint a KÉSZ Csoport és a bim.GROUP Kft. együttműködésében valósul meg – célja egy szétszerelhető acél-vasbeton öszvérváz szerkezeti rendszer kifejlesztése, előregyártott vasbeton panelekkel és oldható nyírt kapcsolatokkal, valamint erre egy Eurocode-alapú méretezési módszer kidolgozása.

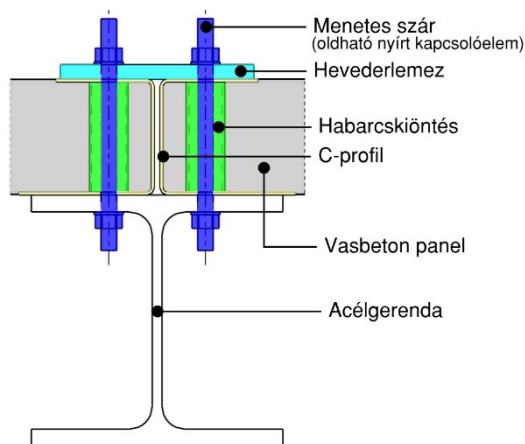
A kapcsolóelem vizsgálata érdekében kinyomókísérletek, a globális szerkezeti rendszer elemzésére gerendakísérleteket hajtottunk végre, melyeket numerikus szimulációkkal egészítettünk ki. A jelen

összefoglalóban ismertetjük a kifejlesztett szerkezeti rendszert, valamint az ehhez kapcsolódó kísérleti programok és a numerikus vizsgálatok főbb eredményeit, továbbá bemutatjuk a javasolt méretezési módszert.

2. AZ OLDHATÓ NYÍRT KAPCSOLÓELEM FEJLESZTÉSE

2.1. A kifejlesztett szerkezeti rendszer

A kifejlesztett szerkezeti rendszer acélgerendából és előregyártott vasbeton panelekből készül, melyeket oldható nyírt kapcsolóelemekkel, a betonba rögzített menetes szárral kötünk össze, lehetővé téve ezáltal az együttdolgozást és a szétszerelhetőséget. Ezen részleteket az 1. ábrán láthatjuk. A C-profil és a habarcskiöntés kedvezőbb toleranciákat biztosít, miközben a hevederlemez globális merevséget ad. Ezen elemek kedvezően befolyásolják a szerkezeti viselkedést, miközben egyszerű, gyors, kis munka- és energiaigényű össze-, ill. szétszerelést biztosít, alkalmazkodva ezáltal a hazai ipar adottságaihoz. A szerkezeti rendszer további részletei megtalálhatók a [6] munkában.

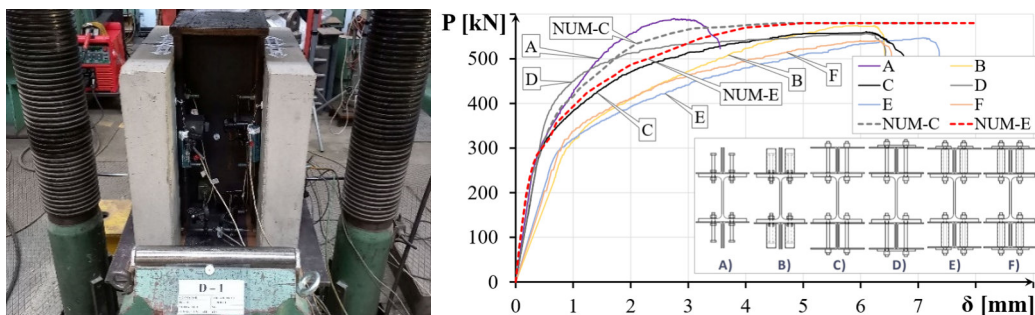


1. ábra. A kifejlesztett szerkezeti rendszer

2.2. A kinyomókísérleti program

Az oldható nyírt kapcsolóelem vizsgálatára kinyomókísérleti programot hajtottunk végre, amelyben hat különböző kialakítást vizsgáltunk, típusonként három próbatesttel. Egy próbatest S235 HEB260 oszlopból, négy C50/60 előregyártott vasbeton panelből, valamint nyolc M16 8.8 menetes szárból tevődött össze. A kísérletek során a következő konfigurációkat vizsgáltuk: betonba ágyazott csavar és csavaranya (A), 62 MPa nyomószilárdságú habarcsba ágyazott csavar és csavaranya (B), betonba ágyazott átmenő menetes szár és hevederlemez (C és D), valamint habarcsba ágyazott átmenő menetes szár és hevederlemez (E és F). Egy terhelésre előkészített próbatestet a 2. (bal) ábrán láthatunk.

A kísérletek során megfigyelt tönkremeneteli mód a csavar nyírás és hajlítás kombinációjával bekövetkezett képlékeny tönkremenetel, valamint a kapcsolóelemek közvetlen környezetében lévő beton, vagy habarcs lokális repedése. A kiértékelést az erő-relatív elmozdulás diagramok alapján hajtottuk végre, amelyeket numerikus szimulációkkal egészítettük ki. Az egyes típusokhoz tartozó kísérleti és numerikus eredményeket a 2. (jobb) ábrán láthatjuk. A kinyomókísérlet eredményeinek részletes kiértékeléséről [7]-ban, a numerikus szimulációkról [8]-ban olvashatunk.

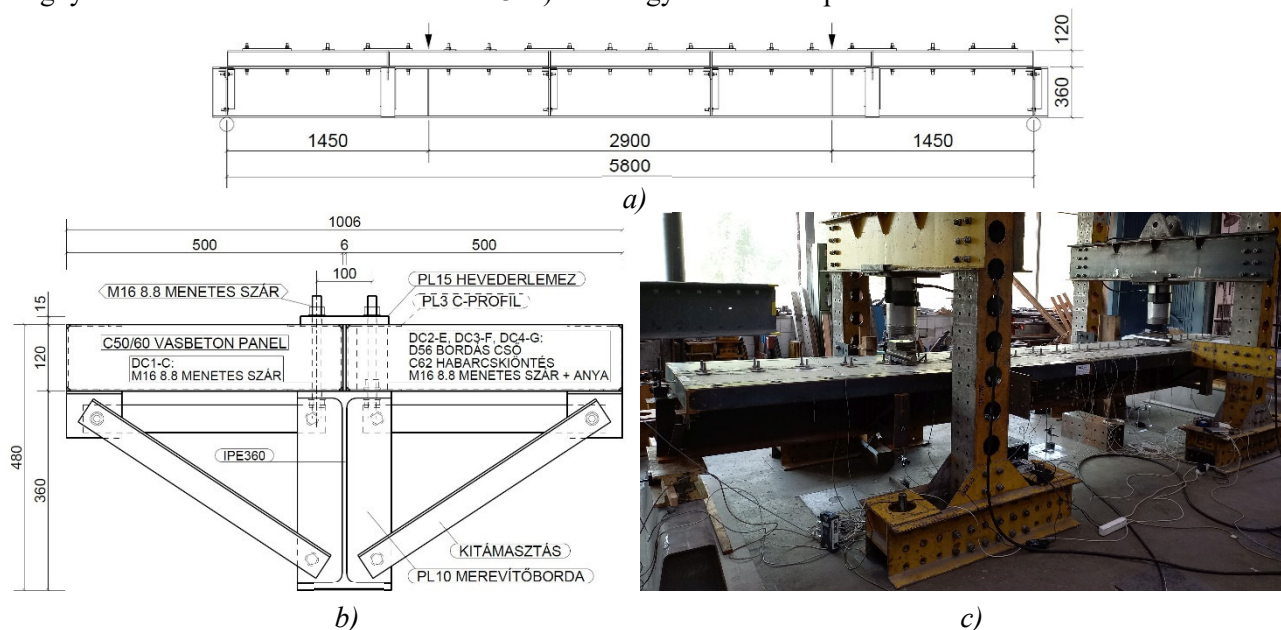


2. ábra. A kinyomókísérleti próbatest (bal) és az egyes típusok erő-relatív elmozdulás diagramjai (jobb)

3. AZ ÖSZVÉRGERENDÁK SZERKEZETI VISELKEDÉSE

3.1. A gerendakísérleti program

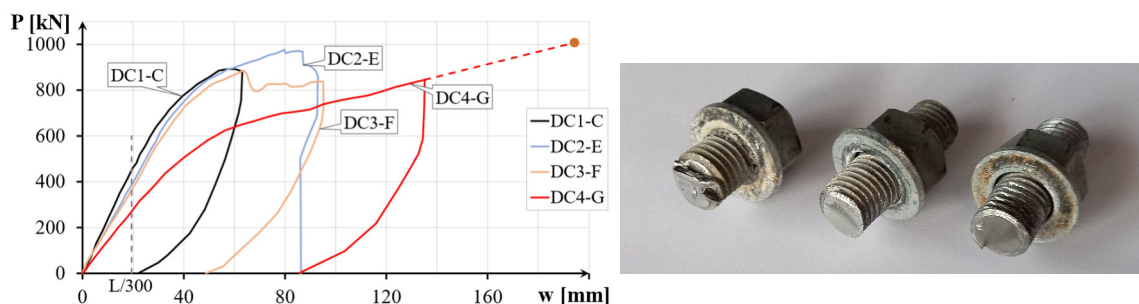
A kifejlesztett szerkezeti rendszer globális vizsgálatára négy különböző kialakítású, 5,8 m fesztávú próbatesten végeztünk negyedelő pontjaiban terhelt gerendakísérletet. Egy próbatest S355 IPE360 gerendából, egymás mellett két C50/60 anyagminőségű 120x500 mm keresztmetszetű, C-profilokkal ellátott vasbeton panelből, valamint oldható kapcsolóelemből tevődik össze. A DC1-C jelű gerendában a menetes szárok közvetlenül a beton panelbe vannak ágyazva, míg a többinél (DC2-E, DC3-F és DC4-G) a habarcskiöntésbe kerültek csavaranyával ellátva. DC3-F esetében a gerenda negyedelő pontjainál hevederlemez köti össze a szomszédos paneleket. Az első hárommal ellentétben, a DC4-G próbatest vasbeton paneljei hosszirányban nem folytonosak, hanem oldalanként 5-5 panel található. A szomszédos paneleket hevederlemezzel rögzítjük, melyek biztosítják a gerenda hosszirányú folytonosságát. A próbatestek általános oldalnézetét a 3. a) ábrán, a keresztmetszeti részleteit a 3. b) ábrán láthatjuk. A kísérletek során mértük a gerenda lehajlását, a panelek hosszirányú vízszintes relatív elmozdulását (megcsúszását), valamint a mezőközépi keresztmetszet megnyúlásait az acélban és a betonban. A 3. c) ábrán egy előkészített próbatest látható.



3. ábra. a) A gerenda felülnézete, b) keresztmetszete, valamint d) az előkészített próbatest

3.2. A gerendák megfigyelt szerkezeti viselkedése

A gerendákat duktilis szerkezeti viselkedés jellemző: kezdetben lineárisan rugalmas szakasz, majd az acél öv megfolyása és a kapcsolóelemek közötti hosszirányú nyíróerő képlékeny átrendeződése után jelentős képlékeny alakváltozás következik be. A megfigyelt szerkezeti viselkedést legjobban jellemző erő-lehajlás diagram a 4. (bal) ábrán látható az összes próbatest esetében. A gerendák tönkremenetele a támaszok közelében lévő kapcsolóelemek elnyírásával következtek be, összhangban a kinyomókísérletek során megfigyelttel, jelentős lehajlás és az acél keresztmetszet képlékeny alakváltozása mellett. Az elnyírt kapcsolóelemeket a 4. (jobb) ábra szemlélteti. A vasbeton panelek a terhelés alatt rugalmasak maradtak, csak a legnagyobb elért teher szinten következett be minimális repedés a panel alsó síkján.

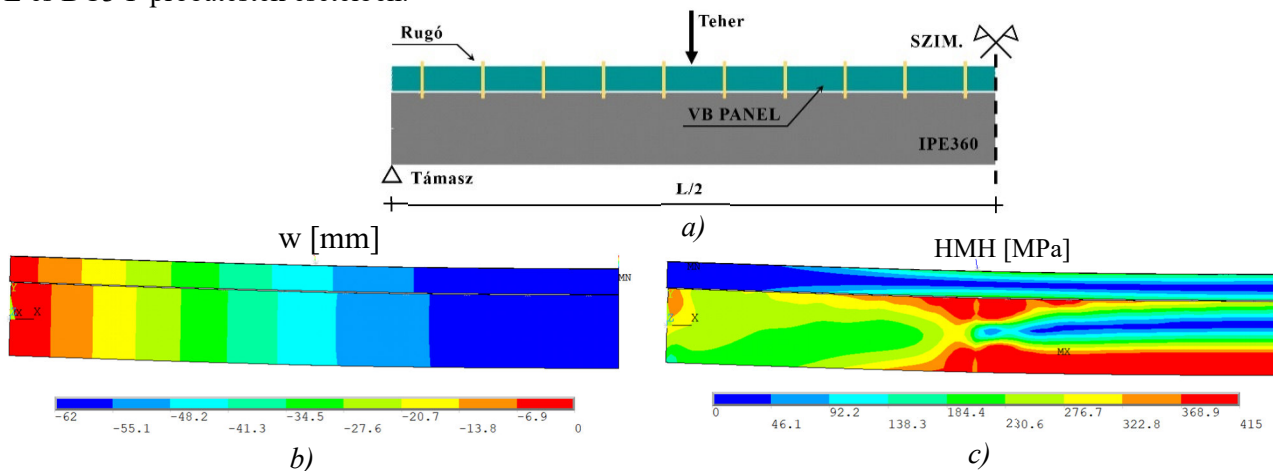


4. ábra. A gerendák erő-lehajlás diagramjai (bal), valamint a megfigyelt tönkremeneteli mód (jobb)

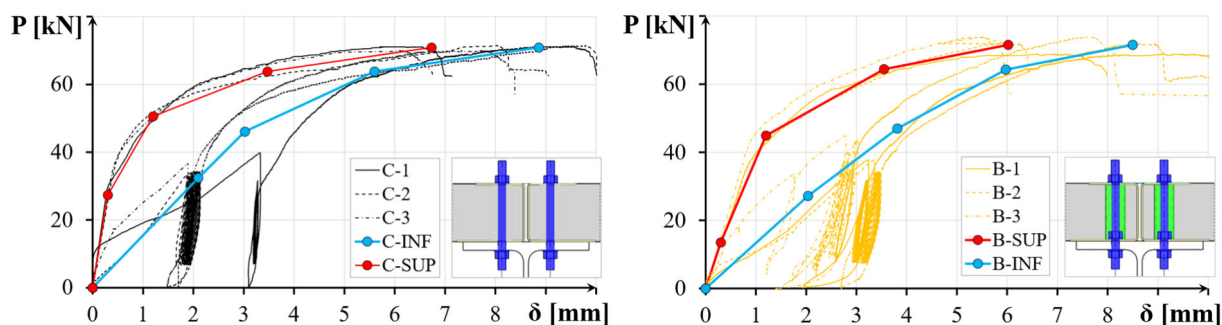
A két panellel kialakított próbatetek (DC1-C, DC2-E és DC3-F) hasonló merevséggel, teherbírással és alakváltozó képességgel rendelkeznek. A DC2-E és DC3-F gerendákban alkalmazott habarcs lágyabb szerkezeti viselkedést és kedvezőbb hosszirányú nyíróerőeloszlást eredményezett, a teherbíráruk azonban nem haladta meg jelentősen a merevebb DC1-C-t. A DC3-F próbatest, amelynél habarcsot és hevederlemezeket is alkalmaztunk, hasonló viselkedést, de kisebb teherbírást észleltünk, a panelek egyenetlen relatív elmozdulásának és a kapcsolóelemek közötti kedvezőtlenebb tehereloszlásnak következtében. A tíz különálló panelből álló DC4-G jelű gerendánál figyeltük meg a legnagyobb alakváltozó képességet, lehajlást és teherbírást jelentős nemlineáris átmenettel, melyet a nagymértékű panelmozgás révén a kapcsolóelemek közötti kedvezőbb erőeloszlás tett lehetővé. A próbatetek üzemi teherszinten rugalmasan viselkedtek, az acél elemekben maradó alakváltozást, a panelekben repedést nem észleltünk, vagyis a gerendák valóban szétszerelhetők. A gerendákról további részletes kiértékelés a [9] munkában olvasható.

3.3. A numerikus szimulációk eredményei

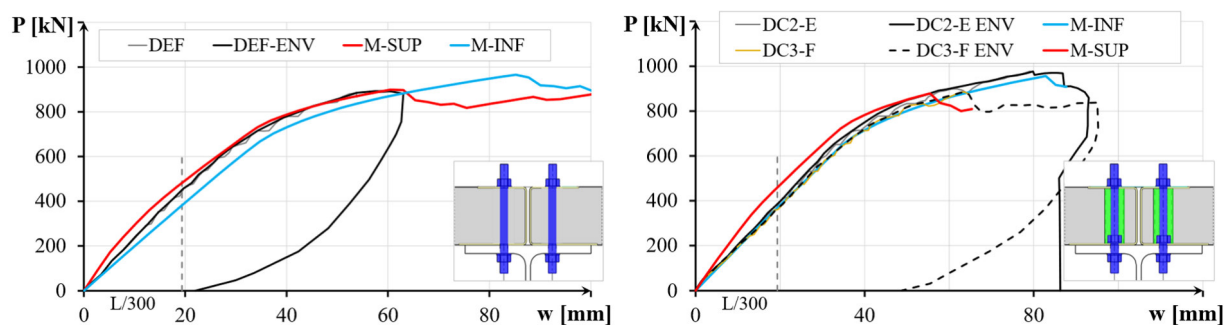
A gerendakísérleteket kiegészítve numerikus modellt építettünk Ansys végeselemes szoftverben [10], melyekben a próbatetek felét modelleztük mezőközépig, ahol szimmetriafeltételt írtunk elő. A numerikus modell részleteit az 5. a) ábrán láthatjuk. Az IPE360 gerenda héjelemekből, a vasbeton panel a beépített C-profilokkal testelemekből épült. A nyírt kapcsolóelemeket pontonként nemlineáris rugókkal definiáltuk a kinyomókísérletek során kiértékelt erő-relatív elmozdulás diagramokból kétféle esetet vizsgálva: kedvező csavarpozíciót feltételezve, amelyben nem jelenik meg a kezdeti megcsúszás hatása, nagyobb merevséget adva eredményül (supremum – SUP); valamint kedvezőtlen csavarpozíciót feltételezve, a kezdeti megcsúszás hatásával számolva, kisebb merevséggel és nagyobb alakváltozó képességgel rendelkezve (infimum – INF). Az így meghatározott rugókarakterisztikákat a 6. ábra szemlélteti a betonba (DC1-C), ill. a habarcsba ágyazott kapcsolóelem (DC2-E, DC3-F és DC4-G) esetében. A DC1-C gerenda tönkremeneteléhez tartozó lehajlást az 5. b) ábra, az ugyanezen teherszinthez tartozó HMH feszültségeloszlást az 5. c) ábra szemlélteti. A szimulációk és a kísérleti eredmények erő-lehajlás diagramjait a 7. ábrán láthatjuk a DC1-C, valamint a DC2-E és DC3-F próbatetek eseteiben.



5. ábra. a) A numerikus modell részletei, b) a DC1-C próbatest lehajlása és c) HMH feszültségeloszlása



6. ábra. Betonba (bal), valamint a habarcsba ágyazott kapcsolóelem rugókarakterisztikái (jobb)



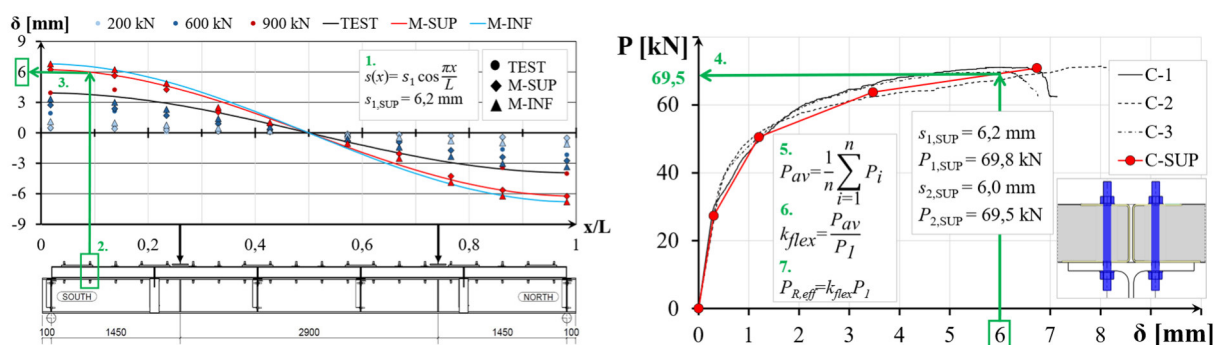
7. ábra. DC1-C (bal), valamint DC2-E és DC3-F próbatestek erő-lehajlás diagramjai (jobb)

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a végeselemes modell megfelelően követi a valós szerkezeti viselkedést és alkalmazható további vizsgálatokra. Látható, hogy a kedvezőbb csavareloszlást feltételezve (SUP) kapunk pontosabb eredményt, ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a valóság a SUP és az INF rugókarakterisztikák kombinált alkalmazásával reprezentálható a legpontosabban. A SUP karakterisztikát feltételezve kisebb teherbírást és lehajlást kapunk eredményül, a kisebb alakváltozókéesség miatt, amely egy csavar túlterhelődéséhez vezet, ahogyan azt megfigyeltük DC1-C és DC3-F eseteiben. INF karakterisztikát figyelembe véve azonban, a kedvezőbb duktilitás miatt, az egyes kapcsolóelemek között egyenletesebb nyíróerőeloszlás következik be, amely nagyobb teherbírást és lehajlást tesz lehetővé, összhangban a DC2-E próbatest eredményeivel. Ezeket kiegészítve további numerikus szimulációkat hajtottunk végre különböző paraméterekre, melyek részleteit tovább a jelen összefoglalóban nem tárgyaljuk.

4. A JAVASOLT MÉRETEZÉSI ELJÁRÁS

A megfigyelt szerkezeti viselkedés és numerikus szimulációk eredményeiből következtetve az Eurocode 4 és a Kozma-módszer [11] alapján javaslatot tettünk az általunk kifejlesztett kapcsolóelem méretezésére. A módszer lényege, hogy a szétszerelhető öszvérgerendát képlékeny elv szerint méretezhetjük, ugyanakkor a kapcsolóelem teherbírásának számítását a szerkezetre jellemző rugalmas-képlékeny viselkedésből származtatott k_{flex} tényezővel korrigálni kell. A vázolt módszer lépéseit az általunk vizsgált DC1-C próbatestre adott mechanikai modellen és a relatív elmozdulás függvényen keresztül a 8. ábra szemlélteti a következő lépésekkel: (1.) feltételezzük az általunk javasolt relatív elmozdulás függvényt a hossz mentén; (2.) felvesszük a gerenda csavarkiosztását; (3.) a függvényről leolvassuk az adott kapcsolóelem pozíciójában keletkező megcsúszást; (4.) a mechanikai modelről leolvassuk az ezen értékhez tartozó, kapcsolóelemben keletkező erőt, amely az adott csavar teherbírását adja. Ezt végrehajtjuk minden egyes kapcsolóelemre a gerenda maximális nyomatéki nullpontjáig, majd vesszük a teherbírások átlagát (5.), amiből meghatározzuk a k_{flex} tényezőt az átlagos csavarterbírás és a legelső csavar teherírásának hányadosából (6.). Végül az így kapott tényezőt beszorozzuk az első csavar teherbírásával (7.), ez lesz a kapcsolóelem hatékony teherbírása, majd ezzel folytatjuk az öszvérgerenda teherbírásának számítását az Eurocode 4 szerint képlékeny elven.

Az ezek alapján kiszámolt k_{flex} tényező értéke 0,89, amelyből a meghatározott gerenda teherbírás 613,6 kNm, amely 846,4 kN terhelő erőnek felel meg. A kísérletből 892,7 kN, a numerikus szimulációból 899,1 kN teherbírást kaptunk, vagyis az eltérés 5,2% és 5,9%. Kijelenthető tehát, hogy a bemutatott számítási eljárás kellő pontossággal visszaadja a valós teherbírást. Az eljárás pontosságát tovább vizsgáljuk és kiterjesztjük a többi gerendára és a paramétervizsgálat eredményeire.



8. ábra. A DC1-C típusúhoz tartozó hosszirányú relatív elmozdulás függvénye (bal), valamint a DC1-C típusra javasolt mechanikai modell (jobb) a számítás lépéseivel feltüntetve

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A jelen kutatásban acélgerendából, előregyártott vasbeton panelekból és oldható nyírt kapcsolóelemekből álló szétszerelhető öszvérgerendákat fejlesztettünk ki. A kapcsolóelem vizsgálatára és továbbfejlesztésére kinyomókísérleti programot és numerikus vizsgálatokat hajtottunk végre. Ezeknek megfelelően négy 5,8 m fesztávú próbatesten gerendakísérletet végeztünk, melyet további numerikus szimulációkkal egészítettünk ki. A kutatás eddigi következtetései a következők:

1. A kifejlesztett szerkezeti rendszer megfelelő merevséggel, teherbírással és alakváltozási képességgel (duktilitással) rendelkezik, amely alkalmazható a mérnöki gyakorlatban.
2. A gerendákat rugalmas-képlékeny viselkedés jellemzi a kapcsolóelemek nyírási tönkremenetelig, amely összhangban van a kinyomókísérletek során megfigyelttel.
3. A habarcskiöntéssel rendelkező kapcsolóelemek kedvezőbb alakváltozási képességgel rendelkezik, amely kedvezőbb nyíróerőeloszlást eredményez.
4. A hosszirányban megszakított panelekkel rendelkező gerenda kisebb merevséggel, ugyanakkor jelentős alakváltozó képességgel és nagyobb teherbírással rendelkezik a kedvezőbb nyíróerőeloszlás következtében.
5. A próbatestek üzemi teher szinten maradó alakváltozás vagy repedés nélkül, rugalmasan viselkednek, vagyis a gerendák alkalmasak a szétszerelésre és az újrafelhasználásra.
6. A numerikus modell követi a valós szerkezeti viselkedést, ahol a kedvező és kedvezőtlen csavareloszlást feltételező rugókarakterisztikák kombinációi adják a legpontosabb eredményt.
7. Az eredmények tükrében javaslatot tettünk az Eurocode 4, Kozma-módszeren alapuló számítási eljárásra, amely érvényes az általunk kifejlesztett szerkezeti rendszerre.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a BME és a KÉSZ Csoport, bim.GROUP Kft. együttműködésében valósult meg. A projektet a Kulturális és Innovációs Minisztérium támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból az EKÖP-24-3-BME-320 keretében. A szerzők köszönetüket fejezik ki a Szerkezetvizsgáló Laboratórium munkatársainak, az ipari partnereknek, valamint Luis Calado professzornak a Lisszaboni Egyetemről.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Lam, D., Dai, X., Ashour, A. F., & Rehman, N. (2017). *Recent research on composite beams with demountable shear connectors*. Steel Construction: Design and Research, 10(2), 125–134. <https://doi.org/10.1002/stco.201700017>
- [2] Kozma, A., Odenbreit, C., Braun, M. V., Veljkovic, M., & Nijgh, M. P. (2019). *Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures*. Structures, 21, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.011>
- [3] Ding, Y., Chung, K. F., Tong, C. C., Wang, X. D., Zhou, X. H., & Elghazouli, A. Y. (2025). *Behaviour of large-diameter high-strength bolted shear connections for prefabricated composite beams*. Engineering Structures, 322(Part A), 119002. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119002>
- [4] Ataei, A., Bradford, M. A., & Liu, X. (2016). *Experimental study of composite beams having a precast geopolymer concrete slab and deconstructable bolted shear connectors*. Engineering Structures, 114, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.041>
- [5] Kozma, A., Yang, J., Ahmad, A., & Odenbreit, C. (2024). *Demountable composite beams for a circular economy: Large-scale beam tests*. Steel Construction, 17(1), 11–20. <https://doi.org/10.1002/stco.202300017>
- [6] Király, K., & Dunai, L. (2024). *Experimental study of novel demountable shear connectors for steel-concrete composite buildings*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 68(2), pp. 647–656, 2024. <https://doi.org/10.3311/PPci.22732>
- [7] Király, K., Dunai, L., Calado, L., & Kocsis, A. B. (2024). *Push-out tests of demountable shear connectors for sustainable composite structures*. Steel Construction, 17(4), 200–211. <https://doi.org/10.1002/stco.202300044>
- [8] Király, K., Borsi, L., Kovács, N., Dunai, L. (2024). *Investigation of the behaviour of demountable shear connectors embedded in concrete and mortar*. Proceedings of the 15 th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 66, 317-3243 2024.
- [9] Király, K., Dunai, L., Calado, L., Kocsis, A. B. (2025). *Experimental study on demountable steel-concrete composite beams*. Journal of Constructional Steel Research, 231, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109582>
- [10] Ansys Academic Research Mechanical APDL, Release 2024 R1
- [11] Kozma, A., Girão Coelho, A., Yang, J., & Odenbreit, C. (2022). *A new concept and algorithm to transfer brittle and arbitrary load-slip curves into an effective shear resistance suitable for Eurocode 4*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 705–718. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/156164>