

Az acél szerkezeti komponens tönkremenetelének vizsgálata trapézgerincű öszvértartók beton dübeles kapcsolataiban

Analysis of the failure of steel structural component of concrete dowels in steel-concrete composite beams with trapezoidal web

NÉMETH Gábor¹, Dr. KOVÁCS Nauzika¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszék,
1111 Budapest Műegyetem rkp. 3-9. Kmf. 85, Tel.: +36 1 463 1751, Fax: +36 1 463 1784, www.hsz.bme.hu

Abstract

Over the past few decades, the use of prefabricated steel-concrete composite girders with a continuous shear connection has become increasingly popular in bridge construction. Such connections are made on a steel plate welded to the top of the steel flange or on the embedded web of the bridge girder with cut-outs in the part embedded in the concrete. Consequently, one possible mode of failure of the connection is the bending-shear failure of the steel structural component, which is the subject of this paper.

Keywords: steel-concrete composite structure, shear connection, concrete dowel, trapezoidal plate, bending-shear failure

Kivonat

Az elmúlt néhány évtizedben a hidépítésben egyre nagyobb népszerűségnek örvend az előregyártott öszvértartók alkalmazása folyamatos nyírt kapcsolattal. Az ilyen kapcsolatok az acél övlemez tetejére hegesztett acéllemezen vagy a hídgerenda beágyazott gerincén kerülnek kialakításra a betonba ágyazott részen ejtett kivágásokkal. Ebből adódóan a kapcsolat egyik lehetséges tönkremeneteli módja az acél szerkezeti komponens hajlítási-nyírási tönkremenetele, amely jelen cikk tárgya.

Kulcsszavak: öszvér szerkezet, nyírt kapcsolat, beton dübel, trapézlemez, hajlítási-nyírási tönkremenetel

1. BEVEZETÉS

Az első trapézlemez gerinccel épült öszvérhíd a Cognac-híd, mely 1986-ban épült Franciaországban. Ezután 1995-ig még három trapézgerincű híd épült az országban, egyre nagyobb támaszközökkel. Németországban, Taiwan-ban és Koreában is épültek hasonló hidak, de leginkább Japánban és Kínában terjedtek el. Kutatásuk és fejlesztésük is Japánban és Kínában a legintenzívebb, de Európában is egyre több kutatás tárgyát képezik hasonló szerkezetek. A beton és acél közötti nyírt kapcsolóelem általában fejescsap, perfobond lemez (zárt kivágások) vagy szögben álló lemezek, de beton dübelekkel (nyílt kivágások) is épültek már hidak. A betonlemezbe ágyazott trapézlemez zárt kivágásos kapcsolóelemmel való kialakításra egy megépült példa a japán Hondani híd [1].

A beágyazott trapézlemezzel tervezett kivágásos nyírt kapcsolatok esetén legtöbbször csak a beton tönkremenetelét vizsgálják [2]. Azonban a széles körben elterjedt fejes csap esetén – amely az egyetlen öszvér kapcsolóelem, amelyre szabványban rögzített tervezési formulák állnak a mérnökök rendelkezésére – is két tönkremenetelre kiszámolt teherbírás közül kell a kisebbet kiválasztani. Az egyik formula a fejes csap nyírási tönkremenetelét veszi alapul, a másik a beton morzsolódását a csap tövében [3]. Természetesen más nyírt kapcsolóelemeknél is van létjogosultsága a különböző anyagok tönkremeneteli lehetőségeit vizsgálni. Trapézlemez profilok esetén ez valószínűleg azért merül fel ritkán, mivel a lemezmezőkön csupán 1-1 kivágást szokás elhelyezni, azonban elvben több kivágást is ejthetünk a lemezmezőkön. Ebben az esetben a beton tönkremenetele mellett a dübelek közötti acél anyag hajlítás-nyírási hatására bekövetkező átszakadása lehetséges tönkremeneteli mód.

A nyílt kivágással készülő beton dübeles nyírt kapcsolatok lehetséges tönkremeneteli módjai a beton repedések általi kimetsződése (pry-out) és a kivágások közötti acél anyag szakadása. Legtöbbször a beton

kimetsződése következik be ilyen típusú kapcsolatoknál, a repedések a nyílt kivágások csúcspontjaiból indulnak ki. Megjegyzendő, hogy amennyiben beágyazott trapézlemez szerkezetéről beszélünk, ez a típusú tönkremenetel a ferde lemezmezők alatti beton morzsolódásával egyidejűleg formálódik. Az acél anyag tönkremenetelét hajlítási repedés jellemzi, amely a nyíróerő irányával nagyjából párhuzamosan alakul ki. Általában a hajlítás miatti tönkremenetel azon esetekben következik be, amikor a kivágások viszonylag hosszúak, a lemez vastagsága kicsi, és a normál szilárdságú acél nagyszilárdságú betonnal és erős keresztirányú vasalással társul [4].

A folytatólagos nyírt kapcsolatok acél komponensének való tönkremenetelét kísérletekkel is vizsgálták. Ezeknél a vizsgálatoknál az acél tönkremenetele volt a mértékadó, a betonban nem figyeltek meg számottevő károsodásokat. A tönkremenetel a kivágások közötti acél részek hajlítására bekövetkező acélfolyás miatt következik be, így a tervezési formulát a folyási feszültség alapján írták fel [5]. Megjegyzendő, hogy az acél anyag a teherbírási határállapot mellett a fáradási határállapotban is vizsgálendő, mivel fennáll a fáradási repedések megjelenésének veszélye [6].

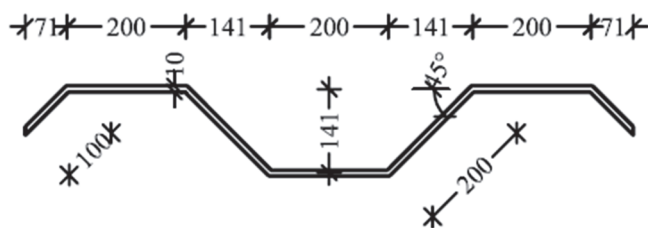
Perfobond-szerű, zárt kivágások esetén az acél komponens tisztán nyírásra tud tönkre menni – a kivágásokban található beton és betonacél képes lehet átnyírni a kivágások közötti acél anyagot. Azonban ez a típusú tönkremenetel akár teljesen kizárható, amennyiben a dübelek közötti távolság és a dübelek átmérőjének aránya 2.25 alatt van 60 MPa betonszilárdságig, vagy 3.0 alatt 90 MPa betonszilárdságig. Amennyiben ez az egyszerű és észszerű szerkesztési szabály be van tartva, a kapcsolat tönkremenetele minden esetben a beton összemorzsolódása lesz [7].

A kapcsolatok nyírási teherbírása mellett a duktilitásuk, alakváltozási képességük is meghatározó fontosságú öszvérszerkezetek tervezése során. A folytonos nyírt kapcsolatok esetén jelenlévő beton kimetsződés (pry-out) viszonylag rideg tönkremenetel, míg az acél anyag átszakadása igen duktilis [4]. A beágyazott trapézlemezeknél bekövetkező ferde acéllemezek alatti betonmorzsolódás szintén rendkívül duktilis tönkremenetelnek tekinthető [8].

2. NUMERIKUS MODELL

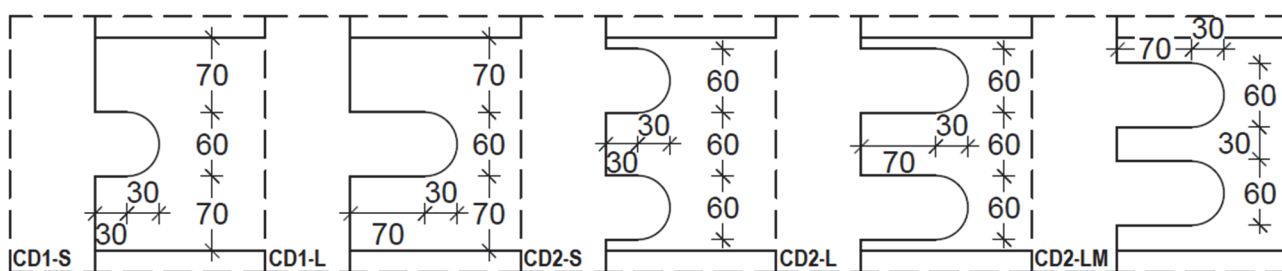
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hidak és Szerkezetek Tanszékén 2017-ben egy valós léptékű push-out kísérletsorozat során a vizsgálat tárgya az öszvér kapcsolat vasbeton komponense volt, a tönkremenetel és a teherbírás értékek mind a beton komponensre vonatkoztak [9]. Jelen cikk numerikus vizsgálatai az acél komponens tönkremenetelét hivatottak vizsgálni, a végeselemes modellezés ANSYS szoftver környezetben készült.

Az 1. ábrán látható trapézlemez profilja a [9]-ben részletezett kísérletsorozat geometriájával azonos. A trapézlemez hajlásszöge 45° , lemezmező szélessége 200 mm. A trapézlemez magassága 450 mm, a felső éltől mért 150 mm mélységben van beágyazva a vasbeton lemezbe. A trapézlemez vastagsága a kísérletek próbatesteiben 10 mm volt, a numerikus vizsgálatok során 5 és 10 mm vastag trapézprofilokat vizsgáltunk.



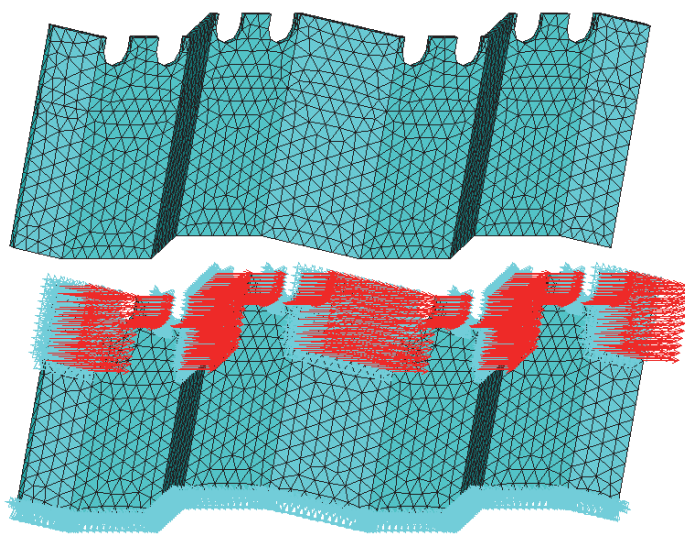
1. ábra. A trapézprofil geometriája

A 2. ábrán látható beton dübeles kapcsolóelemek a trapézlemez hossz tengellyel párhuzamos lemezmezőin, a beágyazott részen kerülnek kivágásra. A rövid kivágások (S jelűek) teljes hossza 60 mm, a hosszú kivágások (L jelűek) teljes hossza 100 mm. Az egyes lemezmezőkön egy (CD1 jelűek), illetve két (CD2 jelűek) kivágást alakítottunk ki, utóbbi kialakításoknál a két kivágás közötti acéllemez általában 60 mm széles. A dupla kivágások közötti acéllemez hajlítási tönkremenetelére irányuló vizsgálatokhoz továbbá egy egymáshoz közelebb elhelyezett, dupla hosszú kivágásokkal ellátott (CD2-LM jelű) modellt is készítettünk. [9]-ben a CD1-S, CD1-L és CD2-S jelű kivágás kialakításokra találhatók kísérleti eredmények.



2. ábra. A különböző típusú kivágások geometriái

A 3. ábrán látható numerikus modell SOLID187 elem típusú testelemekből készült, tetraéderes hálózással. A trapézprofil alján befogott megtámasztást definiáltunk. A hossz tengellyel párhuzamos terhelőerők a beágyazott szakaszon a ferde lemezmezők nyomóerő felőli oldalán, illetve a kivágások megfelelő élein működnek. A beágyazott szakaszon a ferde lemezmezők nyomóerővel ellentétes oldalán, illetve a kivágások megfelelő élein C25 beton merevségének megfelelő rugalmas alátámasztást definiáltunk.



3. ábra. Végeselemes modell hálózása és peremfeltételei

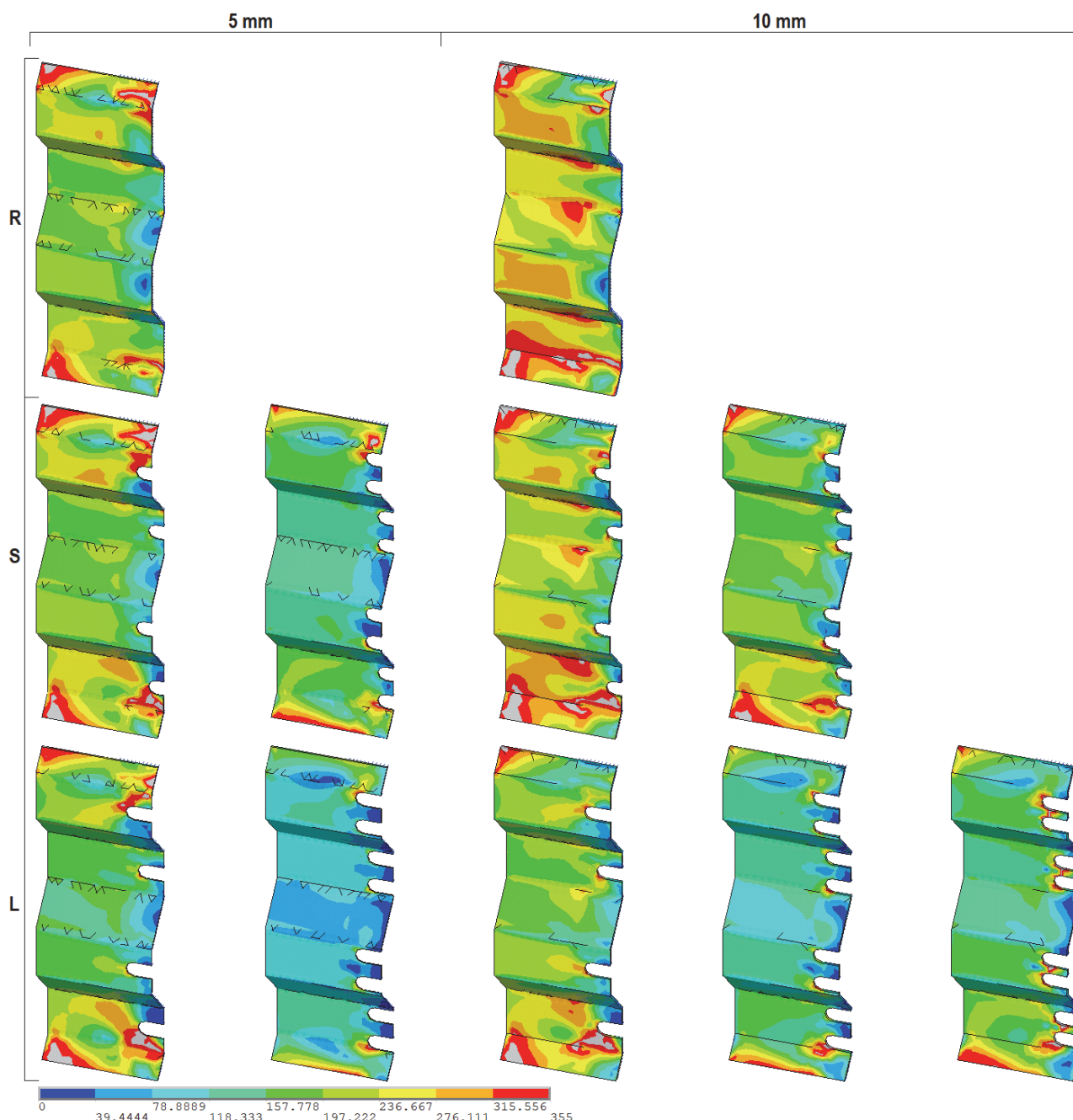
3. EREDMÉNYEK

3.1. Szerkezeti viselkedés és erőjáték

A 4. ábrán a tönkremenetelhez tartozó összehasonlító feszültségábrák láthatók. A felső sorban a – kivágások nélküli – referencia profilok, a középsőben a rövid kivágásokkal készült profilok, az alsó sorban a hosszú kivágásokkal készült profilok találhatók. A bal oldali oszlopokban az 5 mm vastagságú trapézprofilok (egy és két kivágással), a jobb oldaliakon a 10 mm vastagságú profilok (egy, két és egymáshoz közelebb ejtett két kivágással) láthatók.

Az 5 és 10 mm lemezeket összehasonlítva látható, hogy a 10 mm vastag lemezek esetén a képlékenyedés nagyobb mértékű, az átlagos feszültség szint magasabb. Ez természetes, hiszen a nagyobb falvastagsághoz nagyobb teherbírás tartozik.

A referencia profilokat a kivágásokkal készült profilokkal összehasonlítva látható, hogy míg a referencia profilok esetén leginkább a beágyazott szakasz mellett alakulnak ki nagyobb feszültségek, a kivágásokat tartalmazó profiloknál a kivágások környezete is képlékeny állapotba kerül, hiszen a beton (a numerikus vizsgálatoknál külső erővel helyettesítve) a dübeleken keresztül is képes erőátadásra. Ez, a beton tönkremenetelének szempontjából előnyös lehet, hiszen az átadandó erő nagyobb felületen oszlik el, azonban az acél tönkremenetelének szempontjából hátrányos, hiszen a trapézprofil merevségcsökkenéséhez vezet, így a szilárdsági tönkremenetel előbb következik be. Minél több kivágás kerül elhelyezésre az acél profilon, annál inkább csökken az acél komponens teherbírása, míg ezzel szemben a beton komponens teherbírása nő, így a két komponens teherbírása egymáshoz közelebb kerül. A hosszabb kivágás az előző gondolatmenettel összhangban a beton szempontjából előnyösebb, az acél szempontjából hátrányosabb a rövidebb kivágásnál.

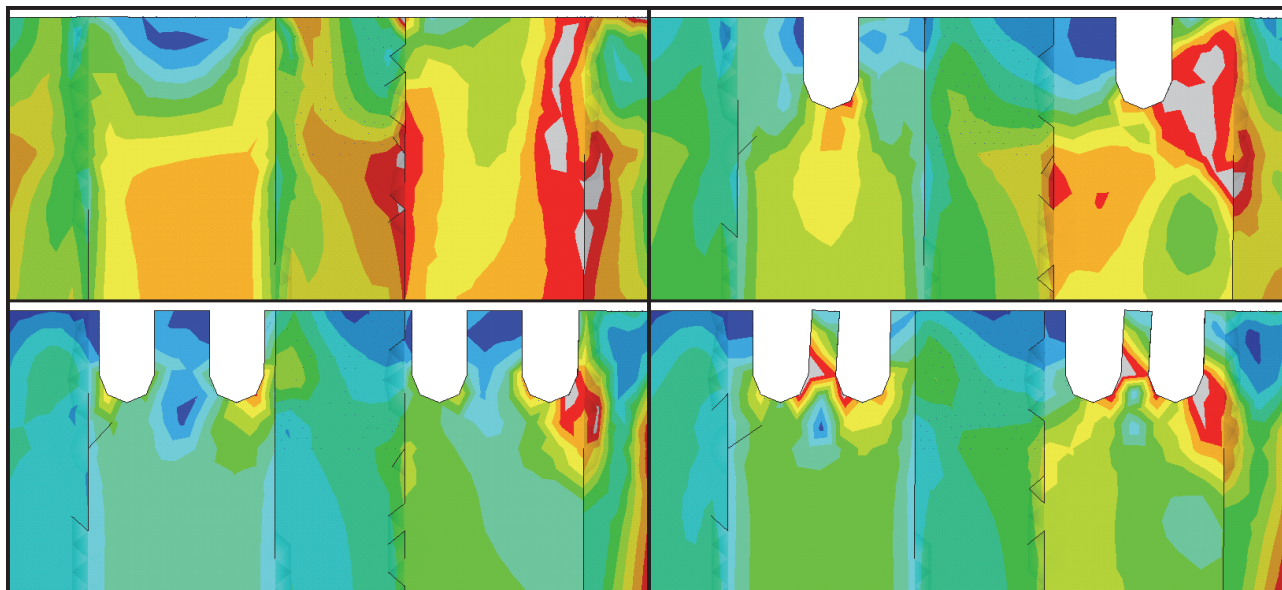


4. ábra. Trapézprofilok összehasonlító feszültségábrái a tönkremenetel pillanatában [MPa]

Az 5. ábra az alsó, hossz tengellyel párhuzamos lemezmezőkön elhelyezett kivágások feszültségeit mutatja be. A 4. ábra alapján elmondható, hogy a kivágások körüli feszültségeloszlások 5 és 10 mm vastagság esetén hasonlóan alakulnak, illetve a rövid és hosszú kivágás esetén is hasonló eloszlás figyelhető meg, így csak a 10 mm vastagságú trapézlemez hosszú kivágásokkal eseteit mutatjuk be.

A kivágásokat közelről figyelve megerősíthető, hogy míg a referencia profilon a hossz tengellyel párhuzamos lemezmezőkön a beágyazott szakaszon nem alakulnak ki nagyobb feszültségek, a kivágásokkal azonban ezek a felületek is bevonhatók a teherviselésbe.

A szimpla kivágás feszültségábráját a dupla kivágással összehasonlítva látható, hogy az azonos lemezmezőkön elhelyezett kivágások esetén valóban megfigyelhető a kivágott kapcsolóelemek közötti acél elemek hajlítása és nyírása. Abban az esetben, ha a két kivágás egymástól a lehető legtávolabbra van elhelyezve, a kivágások közötti acéllemezek hajlítása megfigyelhető ugyan, de továbbra is a beágyazás melletti acél anyag szilárdsági tönkremenetele lesz mértékadó. Azonban amennyiben a kivágások egymáshoz közelebb kerülnek elhelyezésre, a tönkremeneteli mód jól láthatóan a kivágások közötti acéllemez hajlítása lesz.



5. ábra. Kivágások körül kialakult feszültségek

3.2. Tönkrementel és beton szerkezeti komponenssel való összevetés

Az 1. táblázat a tönkrementelhez tartozó fajlagos teherbírásokat mutatja be a numerikus futtatások eredményeként kapott acél (p_s) és a [9]-ben található kísérleten alapuló beton (p_c) komponensekhez. A teherbírásokat a kivágás szám, kivágás hossz (l_{CD}) és trapézlemez vastagság (t_w) függvényében hasonlítottuk össze.

A nyírt kapcsolatok jellemzői és fajlagos teherbírásai

1. táblázat

Jel	Dübel [db]	l_{CD} [mm]	t_w [mm]	p_s [kN/m]	p_c [kN/m]
R-5	-	-	5	586	-
R-10	-	-	10	1410	666
CD1-S-5	1	60	5	573	-
CD1-S-10	1	60	10	1331	843
CD2-S-5	2	60	5	411	-
CD2-S-10	2	60	10	1124	1358
CD1-L-5	1	100	5	495	-
CD1-L-10	1	100	10	1084	911
CD2-L-5	2	100	5	264	-
CD2-L-10	2	100	10	714	-
CD2-LM-10	2	100	10	867	-

A beton tönkrementeléből adódó teherbírást vizsgálva látható, hogy a rövid kivágás 24%-kal, a hosszú kivágás 37%-kal növeli az ellenállást. A dupla rövid kivágás a szimplánál jóval nagyobb mértékben, 104%-kal növeli a teherbírást, azonban ez feltehetően jobban sikerült betonminőséggel magyarázható. Ezzel szemben a kivágások az acél komponens ellenállását csökkentik: a szimpla kivágás 2-23%-kal, a dupla kivágás 20-55%-kal. A hosszú kivágás minden esetben nagyobb mértékű teherbírás csökkenést eredményez, mint a rövid: a rövid kivágás hatására 2-30% közötti, a hosszú kivágás hatására 15-55% közötti mértékben csökken az acél komponens ellenállása. Szimpla kivágás esetén a kivágás 60-ról 100 mm-re való növelése ~16%-os, a dupla kivágás esetén ~36%-os teherbírás csökkenést eredményez az acél komponensben, míg a beton komponens szempontjából a szimpla kivágás növelése 8%-os teherbírás növekedést jelent.

A beton és acél komponenseket együtt vizsgálva elmondható, hogy az acél komponens teherbírása a dupla rövid kivágások kivételével minden esetben nagyobb, azonban megjegyzendő, hogy a kísérletek során alkalmazott betonszilárdság minden próbatestnél meghaladta az előírányzott C25 betonszilárdságot, átlagban 40 MPa volt [9], míg a dupla rövid kivágás esetén valószínűsíthetően ennél is nagyobb. A kísérletsorozat úgy lett megtervezve, hogy minden esetben a beton menjen tönkre, de a nagyobb szilárdságú betonnak a

merevsége, így az acél profil ágyazása is nagyobb, ezzel magyarázható a dupla kivágás esetén látható ellentmondás. Megfigyelhető, hogy 5 mm vastag acélprofil esetén azonban minden vizsgált esetben az acél komponens ellenállása a kisebb, így 5 mm-es acélvastagság mellett a kísérletek során vélhetően az acél szilárdsági tönkremenetele jelentette volna a tönkremeneteli módot.

A szimpla, és a két különböző távolságban ejtett dupla hosszú kivágások eredményeit vizsgálva látható, hogy a közelebb elhelyezett kivágások nagyobb ellenállást eredményeznek. Ez azzal magyarázható, hogy a távolabb elhelyezett kivágások esetén a lemezgyengítések nagyon közel esnek a hossziránnyal párhuzamos lemezmezők széleihez, így a párhuzamos és ferde lemezmezők közötti éltörés merevítő hatása gyakorlatilag megszűnik, így a beágyazott rész melletti acél anyag szilárdsági tönkremenetele hamarabb bekövetkezik. Ezzel szemben a közelebb elhelyezett kivágás esetén az éltörések továbbra is merevítik a ferde lemezmezőket, így a tönkremeneteli mód a kivágások közötti acél lemezek hajlítása-nyírása lesz, ami a vizsgálat alapján jelen esetben nagyobb teherbírást eredményez.

ÖSSZEFOGLALÁS

Öszvérszerkezetek nyírt kapcsolóelemeinek vizsgálatánál és méretezésénél figyelembe kell venni, hogy mint a kapcsolat anyagában, mind a kapcsolatot körülvevő anyagban bekövetkezhet a tönkremenetel. A lehetséges tönkremenetelei módokhoz tartozó ellenállások közül a kisebbet kell a nyírt kapcsolat ellenállásának tekinteni. Beágyazott trapézlemezzel kialakított öszvérszerkezetek nyírt kapcsolatainál legtöbbször a beton komponenshez tartozó tönkremenetelek alakulnak ki, így az acél komponens tönkremeneteli lehetőségeit ritkán vizsgálják. A cikk az acél komponens tönkremeneteléhez tartozó ellenállások meghatározására, és a beton ellenállásával való összehasonlításra irányult, az ezekre vonatkozó főbb megállapítások a következők:

- i. az acél profilon ejtett kivágásoknak, illetve a kivágáshossz növelésének a beton szempontjából ellenállás növelő, az acél szempontjából ellenállás csökkentő hatása van;
- ii. azonos lemezmezőn ejtett több kivágás esetén a kivágások közötti acéllemez hajlítása-nyírása lehetséges tönkremeneteli mód;
- iii. azonos lemezmezőn ejtett több kivágás esetén, ha a kivágások közel vannak az éltöréshez, a ferde lemezmezők megtámasztottsága nagymértékben csökkenhet, ami teherbírást csökkenéshez vezet;
- iv. trapézlemez profilú, beton dübeles nyírt kapcsolattal kialakított öszvértartók esetén a kapcsolat acél komponensének tönkremenetele csak azonos lemezmezőn több, egymáshoz túlságosan közel elhelyezett kivágás esetén releváns (illetve a gyakorlatban nem reális acéllemez vastagság alkalmazása esetén).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] He J., Wang S., Liu Y. et al. The development of composite bridges with corrugated steel webs in China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering*, 2019.
- [2] Raichle J., Kuhlmann U. Trapezblechstege im Verbundbau – Längsschub und Querbiegung der Verbundfuge mit randnahen Kopfbolzen, *Stahlbau*, 84(10), 2015, 763–770.
- [3] EN1994-2:2005. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges.
- [4] Classen M., Hegger J. Shear-slip behaviour and ductility of composite dowel connectors with pry-out failure. *Engineering Structures* 150, 2017, 428–437.
- [5] Feldmann M., Hegger J., Hechler O., Rauscher S. Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln unter ruhender und nicht ruhender Belastung bei Verwendung hochfester Werkstoffe. AiF-Forschungsvorhaben P621, AiF-Nr. 13867, *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V., FOSTA*, 2007.
- [6] Hechler O., Berthelley J., Lorenc W., Seidl G. Continuous shear connectors in bridge construction. *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete*, 2008, 79-91.
- [7] Sayed-Ahmed E.Y. Concrete dowels: innovative shear connectors for composite girders with corrugated steel webs. *Proceedings of the 9th Arab Structural Engineering Conference*, Abu Dhabi, 2003, 73-80.
- [8] Kuhlmann, U. et al. New Developments of Steel and Composite Bridges. *Proceedings of the 7th National Conference of Steel Structures*, Volos, 2011, 18-38.
- [9] Németh G., Kovács N., Jäger B., Kövesdi B. Trapézlemez gerincű gerendák beton dübeles nyírt kapcsolóelemeinek vizsgálata kinyomó kísérletekkel. *XIII. Magyar Mechanikai Konferencia*, Miskolc, 2019.