

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók
viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények
alapján

Készítette: *Király Krisztián*
Harmadéves építőmérnök hallgató

Konzulensek: *Dr. Dunai László*
Dékán, Tanszékvezető, Egyetemi tanár

Dr. Kovács Nauzika
Egyetemi docens

Dr. Kövesdi Balázs
Egyetemi docens

Tartalomjegyzék

Absztrakt.....	3
1. Bevezetés	4
2. Szakirodalmi áttekintés.....	5
2.1 Öszvérszerkezetek tulajdonságai.....	5
2.2 Az innovatív kapcsolóelemek bemutatása [3].....	5
2.3 Korábbi kísérletek a nyírt kapcsolóelemekről	7
3. A gerendakísérlet [3].....	9
3.1 A gerendák bemutatása.....	9
3.2 A kísérlet bemutatása	12
3.3 Elmozdulásmérő műszerek és nyúlásmérő bélyegek elrendezése	14
4. Teherbírások számítása	15
4.1 Kiindulási adatok.....	15
4.2 Rugalmas számítás.....	16
4.3 Képlékeny számítás.....	17
4.4 A képlékeny töréshez tartozó teher számított és mért értékei	18
5. Az elmozdulások kiértékelése	19
5.1 A kiértékelés módszere	19
5.2 Függőleges lehajlás vizsgálata	19
5.3 Relatív elcsúszások vizsgálata	20
5.3.1 Összesített relatív elcsúszások	20
5.3.2 Relatív elcsúszások különböző nagyságú lehajlások esetén	24
5.3.3 Közelítő függvények meghatározása.....	26
5.3.4 Kísérleti paraméterek definiálása	27
5.3.5 Az SN4 keresztmetszet relatív elcsúszásai	28
5.4 Az elmozdulások elemzésének összegzése	32
6. A feszültségek kiértékelése.....	33
6.1 A kiértékelés módszere	33
6.2 Mért feszültségek meghatározása	33
6.2.1 A rugalmassági modulusok meghatározása.....	33
6.2.2 Feszültségek előállítása	34
6.3 Számított feszültségek meghatározása	35

*Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének
elemzése gerendakísérleti eredmények alapján*

6.3.1	Feszültségek meghatározása rugalmas alapon.....	35
6.3.2	Feszültségek meghatározása képlékeny alapon	36
6.4	Feszültségek elemzése.....	37
6.4.1	Feszültségeloszlások a rugalmas tartományban	37
6.4.2	Feszültségeloszlások a képlékeny tartományban	39
6.5	A feszültségeloszlások elemzésének összegzése.....	42
7.	Következtetések.....	43
	Ábra- és táblajegyzék	45
	Irodalomjegyzék	47

Absztrakt

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában nyolc különböző, innovatív nyírt kapcsolattal kialakított öszvér gerendatartó kísérleti vizsgálatát végezték el. A vizsgálat fő célja az acél és a beton közötti újfajta kapcsolatok szerkezeti viselkedésének a megértése, a különböző fajták tulajdonságainak kiértékelése és összehasonlítása. A gerendák teljeskörű vizsgálatát az Eurocode által javasolt eljárással, három pontos hajlítással végezték el. Mind a nyolc öszvér gerenda 6 m hosszú, amely IPE 400 acélgerendából és 20x50 cm vasbeton lemezből áll. A gerendák elrendezése és anyagminősége azonos, csak az acél-beton kapcsolatokban térnek el egymástól. A kapcsolatok a következők: viszonyításként fejes csapos, hagyományos zárt furatos perfobond, hagyományos nyitott furatos perfobond, Y-perfobond, fecskefarkas zárt furatos perfobond, fecskefarkas nyitott furatos perfobond, trapéz zárt furatos perfobond, trapéz nyitott furatos perfobond.

A jelenlegi tanulmány célja a mért kísérleti eredmények kiértékelése: a terhelés és relatív megcsúszások, valamint a terhelés és lehajlások összehasonlítása a különböző innovatív nyírt kapcsolatokkal szerelt gerendák esetén. A lehajlásokat és a relatív megcsúszásokat a gerendán hat különböző keresztmetszetben mérték. Az összehasonlításokat a teher-relatív elmozdulás kapcsolatából meghatározott kezdeti merevség, alakváltozó képesség és a duktilitás alapján végeztem el.

A kísérlet alatt a gerendákon három keresztmetszetben lettek elhelyezve nyúlás mérő bélyegek. Ezekből a középső keresztmetszetet vizsgáltam összesen 12 helyen (8 az acélban, 4 a betonban). A feszültségeloszlásokat az öszvér keresztmetszetben kiértékeltem rugalmas, rugalmas-képlékeny, és képlékeny állapotban a mért feszültségek alapján. Az így kapott feszültségeloszlásokat összehasonlítottam az elméleti feszültségeloszlásokkal, ezáltal meghatároztam melyik új típusú kapcsolóelem hogyan befolyásolja a feszültségeloszlást.

Az elemzéseket azzal a céllal végeztem, hogy meghatározzam a vizsgált kapcsolat típusok közül az optimális szerkezeti viselkedéssel rendelkezőket, amelyek jelentős teherbírás mellett nagy alakváltozási képességgel rendelkeznek. A feszültségek vizsgálata során megismertem a kapcsolat viselkedésének (megcsúszásának) hatását a keresztmetszeten belüli feszültségeloszlásra.

1. Bevezetés

Napjaink egyik legfontosabb szerkezeti típusa az együttdolgozó tartó, vagy a magyar elnevezés szerinti öszvértartó, amely két vagy több különböző szerkezeti anyagból készült elemek elnevezése [1]. Öszvérszerkezeteket első sorban nagyobb feszítávolságú szerkezeteknél használnak mind a hídépítésben, mind a magasépítésben kedvező tulajdonságaik révén. Az öszvérszerkezetek együttdolgozásáért felelős legfontosabb szerkezeti elem a nyírt kapcsolóelem, amely létrehozza az acél és a beton közötti kapcsolatot.

A vizsgálat tárgya az együttdolgozásáért felelős innovatív nyírt kapcsolóelemek szerkezeti viselkedésének a megértése, a különböző fajták tulajdonságainak kiértékelése és összehasonlítása egymással. A cél a vizsgált kapcsolat típusok közül az optimális szerkezeti viselkedéssel rendelkezők meghatározása. A tanulmányt teljes körű gerendakísérletekből kapott eredmények alapján készítettem el.

Első lépésben szakirodalmi áttekintés alapján bemutatom az öszvér tartók tulajdonságait, a nyírt kapcsolóelemek fontosságát, az innovatív kapcsolóelemek kialakítását, valamint néhány eddig végzett tanulmányt és kísérletet a kapcsolóelemekről.

Ismertetem a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végzett gerendakísérleteket: az öszvértartók szerkezeti kialakítását, az innovatív kapcsolatok kialakítását, a kísérlet folyamatát és fontosabb tudnivalóit, valamint az elmozdulásmérő műszerek és nyúlásmérő bélyegek elhelyezését.

Bemutatom a kísérletekből kapott adatok feldolgozásának a módját, és az egyes kapcsolat típusokhoz tartozó eredmények kiértékelését. Először a folyáshoz, és képlékeny töréshez tartozó terhelő erőket határoztam meg. Ezt követve függőleges lehajlások eredményeit dolgoztam fel, és értékeltem ki diagramok segítségével a terhelő erő függvényében. A következő elmozdulási kiértékelés az acél és a beton közötti relatív elcsúszás szintén a terhelés függvényében. Ez jobban mutatja az egyes újfajta kapcsolóelemek tulajdonságait, így a megcsúszások elemzésére nagyobb hangsúlyt fektettem: grafikonos és táblázatos kiértékeléseket egyaránt készítettem.

Az elmozdulási kiértékelésekhez hasonlóan a kísérletből, a nyúlásmérő bélyegek által adott értékeket feldolgoztam. A gerendákon a műszerek három keresztmetszetben voltak elhelyezve, ebből a jelenlegi tanulmányban csak a középső keresztmetszetet vizsgáltam. Itt összesen 12 ponton mérték a nyúlásokat: 8 ponton az acélban, és 4 ponton a betonban. A kiértékelés célja a keresztmetszetben mért feszültségek eloszlásának a vizsgálata, megértése, valamint összehasonlítása az Eurocode ajánlásai alapján meghatározott elméleti feszültségeloszlással. A feszültségek kiértékelését elvégeztem rugalmas és képlékeny állapotban is.

Végül a lehajlás, a relatív elcsúszás és a feszültségeloszlás eredményeit összehasonlítottam az egyes kapcsolattípusoknál, értékelve ezzel, melyik innovatív nyírt kapcsolóelem adja a legjobb együttdolgozást, ezáltal a legnagyobb teherbírást és a legoptimálisabb alakváltozó képességet.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1 Öszvérszerkezetek tulajdonságai

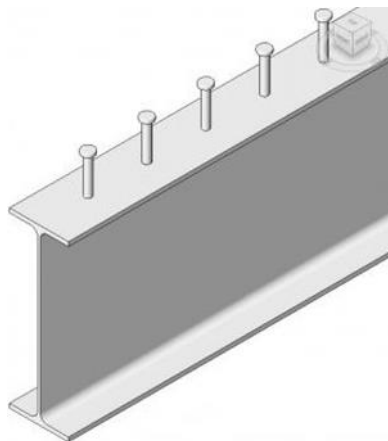
Az öszvértartó elnevezést általában azokra a két vagy több anyagból készült szerkezeti elemekre alkalmazzuk, amelyek közül legalább az egyik már az összeépítés idején is jelentős merevséggel bír. Többféle anyag együttdolgozásával előállítható öszvér tartó. Jelen esetben az acél és beton anyagú szerkezeti elemek együttdolgoztatásával előálló öszvértartókra koncentrálunk. Az öszvértartók ötvözik a két anyag előnyös tulajdonságait, miközben a hátrányok alig jelentkeznek [1].

Az öszvértartók fontos előnye a tiszta acélszerkezettel szemben, hogy a tartó merevsége – azonos teherbírás mellett – lényegesen nagyobb. A vasbeton tartókkal szemben az öszvértartók fő előnye a lényegesen kisebb súly (azoknak 15-30%-a) valamint a könnyebb, megbízhatóbb vizsgálat, a fenntartás, felújítás egyszerűbb végrehajthatósága. A magasépítési öszvérszerkezetek alkalmazásánál fontos előny az acél tartószerkezethez képest a viszonylag jó tűzállóság [1].

A nyírt kapcsolat az öszvér szerkezeti elem beton és acél alkotórészei közötti olyan kapcsolat, amely elegendő szilárdságú és merevségű ahhoz, hogy lehetővé váljon a két alkotórészből álló szerkezeti elem egységes szerkezeti elemként való tervezése; továbbá feladata a beton megszilárdulása után létrejövő acél és beton közötti együttdolgozás biztosítása [2].

2.2 Az innovatív kapcsolóelemek bemutatása [3]

A beton és az acél határfelületén a hosszirányú nyíróerő felvételére leggyakrabban csapos kapcsolatot használnak, lásd 1. ábra.



1. ábra: Csapos kapcsolat [4].

A széles körben elterjedt, hagyományos fejes csapos nyírt kapcsolat egyszerűsége mellett számos hátrányos tulajdonsága ismert. A két szerkezeti elem összekapcsolását biztosító fejes csapos kialakítás viselkedése mind kisciklusú, mind magas ismétlésszámú fárasztó terhek alatt is kedvezőtlen, a nyírt kapcsolat már viszonylag alacsony teherszinten is degradálódik, majd a teher emelkedésével a keresztmetszet különálló acél- és betonelemként kezd el viselkedni.

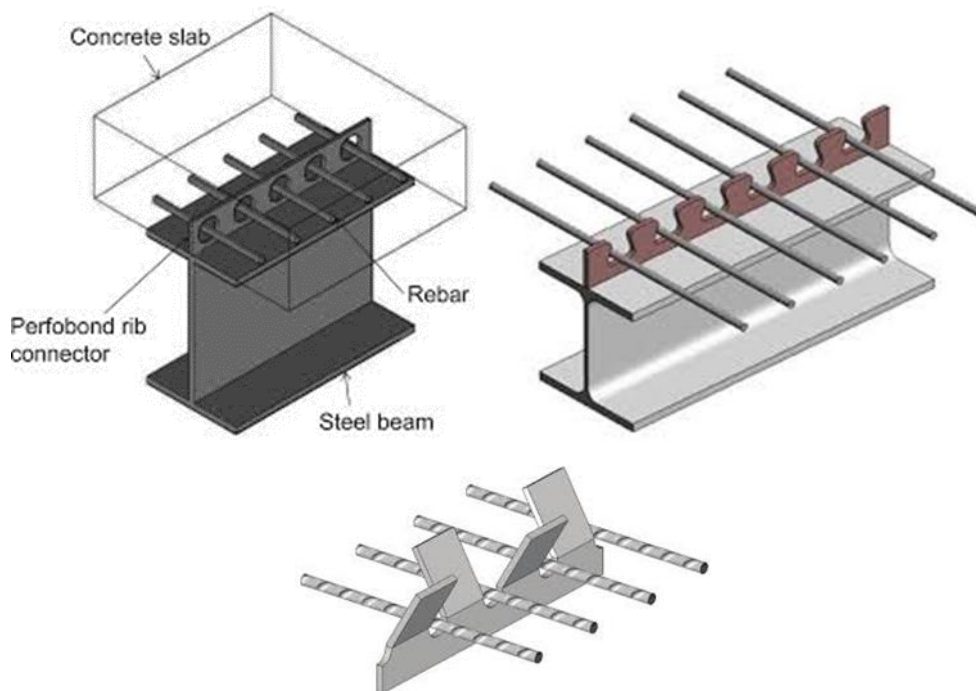
Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

Gyártás és kivitelezés szempontjából is kedvezőtlen a csapos kialakítás, magas a csaphegesztés élőmunka igénye.

A fent vázolt problémák miatt folyamatos az újszerű kapcsolati kialakítások kutatása, a teherbírási, erőátadási, ismételt teher alatti kedvező kialakítások keresése, az automatizált gyárthatóság megvalósítása. A kutatás egyik iránya a folyamatos kapcsolatot biztosító, ún. perfobond kialakítású kapcsolóelemek fejlesztése. A perfobond kapcsolatot a gerenda felső övében a gerinccel párhuzamosan végigfutó lemez adja, mely furataiba keresztirányú vasalás helyezhető. Az 1980-as évek második felében kezdték el alkalmazni, kifejtését a fejes csapos megoldás kedvezőtlen fáradási viselkedése motiválta.

A perfobond kapcsolatok további előnye, hogy jóval duktilisabbak, mint a fejes csapos kialakítás, lassan ereszkedő leszálló ágat és nagy képlékeny alakváltozásokat mutatnak. A szakirodalomban található, perfobond elemekkel végzett vizsgálatok mind statikus, vagy magas ismétlésszámú fárasztó terhelésre vonatkoznak, a posztelasztikus viselkedés szempontjából fontosabb kisciklusú fáradásról nem tartalmaznak információt.

A perfobond kialakítás számos változatát fejlesztették ki, melyre példákat mutat a 2. ábra.



2. ábra: Perfobond kapcsolóelemek típusai [5].

2.3 Korábbi kísérletek a nyírt kapcsolóelemekről

Az öszvérgerendák mechanikai viselkedésének vizsgálata az utóbbi évtizedben erősen kutatott terület. Főként az egyszerű, fejes csapos kapcsolóelemeket vizsgálták, de újabb kutatások jelentek meg néhány perfobondos típus vizsgálatáról is. Ebben a fejezetben bemutatok néhány korábbi kísérletet, melyekben vizsgálták az öszvérszerkezetek nyírt kapcsolóelemeit.

1966-'67-ben Slutter és Fisher fejes csapokon végeztek fárasztó kísérleteket, melyeknek célja a fáradási viselkedéseknek a vizsgálata, a fáradási élettartam becslése, valamint a statikus teherbírás meghatározása volt. A vizsgálatok során azt tapasztalták, hogy a fáradási repedés az acélöv és csapok közötti hegesztett zónában alakul ki. Eredményül egy összefüggést kaptak a csapokban keletkező nyírófeszültség-amplitudó számítására, amely a ciklusszámnak a függvénye [6].

Szintén kinyomókísérleteket végzett B. S. Jayas és M. U. Hosain 1988-ban. Vizsgálták a fejes csapos kialakítású nyírt kapcsolóelemek szerkezeti viselkedését és tönkremeneteli módjukat különböző csapkiosztásokkal sík és bordás vasbeton lemezek esetén, empirikus képletet javasoltak a kapcsolati ellenállás számítására [7].

1994-ben E. C. Oguejiofor és M. U. Hosain újfajta kapcsolóelemet vizsgáltak, a zárt furatos perfobondot, kinyomókísérletek alapján. A kísérletükben az acél övre függőlegesen hegesztett lemezek nyírási teherbírását vizsgálták a furatok számának a függvényében, valamint a furatokba helyezett vasalás, és a beton teherbírását. Megfigyelték, hogy a legnagyobb nyírási teherbírást akkor érhetjük el, ha annyi furatot helyezünk a lemezbe, hogy a furatok közötti távolság a furat átmérőjének 2,25-szerese legyen. A furatok és a vasalás optimális növelésével 63%-os teherbírásnövekedést értek el a betonban, így javaslatot tettek a perfobond lemez kialakítására [8].

1997-ben N. Gattesco és E. Giuriani kis ciklusú fárasztó kísérleteket hajtottak végre. Első sorban nagy fesztávú hidakat vizsgáltak. Megfigyelték, hogy a nagy relatív elmozdulások miatt a csapokban képlékeny alakváltozások keletkeznek. Kísérletük eredménye szerint a relatív elmozdulás és a szerkezet fáradási élettartama között lineáris összefüggés van [9].

M. Feldmann és H. Gesella 2005-ben kinyomókísérlet alapján vizsgálták a fejes csapos kapcsolóelemes öszvérgerendáknak a repedésterjedését, valamint az acél és a beton elmozdulását a terhelő erő függvényében. A csapok fáradási viselkedését és tönkremenetelét a kialakult repedések vastagsága és mélysége alapján elemezték. A vizsgálat analitikai modelleket javasol az erő – elmozdulás, és a csapok tönkremenetelének a viselkedésére [10].

Sang-Hyo Kim, Kyu-Tae Choi, Se-Jun Park, Seung-Min Park és Chi-Young Jung 2012-ben Y-perfobondok szerkezeti viselkedését vizsgálták különböző geometria (lemez vastagsága, Y elágazás szöge), és betonszilárdság esetén kinyomókísérlettel. Megfigyelték, hogy a hagyományos perfobond kialakításokkal szemben nagyobb a duktilitása és nyírási ellenállása [11].

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

L.F. Costa-Neves, J.P. Figueiredo, P.C.G. da S. Vellasco és J. da Cruz Vianna kinyomókísérletek során perfobond lemezhez illesztettek övet, majd az így kapott nyírt kapcsolóelemeket, és a hozzájuk csatlakozó vasalást vizsgálták 2013-ban. Részletesen elemezték az elcsúszásokat a teher függvényében, a kapcsolóelemek duktilitását és a tönkremenetel módját. Azt kapták eredményül, hogy a felszerelt öveknek köszönhetően nagy mértékben növekedett az ellenállás, amire analitikus modellt javasoltak [12].

2014-ben S.H. Kim, J. Choi, S.J. Park, J.H.A, C.H Jung Y-perfobondos kapcsolóelemek viselkedését vizsgálták. Megfigyelték, hogy az Y-típusú perfobond kapcsolatú gerenda a csapos gerendához hasonlóan, statikus terhelés esetén duktilisan viselkedik. Megállapították, hogy a fejes csapos kialakítású gerendákhoz képest nagyobb a teherbírása, a rugalmas tartomány kezdeti merevsége és a folyáshoz tartozó teherszintje [13].

Szintén 2014-ben Y-perfobond kötéseket vizsgált Sang-Hyo Kim, Won-Ho Heo, Kyung-Sik Woo, Chi-Young Jung és Se-Jun Park kinyomókísérlettel. A lemez szélességét és vastagságát változtatva vizsgálták a kötés teherbírását, elmozdulásait és duktilitását. Megállapították, hogy állandó szélesség mellett a nagyobb magasságú kialakításnak nagyobb a teherbírása, duktilitása és a létrejött elcsúszások nagysága. Ugyanakkor állandó magasság mellett nagyobb szélesség esetén a nyírási merevség nő [14].

2015-ben Shuangjie Zheng, Yuqing Liu, Teruhiko Yoda és Weiwei Lin körszimmetrikus, és elnyújtott kör alakú perfobond kötések tönkremenetelét, nyírási teherbírását és elcsúszását vizsgálták kinyomókísérletekkel. Megállapították, hogy a kötések nyírási merevsége és teherbírása növelhető a furatok méreteinek növelésével, hogy nagyobb felületen érintkezzen a betonnal. A perfobondok nyírási teherbírására végelelemes szimulációk segítségével analitikus modellt alkottak [15].

Sang-Hyi Kim, Kun-Soo Kim, Sejun Park, Jin-Hee Ahn és Min-Kyu Lee 2016-ban nagy ciklusszám mellett vizsgálta Y-perfobond kapcsolóelemek viselkedését (elcsúszás, alakváltozás, merevség) kinyomókísérlettel. Alátámasztották, hogy az Y-perfobond merevségét és teherbírását figyelembe véve előnyösebb, mint a hagyományos, fejes csapos kapcsolóelem. Az eredmények alapján numerikus szimulációkat alkottak hidak vizsgálatára [16].

Mint azt láthattuk, az elmúlt húsz évben sokat foglalkoztak az öszvérszerkezetek nyírt kapcsolóelemeivel. A felsorolt kutatások azonban mind kinyomókísérleten alapulnak, amivel csak a kapcsolat viselkedését vizsgálják. A jelen kutatásban gerendakísérlet segítségével elemzem az innovatív kapcsolóelemek globális viselkedését.

3. A gerendakísérlet [3]

Ebben a fejezetben bemutatom a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végzett gerendakísérleteket.

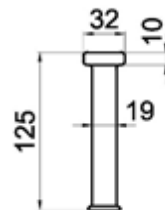
3.1 A gerendák bemutatása

A kísérlethez az alábbi globális geometriával tervezték meg a nyolc darab gerendát:

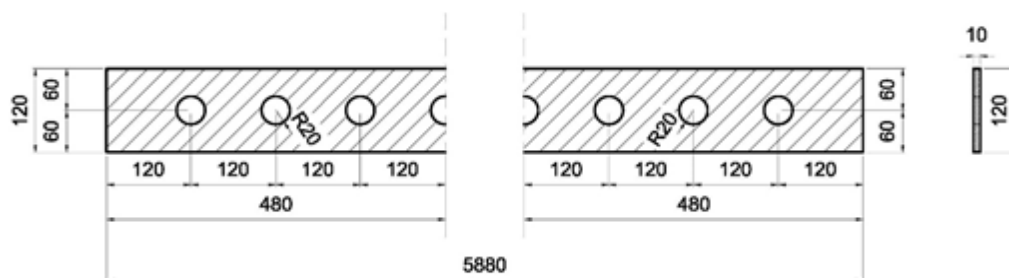
- fesztáv 5,8 m,
- gerenda teljes hossza 6,0 m.
- acél szelvény hengerelt IPE 400,
- vasbeton lemez szélessége 50 cm,
- vasbeton lemez vastagsága 20 cm,
- vasbeton lemez alsó és felső vasalással ellátva,
- acélanyag minősége S355,
- az alkalmazott betonosztály C-35/45-XC1-16-F2,
- A betonacélok minősége a hossz-és nyírási vasalás esetében is S500B.

A vizsgálat során a gerendákat az alábbi kapcsolattípusokkal tervezték meg:

- S-A: Csapos kialakítás (3. ábra),
- S-B: Hagyományos perfobond, zárt furat (4. ábra),
- S-C: Hagyományos perfobond, nyitott furat (5. ábra),
- S-D: Y-perfobond (6. ábra),
- S-E: Fecskefarkas perfobond, zárt furat (7. ábra),
- S-F: Fecskefarkas perfobond, nyitott furat (8. ábra),
- S-G: Trapéz perfobond, zárt furat (9. ábra),
- S-H: Trapéz perfobond, nyitott furat (10. ábra).

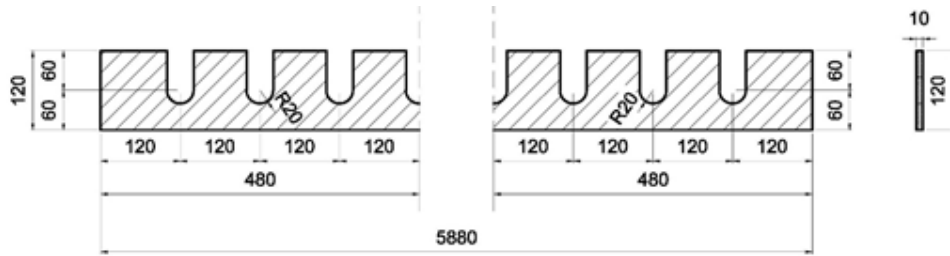


3. ábra: S-A: Fejes csapos kialakítás.

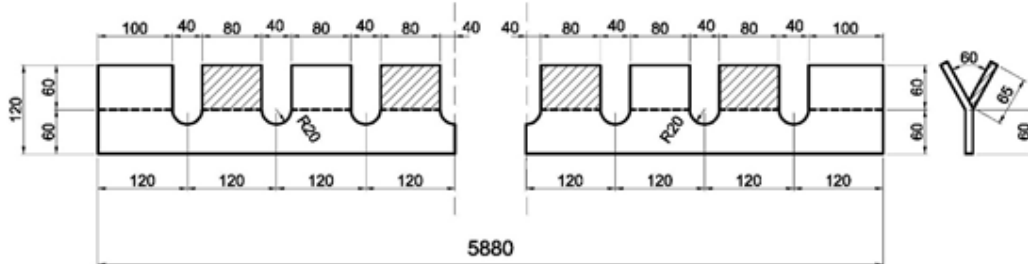


4. ábra: S-B: Hagyományos perfobond, zárt furat.

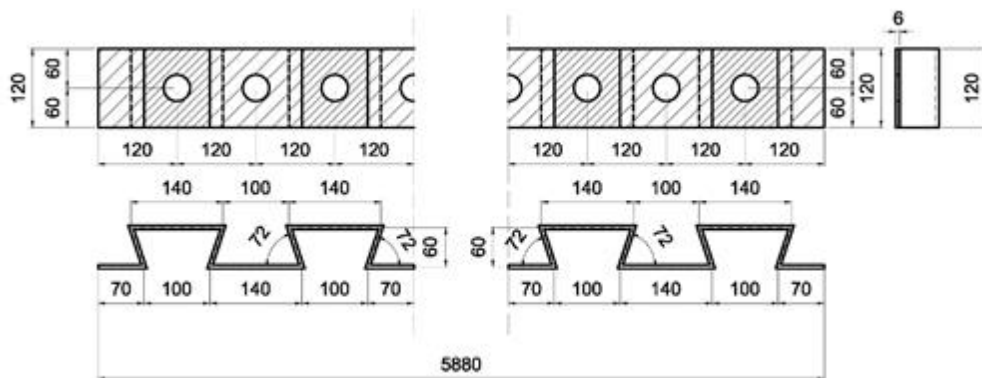
Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



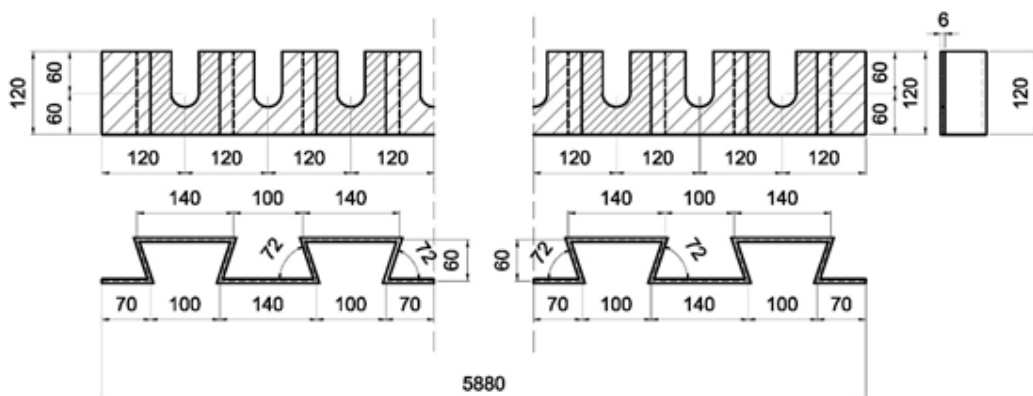
5. ábra: S-C: Hagyományos perfobond, nyitott furat.



6. ábra: S-D: Y- perfobond.

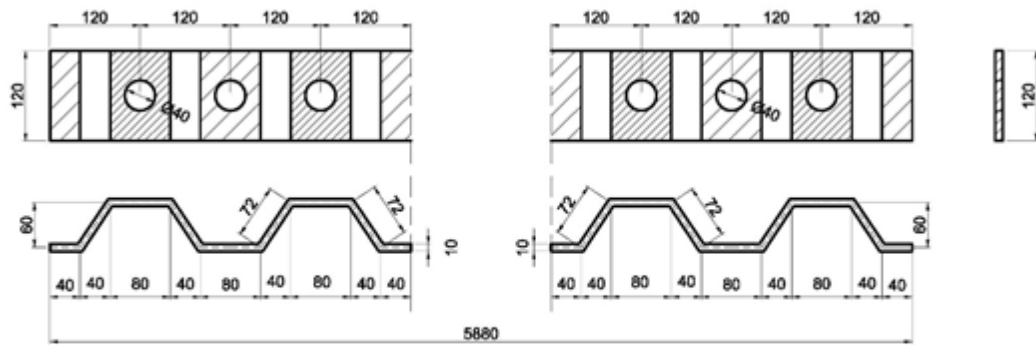


7. ábra: S-E: Fecskefarkas perfobond, zárt furat.

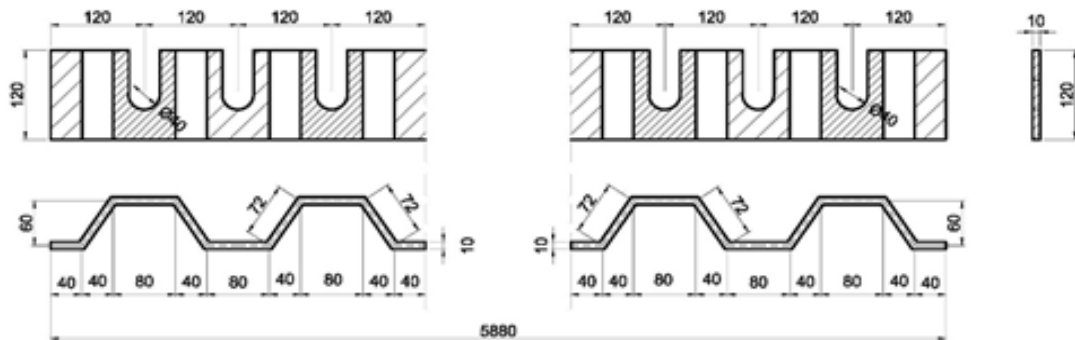


8. ábra: S-F: Fecskefarkas perfobond, nyitott furat.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

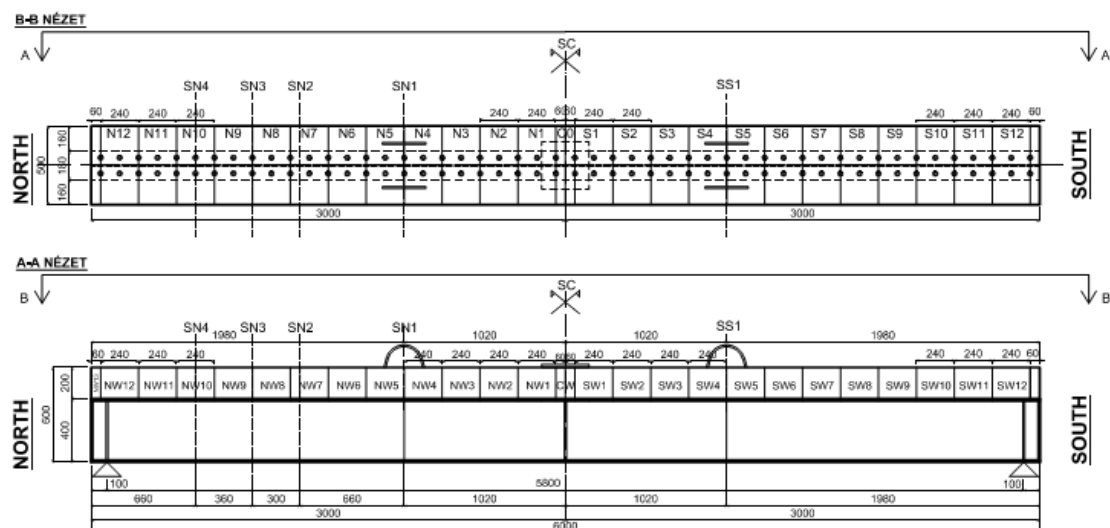


9. ábra: S-G: Trapéz perfobond, zárt furat.



10. ábra: S-H: Trapéz perfobond, nyitott furat.

A gerenda egyik végét „Északi”-(N=North), másik végét „Déli”-oldalnak (S=South) nevezték. A különböző oldalak egyértelmű megkülönböztetése miatt beszélünk „nyugat” és „keleti” oldalról (W=West, E=East). A gerenda oldalainak azonosítására szolgáló jelrendszert a 11. ábra illusztrálja. A betonövön a nyírt kapcsolóelemek kiosztásához illeszkedő raszterhálót helyeztek el, melynek segítségével a repedéseképek pontosabb felvétele vált lehetővé.



11. ábra: A gerenda azonosító jelrendszere.

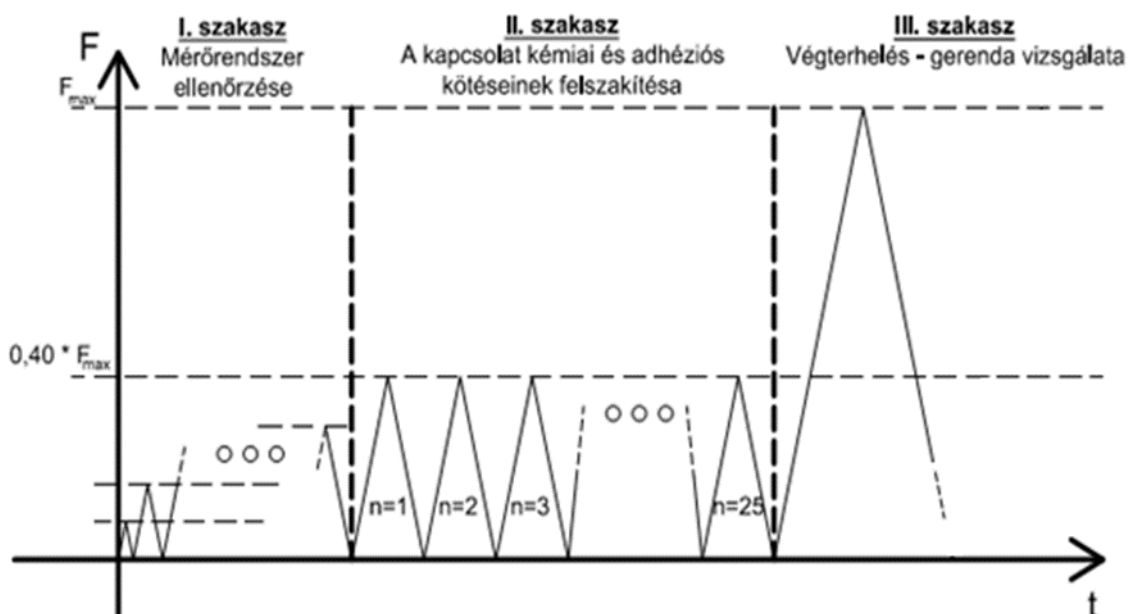
3.2 A kísérlet bemutatása

Az öszvér gerendákat kéttámaszúan alakították ki és hárompontos hajlító vizsgálatot végeztek rajta, ahogyan azt az Eurocode javasolja. Ugyanakkor a szabvány nem ad utasítást a gerendakísérletek végrehajtására a nyírt kapcsolóelemek vizsgálatakor, csak a kinyomókísérletre.

Az Eurocode a következő javaslatot teszi kinyomókísérletre [17], melyek közül a terheléstörténetre vonatkozó szabályokat a gerendakísérleteknél is betartották, melyek:

1. Először a gerendát a várható tönkremenetelt okozó terhelő erő 40%-val kell megterhelni, majd 25 alkalommal (ciklussal) újra terhelni a várható tönkremenetelt okozó terhelő erő 5-40%-val a beton és az cél határfelületén a kémiai vagy adhéziós kötés felszakítására.
2. A tönkremenetelig történő terhelés sebességét úgy kell meghatározni, hogy a képlékeny alakváltozások kialakulására legyen idő. A terhelési sebesség maximális értékét 4 mm/perc értékben határozták meg.
3. A hosszirányú megcsúszást a beton és az acél között folyamatosan kell mérni, az egyes ciklusokban és a terhelési folyamat alatt. A tönkremeneteli folyamat alatt a megcsúszást legalább addig kell mérni, míg a teher minimum 20%-kal esik a maximális teherszint alá.
4. Vizsgálni kell a beton és az acél határfelületén a két szerkezeti elem elválását.

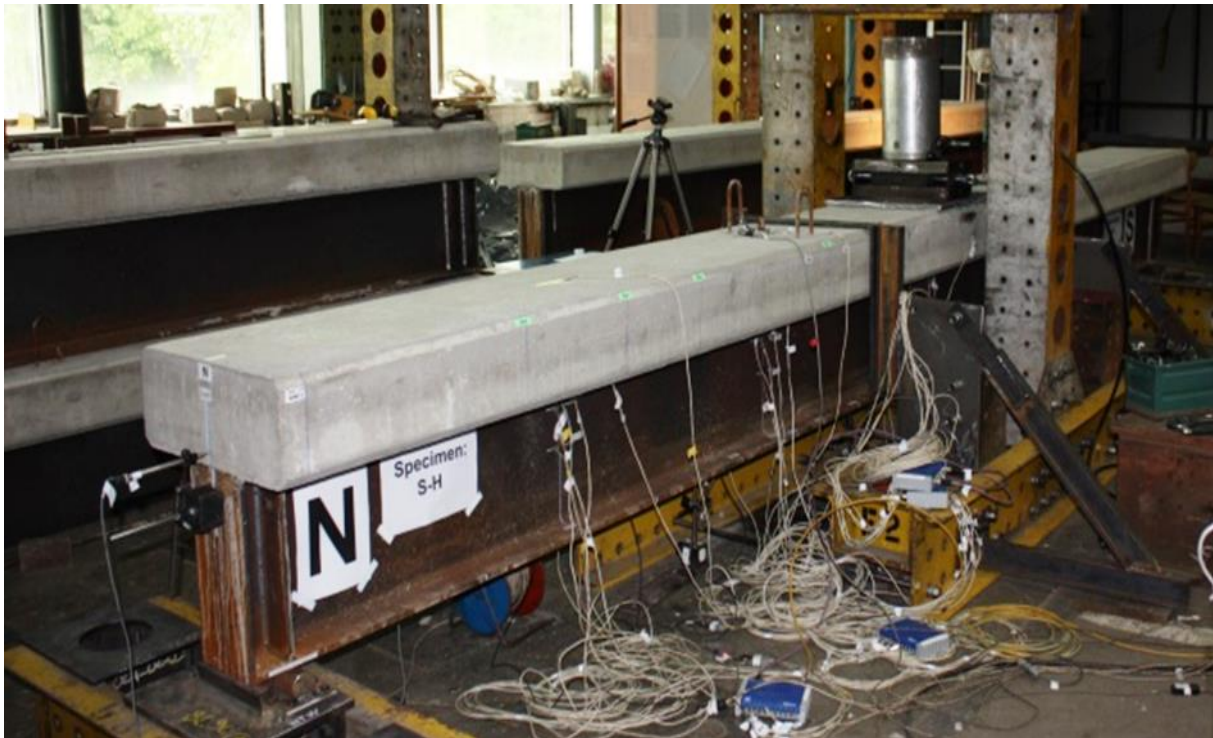
Kísérletekben a várható teherbírás 40%-ának elérésig 50 kN-os teherlépcsőkben haladtak. Minden egész 50 kN-os teherszinten elvégezték a gerenda tehermentesítését. A 40%-os szint elérése után 25 cikluson keresztül végezték a le- illetve felterhelést, ügyelve a terhelési sebesség kvázi konstans szinten tartására. A 25. ciklus után a gerendát a tönkremenetelig terhelték. A terheléstörténetet a 12. ábra mutatja.



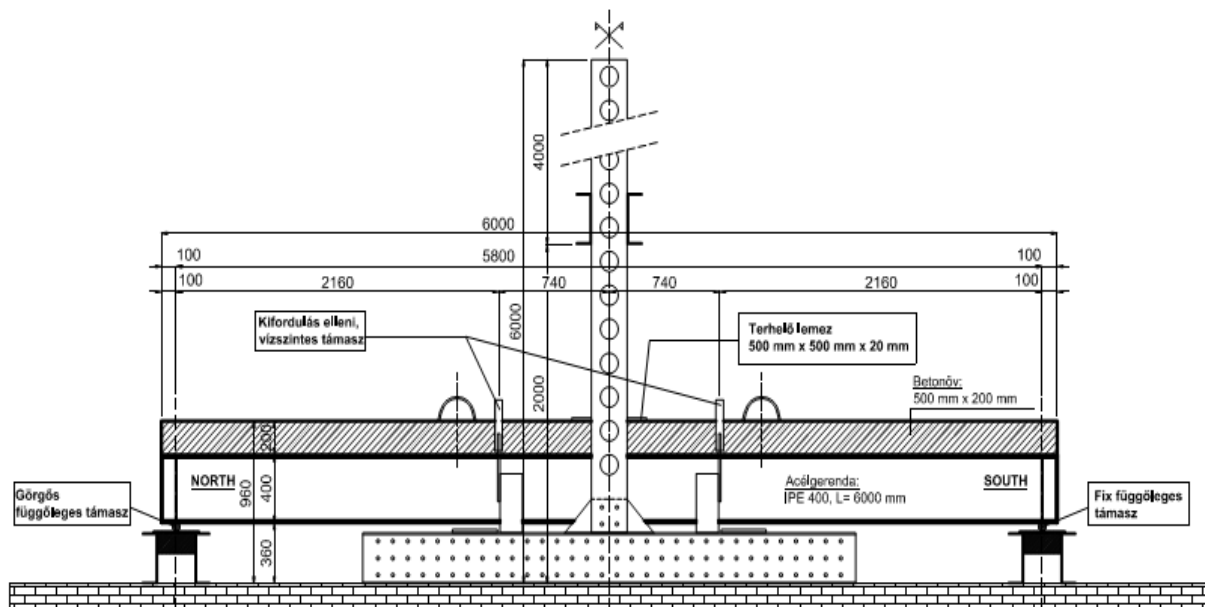
12. ábra: Terheléstörténet.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

Az acél-beton öszvér gerenda próbatesteket a 13. ábrán bemutatott speciális kialakítású terhelő keret segítségével terheltek. A terhelő keret fő méreteit, a terhelő erő elhelyezkedését és a támaszok helyeit a 14. ábra mutatja be.



13. ábra: A terhelő keretbe helyezett gerenda.



14. ábra: Terhelő keret kialakítása.

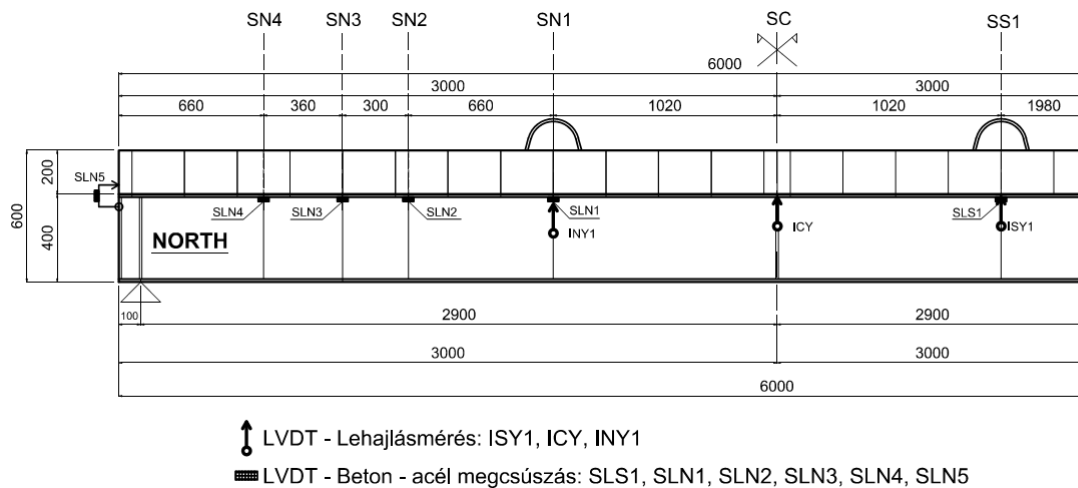
3.3 Elmozdulásmérő műszerek és nyúlásmérő bélyegek elrendezése

Az öszvérgerenda próbatestek műszertervét a 15. ábra szemlélteti. Próbatestenként 3-3 ponton mérték a gerendák globális elmozdulását, valamint 6 ponton a betonöv és acélgerenda közötti relatív elmozdulást.

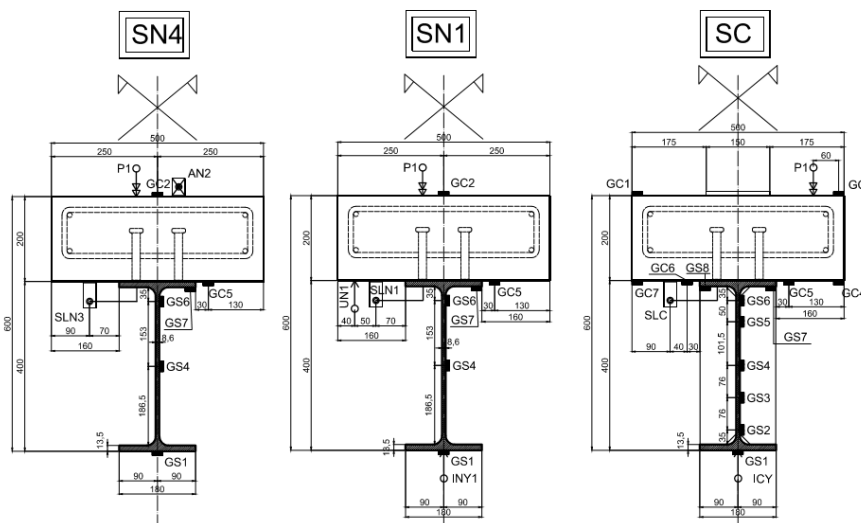
A kísérletek során három ponton mérték a gerenda lehajlását +/- 100 mm méréstartományú LVDT induktív údadókkal a középső, és attól mintegy 1000-1000 mm-re fekvő keresztmetszetekben.

Az acélgerenda felső öve és a betonöv közötti relatív megcsúszást induktív tapintó údadókkal mérték összesen öt „északi”, illetve egy „déli” keresztmetszetben. Az adókat minden esetben a gerenda „keleti” oldalára rögzítették.

A gerendákon három keresztmetszetben lettek elhelyezve nyúlásmérő bélyegek a 16. ábra szerint.



15. ábra: Az öszvér gerenda műszerterve.



16. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése.

4. Teherbírások számítása

Első lépésben meghatározom a gerendák folyási határához tartozó terhelő erő nagyságát rugalmas alapon, majd a képlékeny tönkremenetelhez tartozó terhelő erőt.

Az kísérletek során meghatározták az egyes gerendákból származó acél és beton próbatestek szilárdságát. Mivel mindkét esetben az eredmények csak kis mértékben tértek el egymástól, így az egyszerűség kedvéért a mért szilárdságok számtani közepét vettem, és ezt alkalmaztam az összes gerendatípusnál. Az anyagvizsgálati eredmények alapján számított acél átlagos folyáshatára $f_y' = 410,63$ MPa, a beton mért hengerszilárdságainak átlaga $f_c' = 51,4$ MPa.

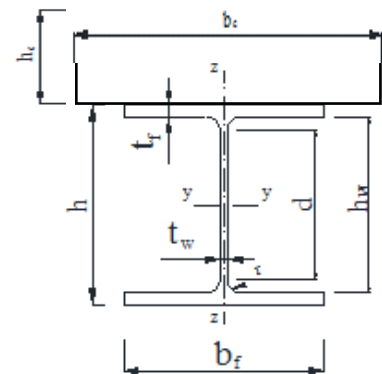
4.1 Kiindulási adatok

Anyagjellemzők:

- Acél rugalmassági modulusa: $E_a = 210000$ MPa
- Beton rövid idejű terhekhez tartozó rugalmassági modulusa: $E_{cm} = 32000$ MPa
- Rugalmassági modulusok aránya: $n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} = 6,5625$
- Kísérletből meghatározott acél folyáshatára: $f_y' = 410,63$ MPa
- Kísérletből meghatározott beton hengerszilárdsága: $f_c' = 51,4$ MPa

Geometriai adatok a 17. ábra alapján:

- Fesztáv: $L = 5,8$ m
- Szelvény: IPE400
- $h = 400$ mm
- $b_f = 180$ mm
- $h_w = 373$ mm
- $A_v = 42,69$ cm²
- $h_c = 200$ mm
- $A_a = 84,46$ cm²
- $t_f = 13,5$ mm
- $t_w = 8,6$ mm
- $I_a = 23130$ cm⁴
- $b_c = 500$ mm



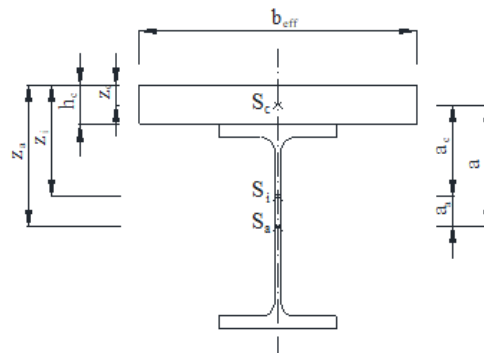
17. ábra: Méretek.

4.2 Rugalmas számítás

Ideális keresztmetszeti tényezők (18. ábra):

18. ábra: Keresztmetszeti tényezők.

- $z_a = \frac{h}{2} + h_c = 40 \text{ cm}$
- $z_c = \frac{h_c}{2} = 10 \text{ cm}$
- $A_c = h_c \cdot b_c = 1000 \text{ cm}^2$
- $A_i = \frac{A_c}{n_0} + A_a = \frac{1000}{6,5625} + 84,46 = 236,841 \text{ cm}^2$
- $z_i = \left(A_a \cdot z_a + \frac{A_c}{n_0} \cdot z_c \right) / A_i = \left(84,46 \cdot 40 + \frac{1000}{6,5625} \cdot 10 \right) / 236,841 = 20,698 \text{ cm}$
- $a_a = z_a - z_i = 40 - 20,698 = 19,302 \text{ cm}$
- $a_c = z_i - z_c = 20,698 - 10 = 10,698 \text{ cm}$
- $I_c = \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} = \frac{50 \cdot 20^3}{12} = 33333,33 \text{ cm}^4$
- $I_i = I_a + A_a \cdot a_a^2 + \frac{I_c}{n_0} + \frac{A_c}{n_0} \cdot a_c^2 = 23130 + 84,46 \cdot 19,302^2 + \frac{33333,33}{6,5625} + \frac{1000}{6,5625} \cdot 10,698^2 = 77115,965 \text{ cm}^4$
- $z_{max} = h + h_c - z_i = 40 + 20 - 20,698 = 39,302 \text{ cm}$



19. ábra: Keresztmetszeti tényezők.

A folyáshoz tartozó terhelő erő:

$$F_{El} = \frac{4 \cdot f_y' \cdot I_i}{z_{max} \cdot L} = \frac{4 \cdot 41,063 \cdot 77115,965}{39,302 \cdot 580} = 555,67 \text{ kN}$$

Mivel azonosak a gerendák geometriai és anyagminőségi tulajdonságai, a számított folyáshatárhoz tartozó terhelő erő minden gerendatípusnál megegyezik.

4.3 Képlékeny számítás

Képlékeny alapon feltételezzük, hogy az acélban $f_y' = 410,63$ MPa folyási feszültség, a betonban $0,85 \cdot f_c' = 43,69$ MPa nyomófeszültség keletkezik.

A képlékeny semleges tengely helyzetének meghatározása a következő módon történik.

Effektív szélesség meghatározása:

- $L_e = 0,85 \cdot L = 0,85 \cdot 5,8 = 4,93$ m
- $b_e = \frac{L_e}{8} = \frac{4,93}{8} = 0,616$ m
- $b_{eff} = \min(2 \cdot b_e, b_c) = b_c = 50$ cm

Ellenállások:

- Beton lemez ellenállása: $R_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot h_c \cdot b_{eff} = 4369$ kN
- Acél szelvény ellenállása: $R_a = A_a \cdot f_y' = 3468,2$ kN
- Acél szelvény felső és alsó öv ellenállása: $R_f = b_f \cdot t_f \cdot f_y' = 997,84$ kN
- Acél teljes gerincének ellenállása: $R_w = R_a - 2 \cdot R_f = 1472,53$ kN

Mivel $R_c = 4369$ kN $>$ $R_a = 3468,2$ kN, a képlékeny semleges tengely a betonban van.

Ezek alapján a képlékeny semleges tengely helyzetét a következőképpen kell meghatározni (20. ábra):

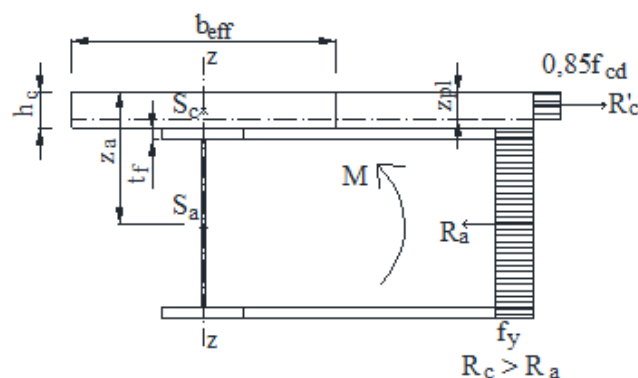
- $z_a = 40$ cm
- $R_a - z_{pl,1} \cdot b_{eff} \cdot 0,85 \cdot f_{cd} = 0$, ebből $z_{pl,1} = 15,876$ cm
- $R_{c,1} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot z_{pl} \cdot b_{eff} = 0,85 \cdot 5,14 \cdot 15,876 \cdot 50 = 3468$ kN

Képlékeny nyomatéki teherbírás:

$$M_{pl} = R_a \cdot \left(z_a - \frac{z_{pl,1}}{2} \right) = 3468 \cdot \left(40 - \frac{15,876}{2} \right) = 1111,969 \text{ kNm}$$

Teherbíráshoz tartozó terhelő erő:

$$F_{pl} = \frac{M_{pl}}{L/4} = 776,88 \text{ kN}$$



20. ábra: Semleges tengely a betonban.

4.4 A képlékeny töréshez tartozó teher számított és mért értékei

Mivel a gerendák geometriai és anyagminőségi tulajdonságai megegyeznek, a számított képlékeny tönkremenetelt létrehozó terhelő erő minden gerendatípusnál megegyezik. A kísérlet során meghatározott képlékeny töréshez tartozó terhek az 1. táblázatban láthatók.

Gerenda típusa	F_{pl}	F_{max}	$F_{ed,pl}/F_{max}$
	kN	kN	%
S-A	766,88	797,36	96,18%
S-B	766,88	804,77	95,29%
S-C	766,88	834,97	91,84%
S-D	766,88	787,54	97,38%
S-E	766,88	802,75	95,53%
S-F	766,88	805,84	95,16%
S-G	766,88	851,12	90,10%

1. táblázat: Képlékeny töréshez tartozó teher számított és mért értékei.

Mint azt láthatjuk, a számítás alapján közelítőleg meghatározott teherbírás alacsonyabb, mint a tényleges, mindegyik esetben marad tartalék a tartóban.

5. Az elmozdulások kiértékelése

5.1 A kiértékelés módszere

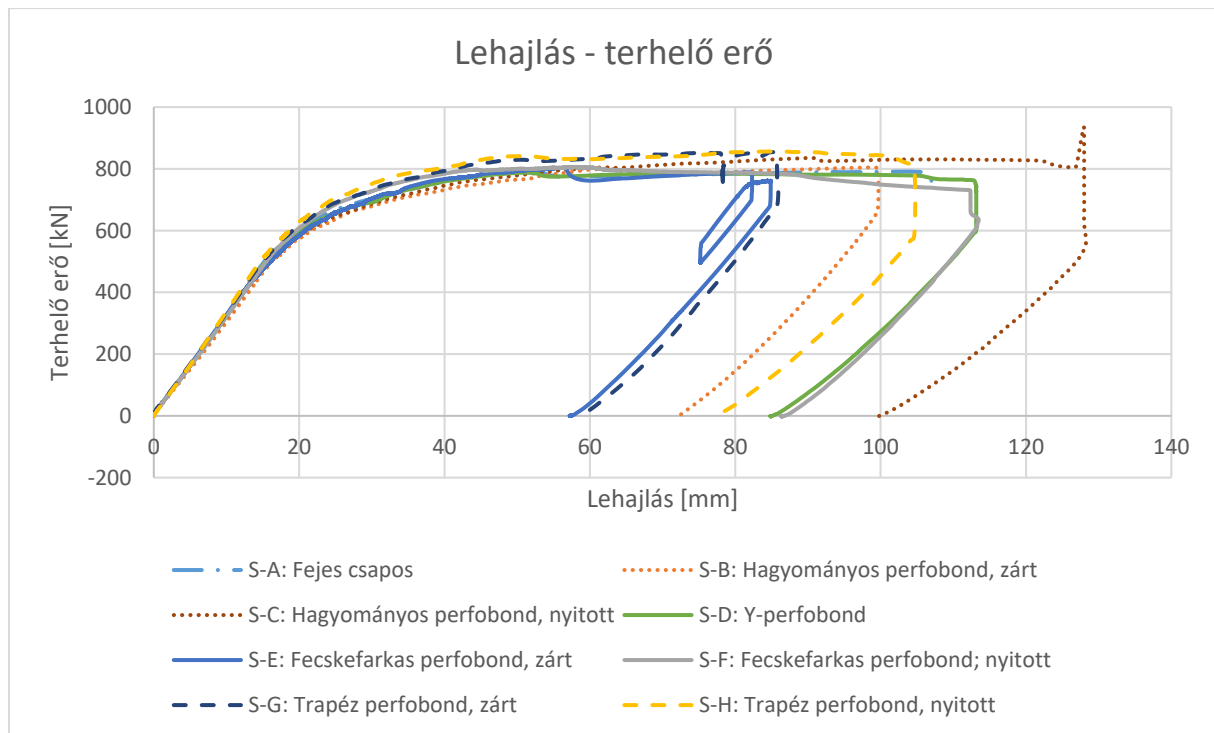
A kísérletből közvetlenül meghatározott adatok tartalmazzák a kémiai vagy adhézios kötés felszakítására történő ciklusokat, melyek a kapcsolóelemek vizsgálatát nem befolyásolják, így az egyszerűség kedvéért ezeket a ciklusokat elhagytam a kiértékelésekből, a 12. ábra szerinti III. szakaszban mért eredményeit használtam a kiértékeléshez. A görbét az origóba transzformáltam.

A nyers kísérleti eredmények adathalmazának kitisztítása után diagramon ábrázoltam a gerenda középső keresztmetszetében mért lehajlást a terhelő erő függvényében, valamint öt keresztmetszetben (SN4, SN3, SN2, SN1, SLS1 – lásd 15. ábra) a relatív megcsúszást a terhelő erő függvényében, így ezek szolgálnak alapjául az elemzéseimnek.

5.2 Függőleges lehajlás vizsgálata

A lehajlásvizsgálat a középső keresztmetszetben történt, közvetlenül az erőbevitel alatt. Először vizsgáljuk egy összesített diagramon az összes gerenda lehajlás – terhelő erő görbéjét (21. ábra). A gerendákat teljes nyírt kapcsolattal tervezték meg a kísérleteket megelőzően a korábban elvégzett kinyomókísérletekből származó nyírt kapcsolat ellenállása alapján. Ezért a teherbírása az összes gerendának közel azonos. A kísérlet igazolta, hogy az összes kapcsolóelemtípussal kialakul a teljes együttlőződés a beton és az acél között, elérve ezzel a gerenda maximális képlékeny nyomatóki ellenállást.

A kísérlet során a gerendákat a biztonságosnak ítélt lehajlási szintig terhelték (~100 mm), ennél nagyobb eltolódások mellett bizonytalanná vált a gerenda globális mozgása, a megtámasztások varratai felszakadtak, ezért balesetvédelmi okokból leállították a kísérleteket. Azonban ebből a 80-120 mm-es maximális lehajlásból is látszik, hogy a legnagyobb teher elérése után nem következik be jelentős ellenállás csökkenés, a gerenda megtartja az elért maximális teherszintet, az alakváltozások pedig a középső keresztmetszetben kialakuló képlékeny csuklóba koncentrálnak.



21. ábra: Összesített terhelés - lehajlás diagram.

A lehajlás kiértékeléséből áttekintést kapunk a különféle innovatív kapcsolóelemekkel kialakított gerenda globális viselkedésére, a pontosabb vizsgálathoz azonban az öszvér gerenda több keresztmetszetében mért relatív megcsúszások adatait vettem figyelembe.

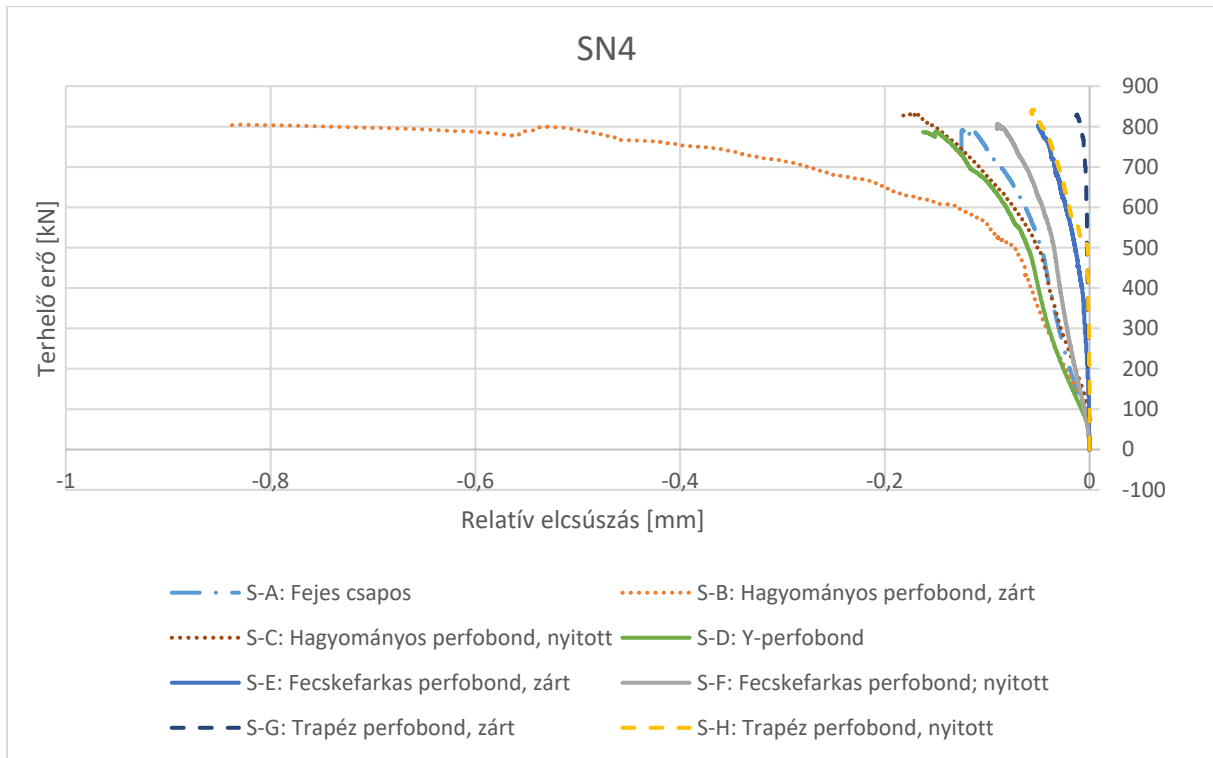
5.3 Relatív elcsúszások vizsgálata

A gerendakísérlet során mérték az acél és beton határfelületén a két szerkezeti elem egymáshoz viszonyított relatív elcsúszását. A relatív elcsúszásokat a terhelő erő függvényében ábrázoltam diagramon, a kiértékelt eredményekből az alábbi fejezetekben összefoglalt megállapításokat vontam le.

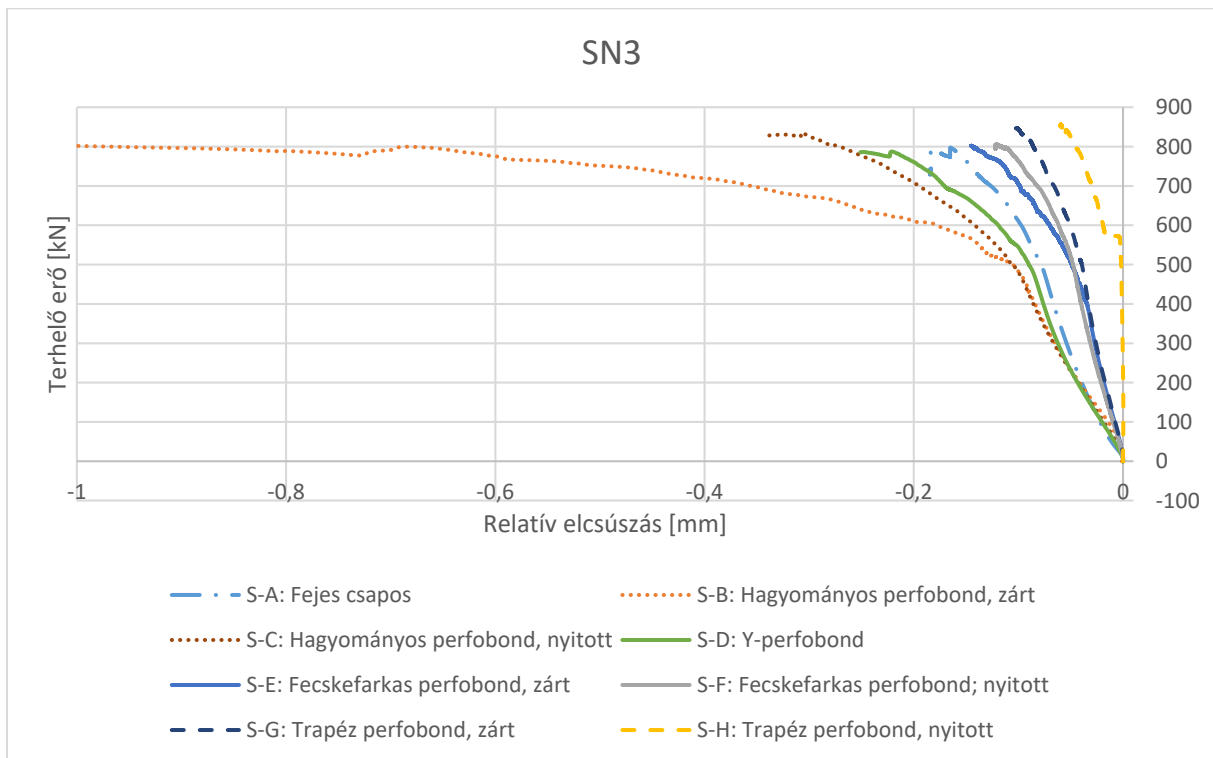
5.3.1 Összesített relatív elcsúszások

Az egyes keresztmetszetekben (SN4, SN3, SN2, SN1, SS1 – lásd 15. ábra) mért relatív elcsúszásokat először összesítő diagramok segítségével vizsgáltam, melyek a 22-26. ábrákon láthatók.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

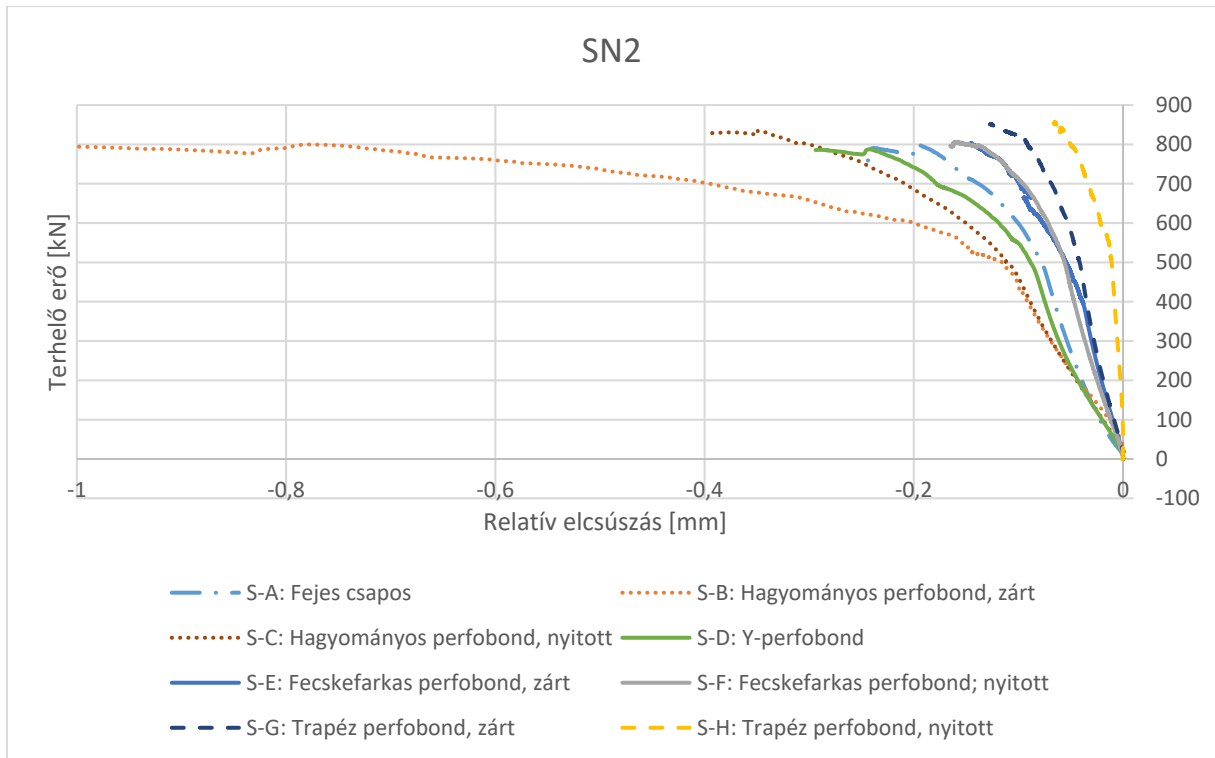


22. ábra: SN4, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.

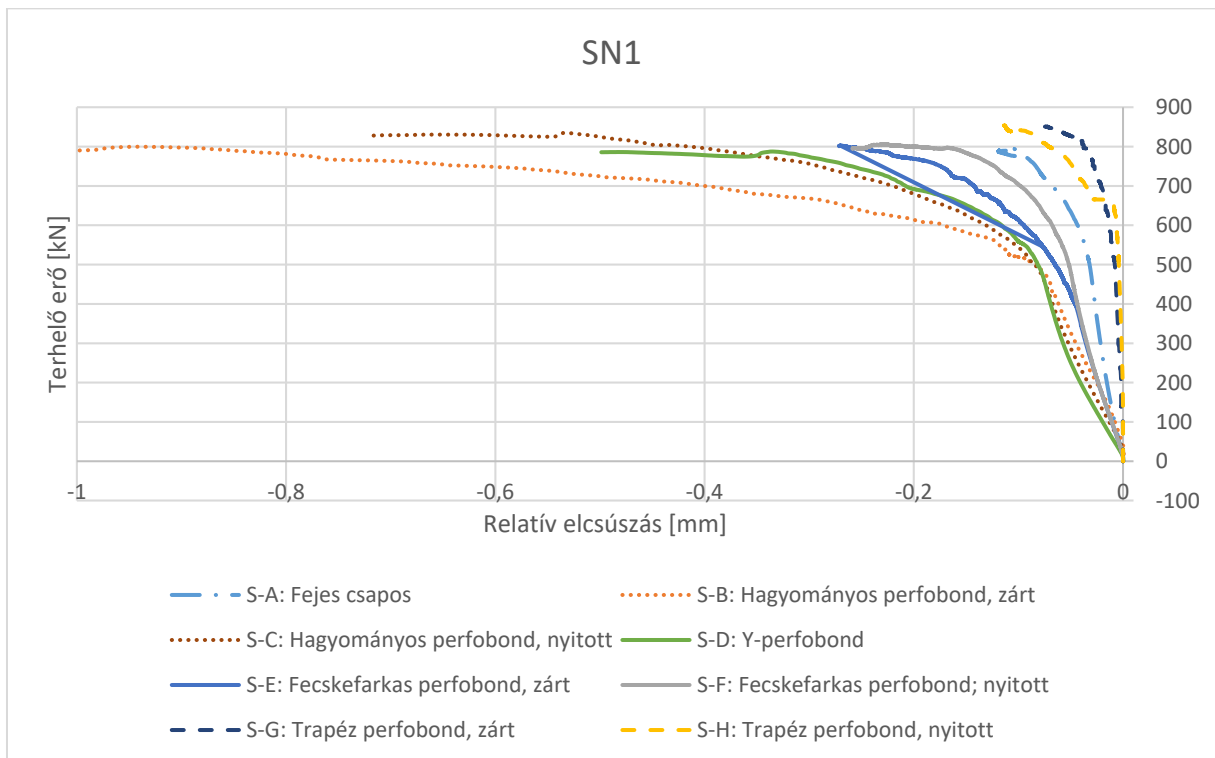


23. ábra: SN3, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

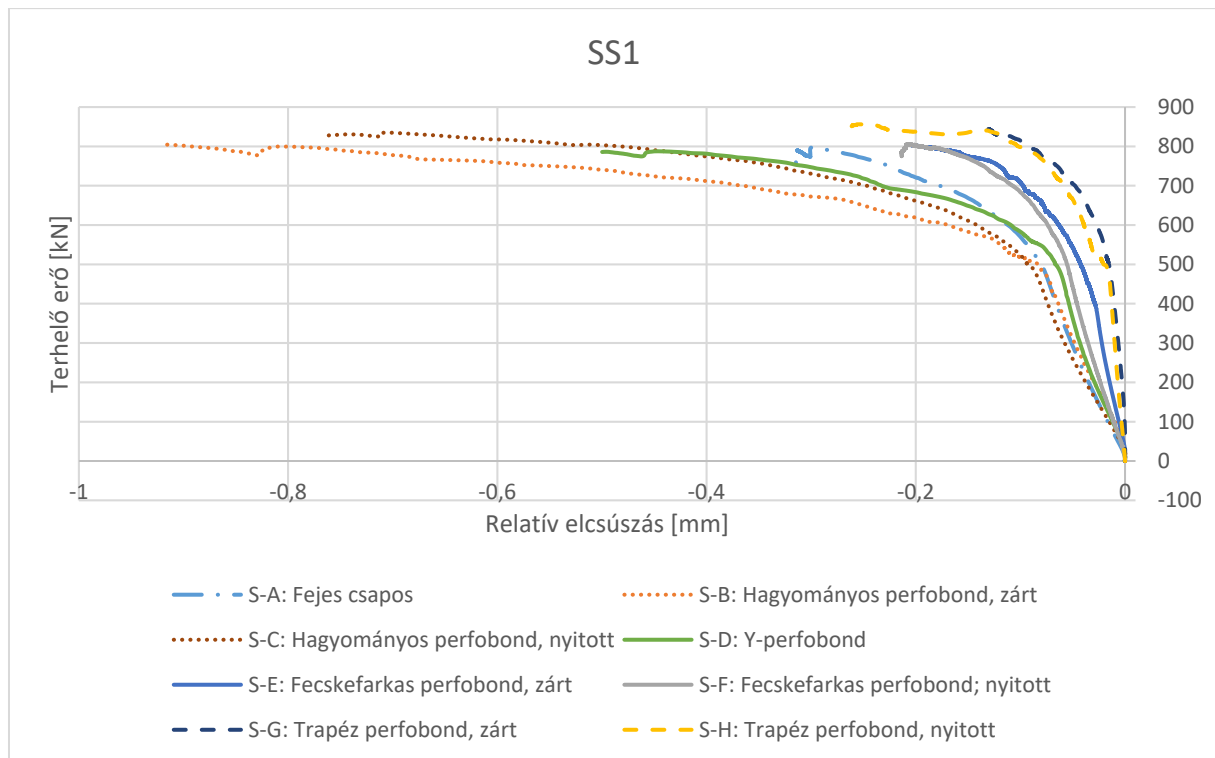


24. ábra: SN2, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.



25. ábra: SN1, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



26. ábra: SS1, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.

Jól megfigyelhető, hogy a hasonló kialakítású kapcsolóelemek viselkedése hasonló tendenciát mutat, nem okoz jelentős változást a viselkedésben a nyitott vagy zárt furatos kialakítás.

A zárt kialakítású hagyományos perfobond kapcsolat alakváltozó képessége az összes keresztmetszetben jelentősen eltér a többi kapcsolattípustól, ennél a típusnál figyelhető meg a legnagyobb elcsúszás. A nyitott párja hasonlóan viselkedik, csak kisebb a végső megcsúszása.

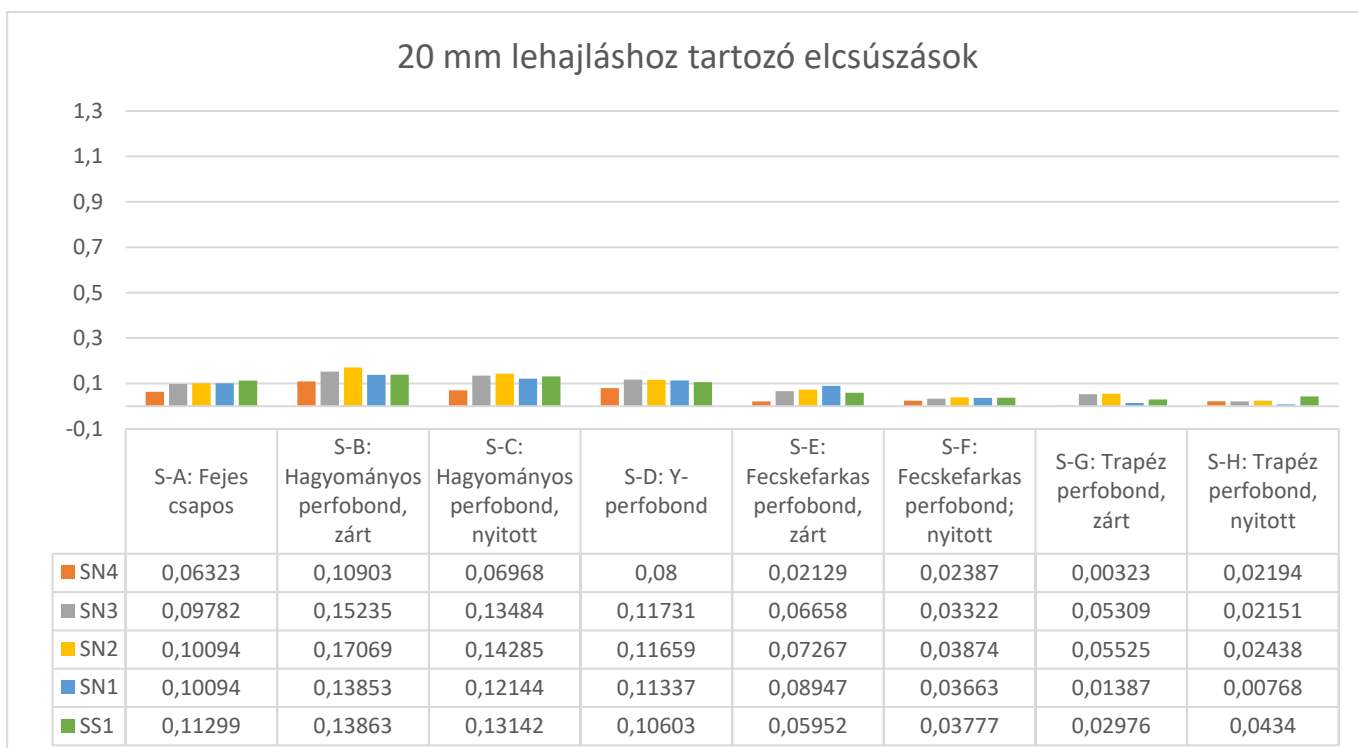
A legnagyobb merevséggel itt is a trapéz kialakítású perfobond, majd a fecskefarkas kötés rendelkezik. A nyitott kialakítású trapéz perfobond merevsége, alakváltozó képessége és görbéjének a jellege alig változik az egyes keresztmetszetekben. A zárt kialakítású trapéz perfobond viselkedése a szélső (SN4) és a középső keresztmetszetekben (SN1 és SLS1) megegyezik a nyitott párjával, a köztes keresztmetszetekben a mérések alapján kisebb merevséggel, és nagyobb végső alakváltozással rendelkezik, mint párja.

Megfigyelhető az összes próbatestnél, hogy a gerendán a szélső keresztmetszettől a középső keresztmetszet felé haladva (tehát SN4-felől SN1 felé), ugyanakkora tehernél fokozatosan növekszik a relatív megcsúszás. Ez a viselkedés nem követi az elméletileg elvárt viselkedést. Ezt az ellentmondást további kísérletekkel vagy a jelen kísérleti eredmények alapján kidolgozott végesesemes modellek segítségével lehet további vizsgálatok során tisztázni.

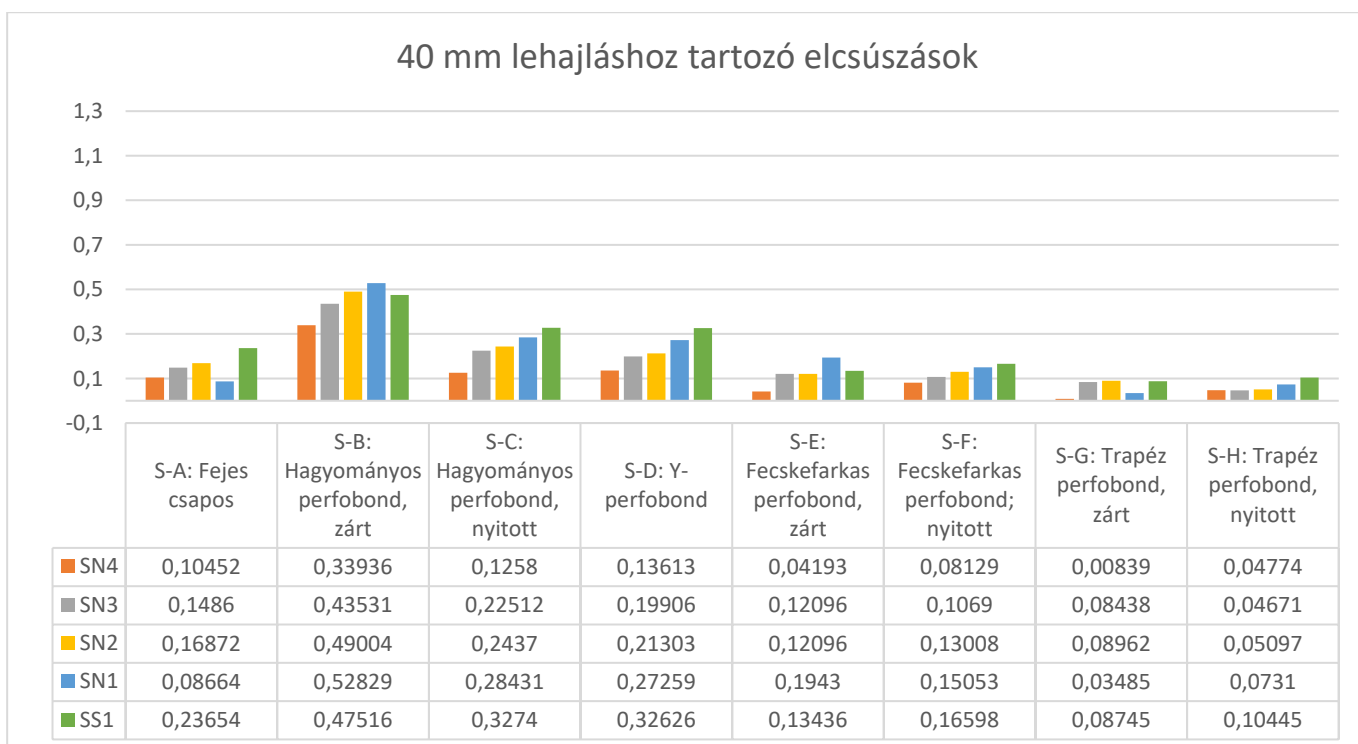
Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított ösvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

5.3.2 Relatív elcsúszások különböző nagyságú lehajlások esetén

Meghatároztam a gerenda 20, 40, 60 és 80 mm-es globális lehajláshoz tartozó elcsúszásokat az SN4, SN3, SN3, SN1 és SS1 keresztmetszetben (27-30. ábrák).

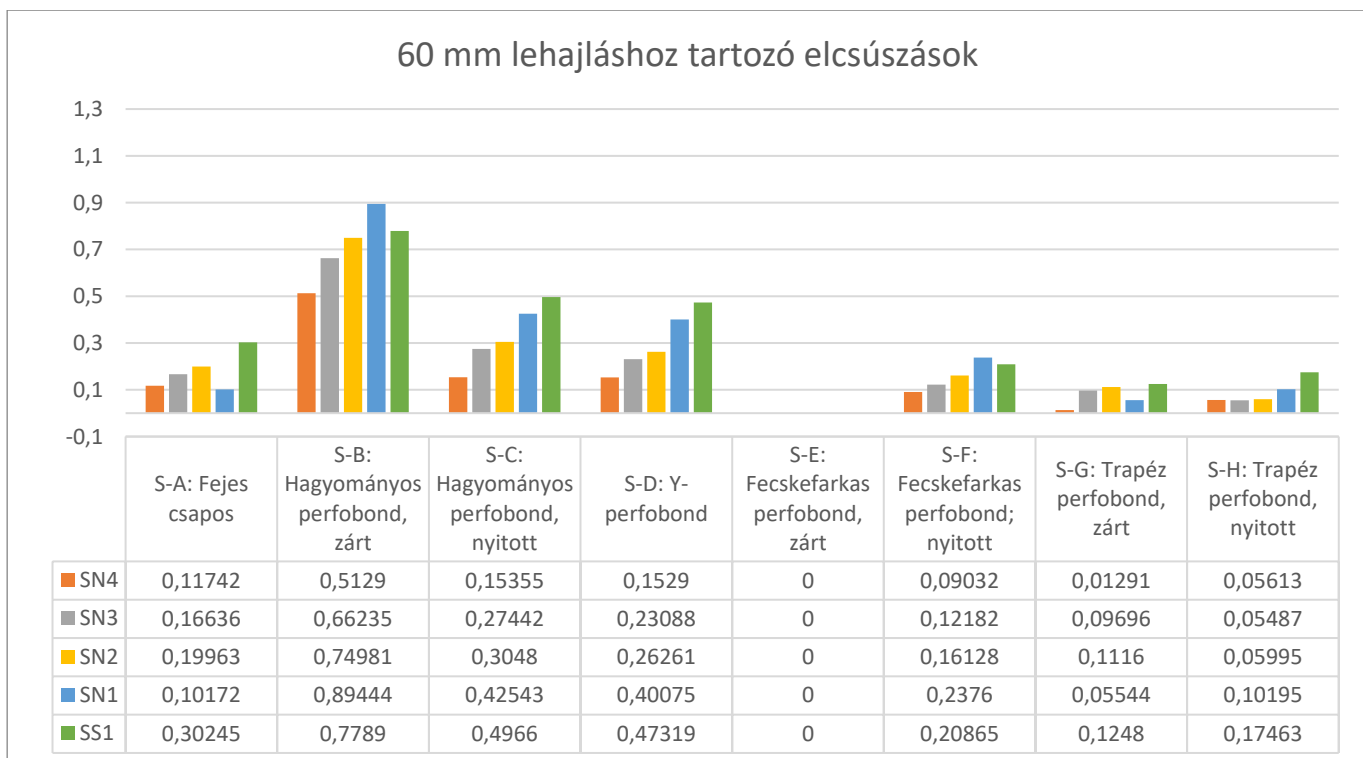


27. ábra: 20 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.

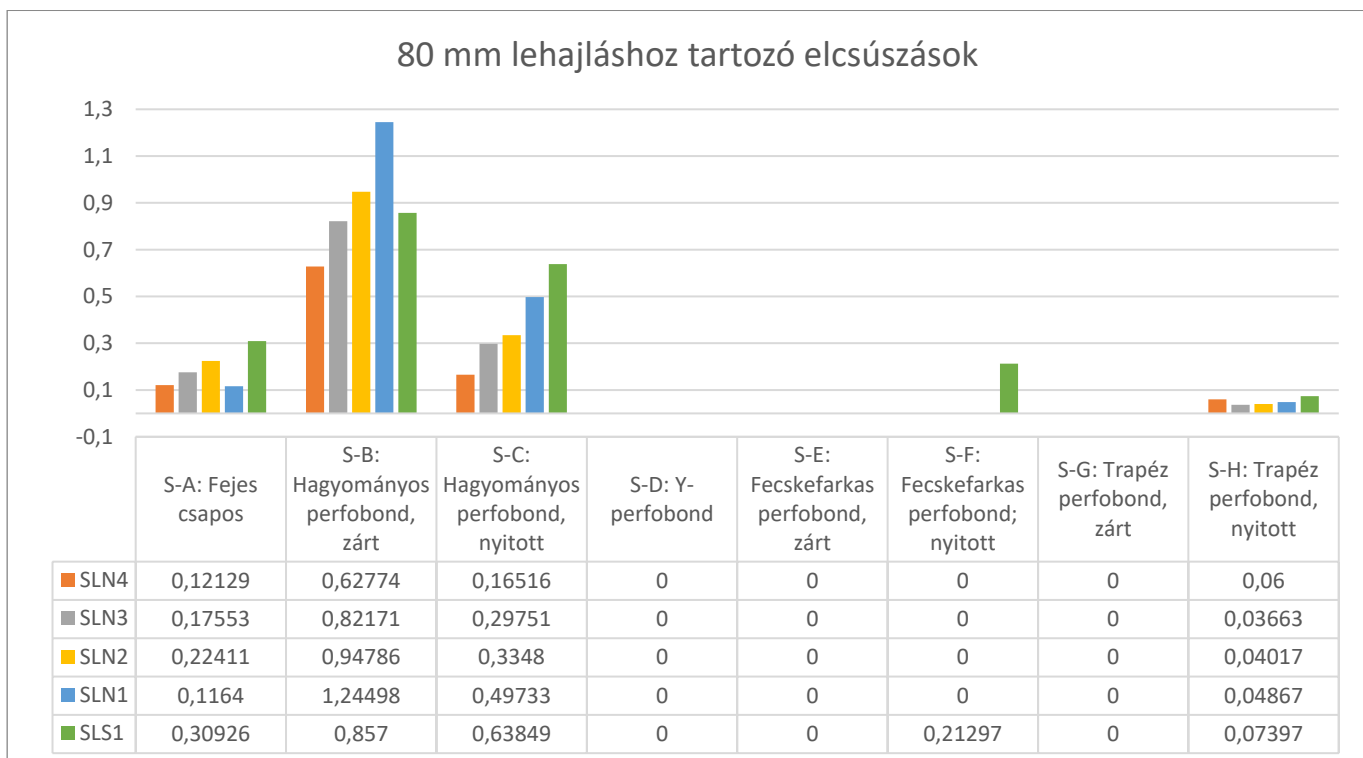


28. ábra: 40 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



29. ábra: 60 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.



30. ábra: 80 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.

Ahogy az előzőekben is láthattuk, jelen esetben is megfigyelhető, hogy a hagyományos perfobond kötésekhez tartoznak a nagyobb elcsúszások, a háromdimenziós kötések

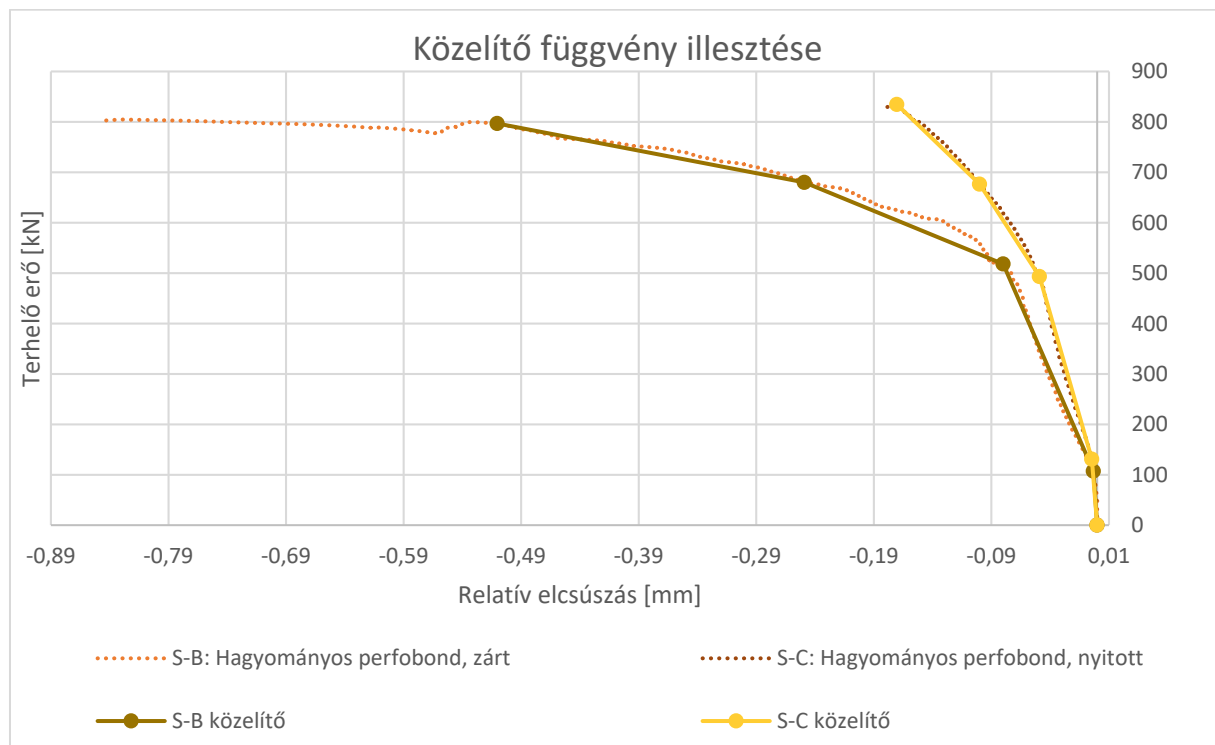
Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

(fecskefarkas és Y-perfobond) merevebben viselkednek, és a trapéz perfobondoknak a legkisebb az elcsúszása.

Mint azt már korábban is megfigyelhettük, a gerenda közepe felé haladva egyre nagyobbak a megcsúszások.

5.3.3 Közelítő függvények meghatározása

A vizsgálataimhoz az egyes kiértékelési paraméterek meghatározásához egyszerűsítettem a valós terhelő erő – relatív elcsúszás függvényeket. A tényleges görbéket egyenesekből álló poligonális függvénnyel helyettesítettem: minden görbét legalább három szakaszra bontottam a 31. ábra alapján.



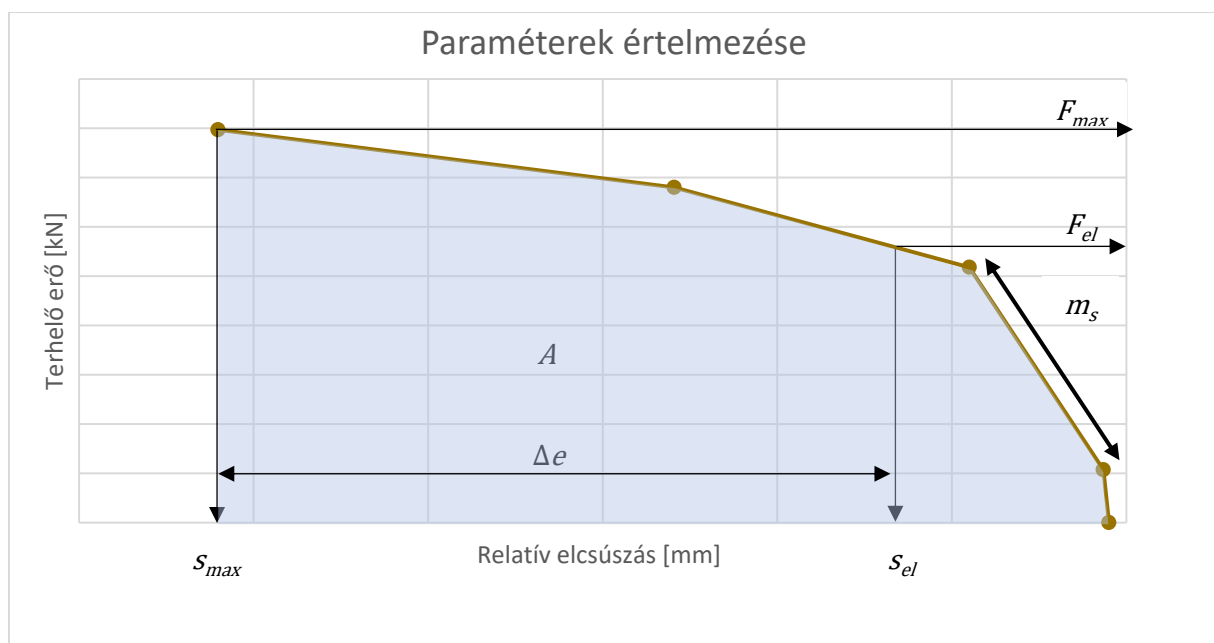
31. ábra: Közelítő függvény illesztése.

5.3.4 Kísérleti paraméterek definiálása

Az egyszerűsített függvények segítségével a következő paramétereket definiáltam, melyek értelmezését a 32. ábra mutatja:

- F_{max} : a legnagyobb terhelő erő [kN],
- e_{max} : a legnagyobb lehajlás [mm],
- s_{max} : a legnagyobb relatív elcsúszás [mm],
- F_{el} : a folyáshatárhoz tartozó terhelő erő [kN],
- e_{el} : a folyáshatárhoz tartozó terhelő erő hatására létrejött lehajlás [mm],
- s_{el} : a folyáshatárhoz tartozó terhelő erő hatására létrejött relatív elcsúszás [mm],
- Δ : duktilitás,
- m_s : kezdeti merevség (közelítő görbe második szakaszának a meredeksége),
- A : közelítő függvény alatti terület.

A terhelő erőket (F_{max} , F_{el}), a lehajlásokat (e_{max} , e_{el}) és a relatív elcsúszásokat (s_{max} , s_{el}) az eredeti értékekből választottam ki, növelve ezzel a pontosságot; míg a közelítő görbéről a kezdeti merevséget (m_s), és a függvény alatti területet (A) határoztam meg.



32. ábra: Paraméterek értelmezése.

A folyáshatárhoz tartozó terhelő erő meghatározását a 4.2 fejezetben ismertettem. Mivel azonosak a gerendák geometriai és anyagminőségi tulajdonságai, a számított folyáshatárhoz tartozó terhelő erő minden gerendatípusnál megegyezik.

A duktilitást (Δ) a legnagyobb teherhez tartozó, és a folyáshatárhoz tartozó relatív elcsúszások különbsége és a folyáshatárhoz tartozó relatív elcsúszás hányadosaként értelmeztem a következő módon (paraméterek értelmezését lásd a 32. ábrán):

$$\Delta = \frac{\Delta e}{s_{el}} = \frac{s_{max} - s_{el}}{s_{el}}$$

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

Ezen paraméterek definiálásával lehetőség nyílik az egyes innovatív kapcsolóelemekkel kialakított gerendák kísérleti eredményeinek számszerű összehasonlítására.

5.3.5 Az SN4 keresztmetszet relatív elcsúszásai

A számszerű kiértékelésre az SN4-es keresztmetszetet választottam.

A 5.3.4 fejezetben bemutatott paramétereket, a leírt módon minden gerendánál meghatároztam, és táblázatba foglaltam. A gerendák típusait a 3.1 fejezetben bemutattam, itt csak ismétlésként, a jobb áttekinthetőség érdekében jelenítem meg:

- S-A: Csapos kialakítás,
- S-B: Hagyományos perfobond, zárt furat,
- S-C: Hagyományos perfobond, nyitott furat,
- S-D: Y-perfobond,
- S-E: Fecskefarkas perfobond, zárt furat,
- S-F: Fecskefarkas perfobond, nyitott furat,
- S-G: Trapéz perfobond, zárt furat,
- S-H: Trapéz perfobond, nyitott furat.

Az 2. táblázat a meghatározott számértékeket tartalmazza. A jobb átláthatóság érdekében fajlagosan is megadtam az értékeket a 3. táblázat szerint, melynél a viszonyítás a fejes csapos kialakítású gerenda.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

SLN4									
Megnevezés	Mértékegység	Gerendák típusa							
		S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
F_{max}	kN	797,4	804,8	835,0	787,5	802,7	805,8	851,1	856,2
e_{max}	mm	111,3	99,7	128,3	113,2	84,9	113,5	85,9	104,8
S_{max}	mm	0,129	0,843	0,182	0,163	0,050	0,090	0,014	0,061
F_{el}	kN	555,67	555,67	555,67	555,67	555,67	555,67	555,67	555,67
e_{el}	mm	19,4	18,6	17,9	17,4	18,1	17,2	16,8	16,4
S_{el}	mm	0,083	0,097	0,061	0,069	0,018	0,039	0,003	0,011
Δ	mm/mm	0,563	7,656	2,000	1,355	1,786	1,295	4,504	4,529
ms		9667	5350	8135	6206	24809	13481	221456	151945
A		59,7	551,2	202,8	191,9	25,1	46,3	12,0	37,8

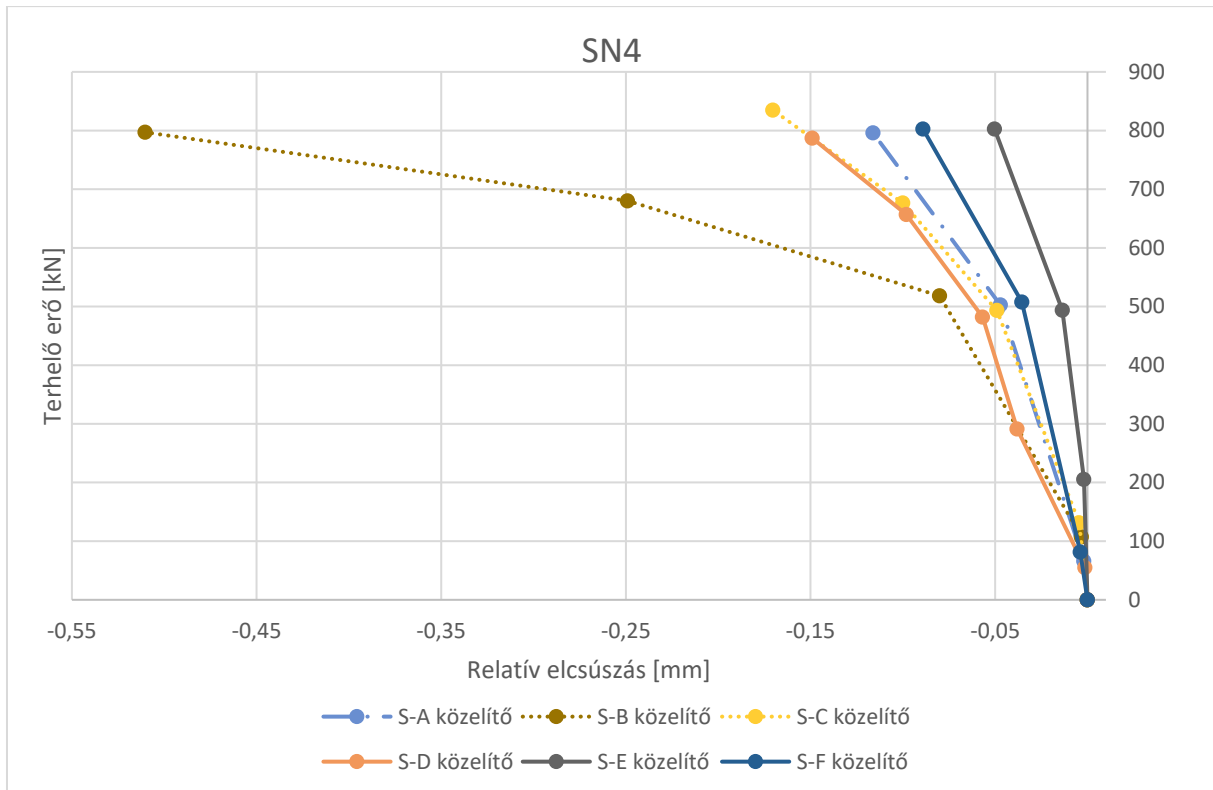
2. táblázat: SN4 relatív elcsúszások összehasonlítása számszerűen.

SLN4-S-A-ra fajlagosítva									
Megnevezés	Mértékegység	Gerendák típusa							
		S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
F_{max}	kN	1,00	1,01	1,05	0,99	1,01	1,01	1,07	1,07
e_{max}	mm	1,00	0,90	1,15	1,02	0,76	1,02	0,77	0,94
S_{max}	mm	1,00	6,53	1,41	1,26	0,39	0,70	0,11	0,47
F_{el}	kN	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
e_{el}	mm	1,00	0,96	0,92	0,90	0,93	0,89	0,86	0,84
S_{el}	mm	1,00	1,18	0,73	0,84	0,22	0,48	0,03	0,13
Δ	mm/mm	1,00	13,61	3,56	2,41	3,17	2,30	8,01	8,05
ms		1,00	0,55	0,84	0,64	2,57	1,39	22,91	15,72
A		1,00	9,24	3,40	3,22	0,42	0,78	0,20	0,63

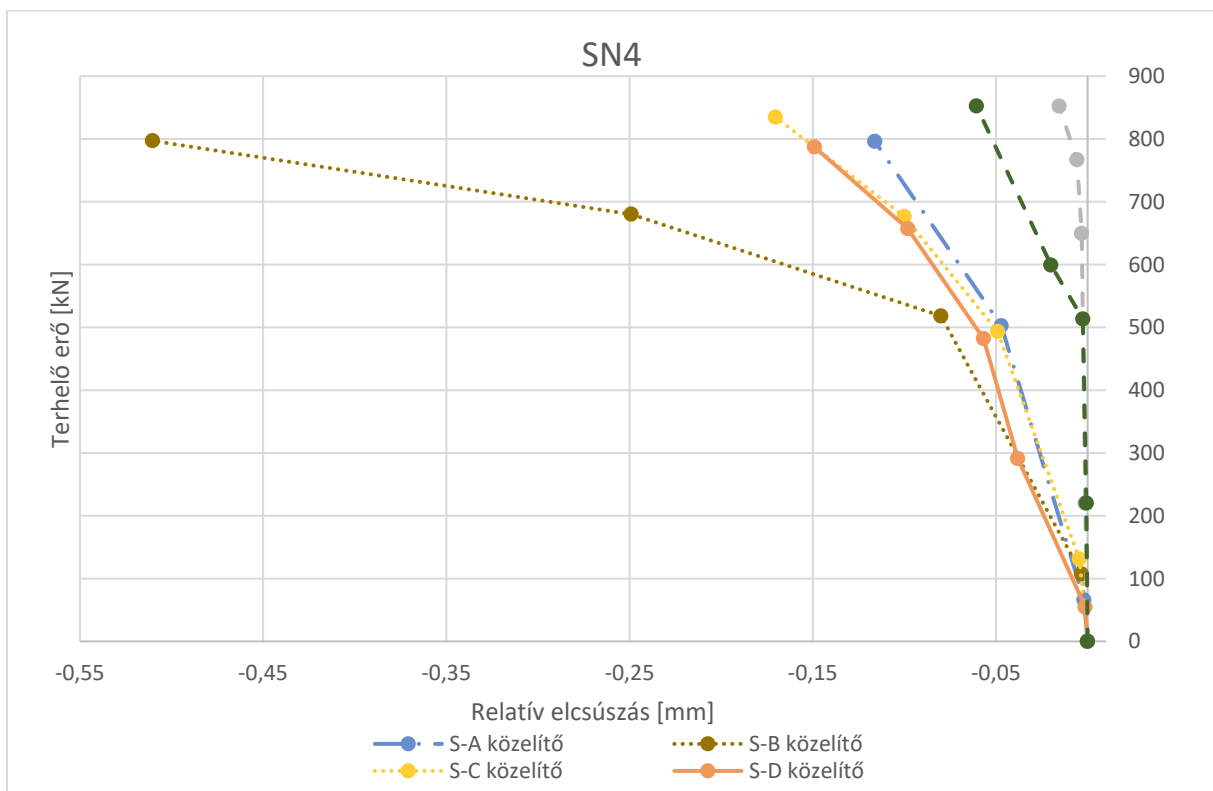
3. táblázat: SN4 relatív elcsúszások összehasonlítása fajlagosan.

A 33. és 34. ábrák szemléltetik az egyes gerendatípusok terhelő erő – relatív elcsúszás közelítő görbéit.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



33. ábra: Fejes csapos, fecskéfarkas és Y-perfobond közelítő görbéi.



34. ábra Fejes csapos, hagyományos és trapéz perfobond közelítő görbéi.

A táblázatokat és a diagramokat részletesen elemezve, összevetve a korábban megállapított jellemzőkkel a következőkben foglalom össze a kiértékelés eredményeit.

Az összes gerenda tönkremenetele közel azonos teherszinten következett be, elérve az öszvér gerenda képlékeny nyomatéki ellenállást.

A folyási feszültséghez tartozó terhelő erő a 5.3.4 fejezetben ismertetett tényezők miatt az összes típusnál azonos $F_{el} = 555,67$ kN. Ehhez a teherhez tartozó lehajlás a fejes csapos kialakítású gerenda esetében ($e_{el} = 38,7$ mm) a legnagyobb. A folyási feszültséghez tartozó relatív elcsúszás értéke ($s_{el} = 0,083$ mm) hasonló a hagyományos és Y-perfobondhoz tartozó elcsúszás értékével, de lényegesen nagyobb, mint a fecskefarkas és trapézos kialakítású perfobondok elcsúszása. A duktilitása a csapos típusú gerendának a legkisebb, kezdeti merevsége viszont nagyobb, mint a hagyományos és az Y-perfobond. Ugyanezekhez a típusokhoz képest a görbe alatti terület viszonylag kevés, amely azt jelenti, hogy kicsi az alakváltozó képesség.

A hagyományos nyitott és zárt kialakítású perfobond kapcsolattípusok kezdetben teljesen hasonlóak a fejes csapos kialakításhoz, de viszonylag alacsony teherszintnél, mint azt már korábban is megfigyelhettük a zárt típusú perfobond eltér a párjától, és ugyan kisebb teherszintnél következik be a tönkremenetele ($F_{max} = 804,8$ kN), lényegesen nagyobb a duktilitása ($\Delta = 7,497$), és a görbe alatti területe ($A = 551,2$). A görbe alakja is jól szemlélteti, hogy a zárt típusú perfobondnak van a legnagyobb alakváltozó képessége. A relatív elcsúszások is ezt a tendenciát követik: a csapos kialakításhoz képest több mint hatszor akkora a tönkremenetelhez tartozó elcsúszás ($s_{max} = 0,843$ mm).

A hagyományos perfobond nyitott változatához tartozik az összes körül a legnagyobb lehajlás ($e_{max} = 128,0$ mm). A kezdeti merevsége nagyobb, mint zárt párjának, viszont sokkal kisebb duktilitás, és görbe alatti terület tartozik hozzá.

Az Y-perfobond hasonlóan viselkedik a fejes csapos kialakításhoz, viszont nagyobb alakváltozó képességgel (duktilitással és görbe alatti területtel), de valamivel kisebb merevséggel rendelkezik.

A fecskefarkas perfobond kapcsolóelemek fajtái hasonlóan viselkednek, a zárt furatos típusnak nagyobb a kezdeti merevsége és duktilitása a párjához képest, viszont a nyitott furatos változatnak nagyobb relatív elcsúszásai, és görbe alatti területe van.

A trapéz perfobondokhoz tartozik a legnagyobb kezdeti merevség (15-23-szor nagyobb a fejes csapos merevségénél) és a legkisebb görbe alatti terület. A korábbiakhoz hasonlóan a zárt típus merevebb, ide kisebb alakváltozás és nagyobb merevség tartozik, mint a nyitott fajtához. A duktilitásuk is lényegesen nagyobb a többihez képest ($\Delta = 4,5$), leszámítva a zárt típusú hagyományos perfobondot, aminek a legnagyobb.

5.4 Az elmozdulások elemzésének összegzése

A fejezetben láthattuk a fejes csapos, és az innovatív kapcsolóelemekkel kialakított gerendák viselkedését a terhelő erő – lehajlás és terhelő erő – relatív elcsúszás diagramjain. A tényleges görbékből már szemléletből megállapíthattuk az egyes típusok tulajdonságait, de a közelítő görbék, és paraméterek bevezetésével pontosabb elemzést hajthattunk végre. Részletesen az SN4 helyen elemeztem az egyes paraméterek értékeit, jellemezve ezáltal az innovatív kapcsolóelemeket.

Megállapíthatjuk tehát, hogy a viszonyításként vizsgált fejes csapos kapcsolóelemtől lényegesen kedvezőbb alakváltozási tulajdonsággal rendelkeznek az új típusú kapcsolatok. A hagyományos perfobond típusok jelentősen nagyobb alakváltozó képességgel rendelkeznek, melynek lehetséges oka, hogy az egyenes lemez felhasítja a betont. Ettől eltérően a trapéz perfobond kialakítású gerendák sokkal merevebb viselkedést és nagyobb teherbírást mutatnak. Az Y- perfobond és fecskefarkas perfobondok az átmenetet képezik az előbb említett kettő között.

6. A feszültségek kiértékelése

6.1 A kiértékelés módszere

A 3.3 fejezetben bemutatott az egyes műszerek elhelyezését, mely szerint három keresztmetszetben helyeztek el nyúlásmérő bélyegeket. A jelenlegi tanulmányban csak a középső keresztmetszetben elhelyezett 12 (8 az acélban és 4 a betonban) nyúlásmérő bélyeg eredményeit dolgoztam fel. A 5. fejezethez hasonlóan itt is megjelennek a mért adatokban a kémiai vagy adhéziós kötés felszakítására szolgáló ciklusok, melyet itt is kivettem a vizsgálat alól, és az értékeket transzformáltam az origóba.

A kísérletek során a vizsgált pont megnyúlását mérték. Ebből úgy kaptam meg a feszültséget, hogy a megfelelő szakaszon érvényes rugalmassági modulussal szoroztam be, melyet a későbbiekben részletezek (6.2.1 fejezet). Az Eurocode által javasolt módszerekkel kiszámoltam a nyúlásmérő bélyegek pontjában a feszültségeket rugalmas, majd képlékeny alapon.

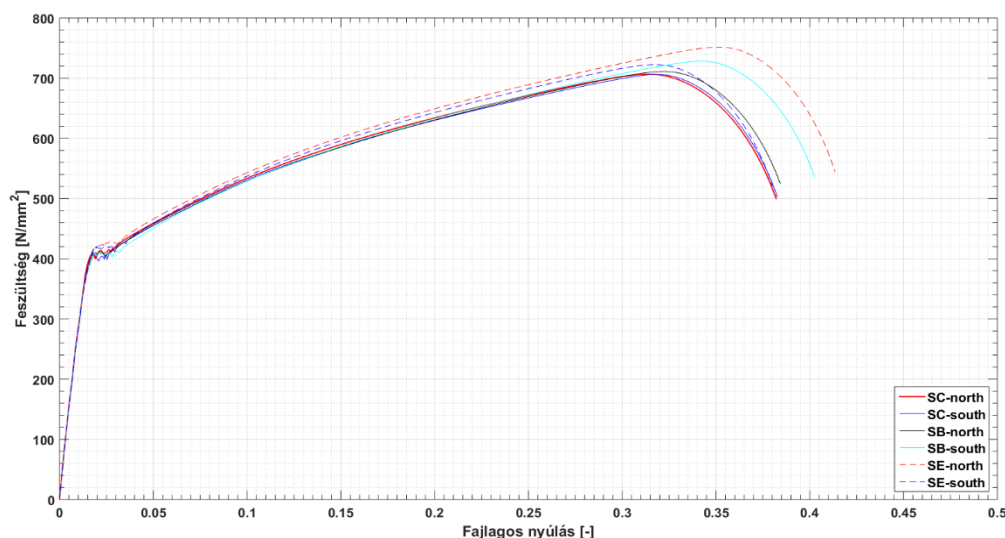
Az így kapott számított és mért értékek összehasonlítása a különféle innovatív kapcsolóelemekkel felszerelt gerendákon az alapja az elemzésem módszerének.

6.2 Mért feszültségek meghatározása

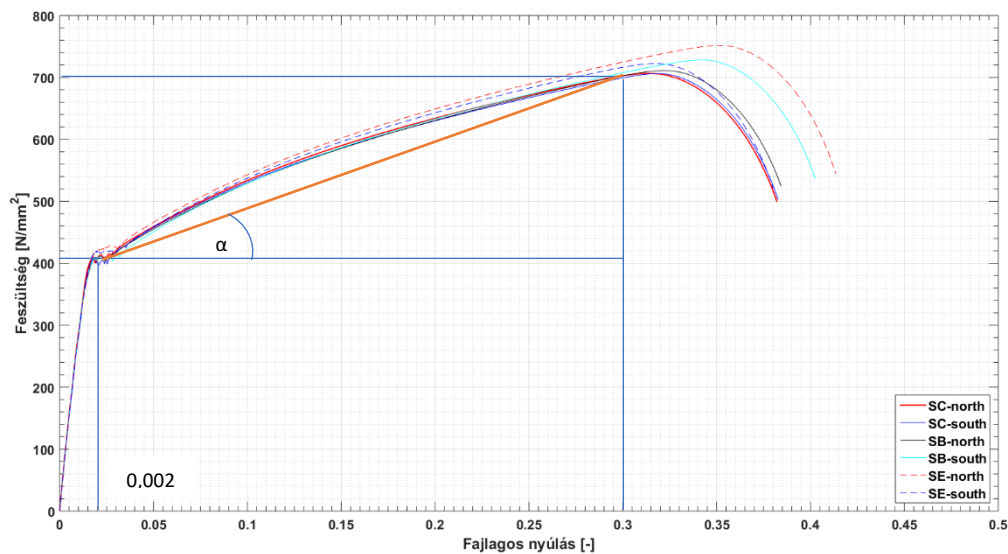
6.2.1 A rugalmassági modulusok meghatározása

A beton esetén rugalmas és képlékeny állapotban is a C35/45 szilárdságú, rövid idejű terhekhez tartozó rugalmassági modulusával $E_{cm} = 32000$ MPa számoltam.

Az acél rugalmassági modulusa a lineárisan rugalmas tartományon $E_a = 210000$ MPa, ami képlékeny tartományban nem alkalmazható. A gerendakísérletek során meghatározták az egyes gerendákhoz tartozó feszültség – fajlagos nyúlás diagramokat, melyeket a 35. ábra mutat. Mivel a különböző próbatestek görbéi képlékeny állapotban közel megegyeznek, azt az egyszerűsítést alkalmaztam, hogy minden gerendára a 36. ábra alapján meghatározott közelítő képlékeny modulusot határoztam meg, melynek értéke: $E_{pl} = 10334,525$ MPa.



35. ábra: A gerendakísérlet során meghatározott feszültség – fajlagos nyúlás diagramok.



$$E_{pl} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{700 - f_y'}{0,3 - 0,002} = \frac{700 - 410,63}{0,3 - 0,002} = 10334,525 \text{ MPa}$$

36. ábra: Képlékeny modulus meghatározása.

6.2.2 Feszültségek előállítása

A kezdeti szakaszon a lineáris viselkedés miatt a Hooke-törvény értelmében a $\sigma = E \cdot \varepsilon$ összefüggést használtam a feszültségek meghatározására. Tehát a lineárisan rugalmas tartományon a mért értékeket megszoroztam az acél részben az acél rugalmassági modulusával, ami $E_a = 210000 \text{ MPa}$, a beton részben pedig a beton rövid idejű terhekhez tartozó rugalmassági modulusával $E_{cm} = 32000 \text{ MPa}$. A beton esetében képlékeny állapotban is így jártam el.

Ahhoz, hogy az acél szempontjából tudjam, hogy a lineárisan rugalmas tartomány meddig tart, rugalmas alapon meghatároztam a folyási feszültséghez tartozó terhelő erőt, és a terheléshez viszonyítottam a mért értékeket. A folyási feszültséghez tartozó terhelő erő, ahogyan már a 4.2 fejezetben is előkerült $F_{el} = 555,67 \text{ kN}$. A pontos számítást rugalmas alapon a 6.3.1 fejezetben részletezem.

Tehát az $F_{el} = 555,67 \text{ kN}$ terhelő erőtől kisebb terhelések esetén a megnyúlásokat az $E_a = 210000 \text{ MPa}$ értékkel szoroztam. Az $F_{el} = 555,67 \text{ kN}$ -nál nagyobb terhelés esetén a folyási feszültséghez ($f_y' = 410,63 \text{ MPa}$) hozzáadtam a közelítő képlékeny modulus ($E_{pl} = 10334,525 \text{ MPa}$) és a mért megnyúlás ($\varepsilon_{mért}$) szorzatát, azaz $\sigma_{pl} = f_y' + E_{pl} \cdot \varepsilon_{mért}$.

6.3 Számított feszültségek meghatározása

6.3.1 Feszültségek meghatározása rugalmas alapon

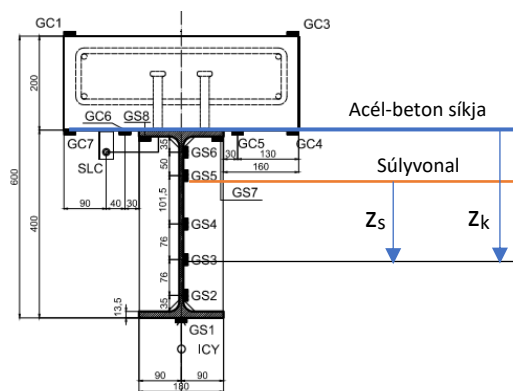
A feszültségek meghatározása az $F_{el} = 555,67$ kN folyáshoz tartozó terhelő erő eléréséig rugalmas alapon történik. A rugalmas számítás folyamatát a 4.2. fejezetben részleteztem. Az ideális keresztmetszet súlypontja az acél felső övében van, a beton felső részétől lefelé $z_i = 20,698$ cm-re.

$$\text{Betonban: } \sigma_{c,k} = \frac{M_{Ed}}{I_i \cdot n_0} \cdot z_s$$

$$\text{Acélban: } \sigma_{s,k} = \frac{M_{Ed}}{I_i} \cdot z_s$$

- M_{Ed} : a terhelő erő hatására létrejövő nyomaték a középső keresztmetszetben
- I_i : az ideális keresztmetszet inercianyomatéka az erős tengelyre
- z_s : a vizsgált pont súlyponttól való távolsága

A feszültségeket táblázatosan számoltam ki az aktuálisan vizsgált típusú gerendánál. Az M_{Ed} -hez tartozó terhelő erő egyik esetben $F = 100$ kN, másik esetben $F = 300$ kN. A feszültségeket azokban a pontokban számoltam, amelyekben elhelyezték a nyúlásmérő bélyegeket, tehát a z_s távolságokat a 37. ábra alapján határoztam meg. A kiértékeléshez azonban nem ezeket a z_s távolságokat használtam fel, hanem a jobb átláthatóság érdekében az acél és beton találkozási síkjától mért távolságokat (z_k), amely értelmezését és értékeit szintén a 37. ábra mutatja.



Bélyeg száma	z_s [cm]	z_k [cm]
SC-GC1-3	20,70	20
SC-GC5-6	0,70	0
SC-GS7-8	0,70	-1,35
SC-GS6	-0,65	-4,85
SC-GS5	-4,15	-9,85
SC-GS4	-9,15	-20
SC-GS3	-19,30	-27,5
SC-GS2	-26,80	-35
SC-GS1	-34,30	-40

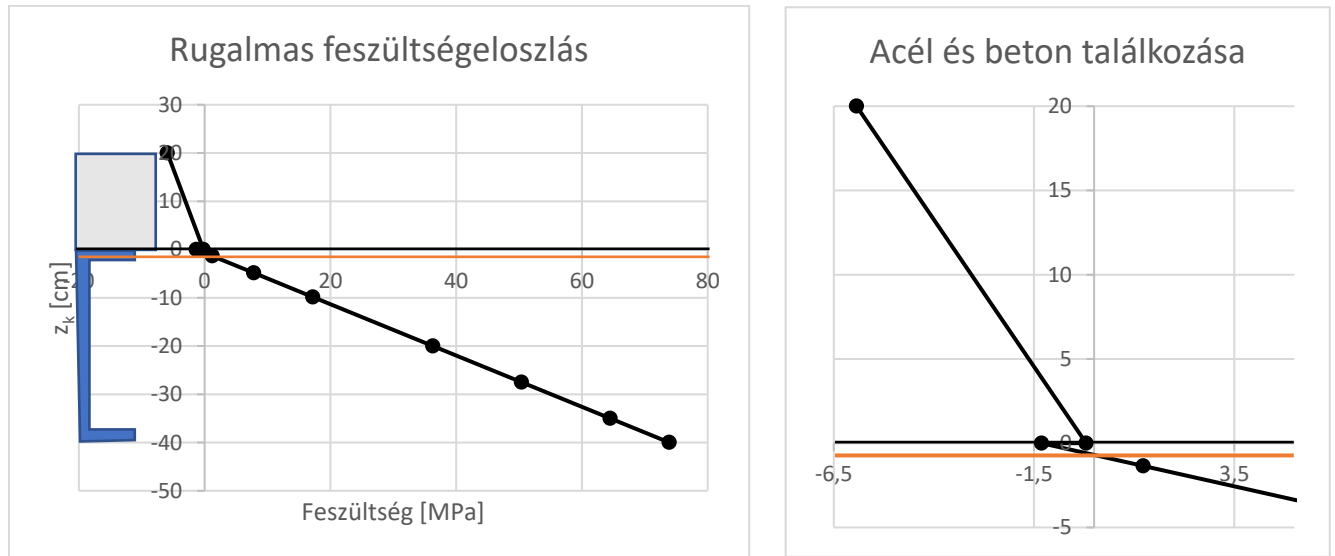
37. ábra: z_s és z_k értelmezése, értékei táblázatosan.

A 37. ábrán látszik, hogy a beton alsó, és felső részén, valamint az acél felső övében 2-2 nyúlásmérő bélyeg lett elhelyezve. Az itt mért értékek számtani közepét vettem, erre utal a „SC-GC1-3” jelölés.

Az így kapott feszültségeloszlást a 38. ábra szemlélteti. A kinagyított ábrán megfigyelhetjük, hogy a semleges tengely ($z_i = 20,698$ cm) közel esik az acél és beton találkozási síkjához, de még létre tud jönni nyomófeszültség az acél felső övében. A bemutatott ábra jellegében megegyezik az összes kialakítású gerenda esetén, értékei a teher függvényében változnak, melyek táblázatosan vannak dokumentálva. A függőleges tengelyen az acél-beton

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

kapcsolatától mért távolságok vannak (z_k), míg a vízszintes tengelyen a feszültségek nagysága MPa-ban.

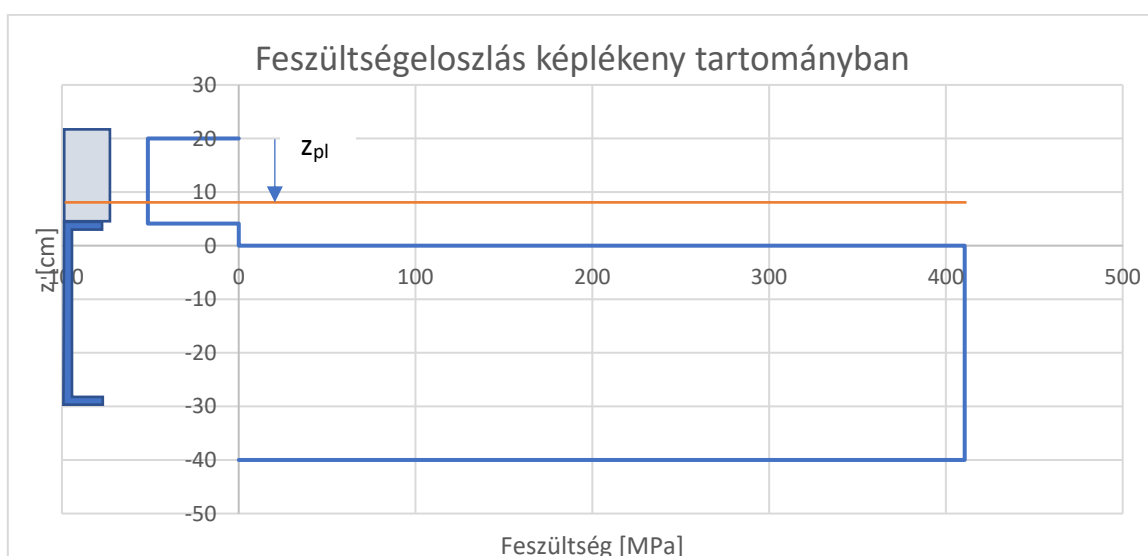


38. ábra: Feszültségeloszlás rugalmas állapotban.

6.3.2 Feszültségek meghatározása képlékeny alapon

Az $F_{el} = 555,67$ kN folyáshoz tartozó terhelő erő elérése után képlékeny alapon számítom a feszültségeket. Ilyenkor feltételezzük, hogy az acélban $f_y' = 410,63$ MPa folyási feszültség, a betonban $0,85 \cdot f_c' = 43,69$ MPa feszültség keletkezik, melyeket a kísérletek során határoztak meg. A képlékeny számítást a 4.3. fejezetben részleteztem.

Mivel a képlékeny semleges tengely a betonban van, a feszültségeloszlás a 39. ábra alapján alakul. A teljes beton keresztmetszetben $0,85 \cdot f_c' = 43,69$ MPa. Az acél öv felső része nyomott, alsó része és a keresztmetszet többi része húzott, a feszültség mindenhol $f_y' = 410,63$ MPa.

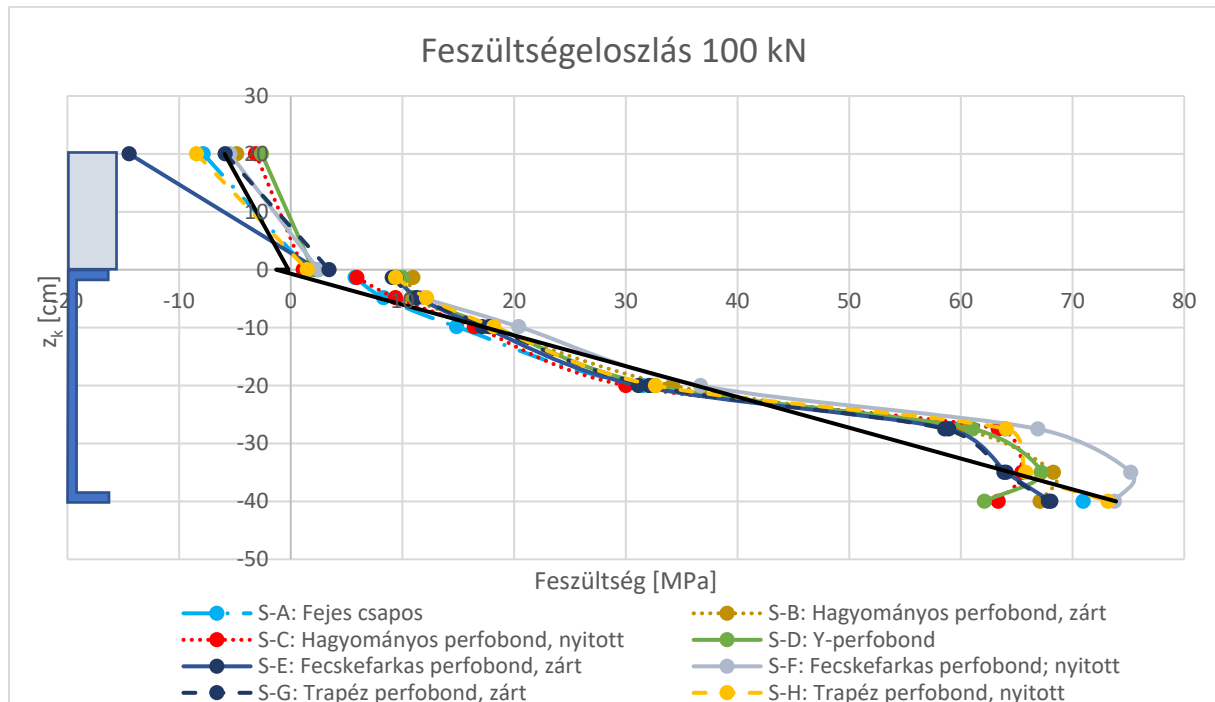


39. ábra: Feszültségeloszlás képlékeny állapotban.

6.4 Feszültségek elemzése

6.4.1 Feszültségeloszlások a rugalmas tartományban

A 40. ábrán egy összesített diagramot láthatunk, amely a 100 kN terhelő erő hatására létrejött feszültségeket mutatja be az összes gerendatípusnál, valamint a 6.3.1 fejezetben ismertetett számított feszültségeloszlást. A pontok mutatják a mérés helyét, a mért értékek között közelítő görbék mutatják a tényleges feszültségeloszlást. Az itt számított és mért feszültségek értékeit a 4. táblázat szemlélteti, a számított értékhez fajlagosítva pedig az 5. táblázat adatai szolgálnak. A táblázatokban a „-” jelölt helyen nincs feldolgozható adat a nyúlásmérő bélyegekből.



40. ábra: Feszültségeloszlások rugalmas állapotban, 100 kN teher esetén.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek											
	Bélyeg száma	z_k [cm]	Számított feszültség [MPa]	Mért feszültség [MPa]							
				S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
Beton	SC-GC1-3	20	-5,93	-7,83	-4,82	-3,13	-2,60	-14,46	-5,44	-5,86	-8,43
	SC-GC5-6	0	-0,20	1,52	-	1,14	2,01	2,45	2,48	3,44	1,49
Acél		0	-1,31								
	SC-GS7-8	-1,35	1,23	5,77	10,95	5,93	10,02	9,43	-	9,10	9,40
	SC-GS6	-4,85	7,81	8,33	10,85	9,39	11,14	11,42	11,70	11,28	12,17
	SC-GS5	-9,85	17,21	14,87	17,76	16,46	18,13	17,15	20,42	17,81	18,20
	SC-GS4	-20	36,29	31,51	34,20	30,01	32,45	31,13	36,71	32,10	32,68
	SC-GS3	-27,5	50,39	63,98	60,05	63,36	61,06	58,93	66,90	58,56	64,07
	SC-GS2	-35	64,50	67,47	68,30	65,47	67,19	64,07	75,22	63,87	65,81
	SC-GS1	-40	73,90	70,97	67,10	63,36	62,13	68,07	73,76	67,85	73,18

4. táblázat: 100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek.

100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek fajlagosan											
	Bélyeg száma	z_k [cm]	Számított feszültség [MPa]	Mért feszültség [MPa]							
				S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
Beton	SC-GC1-3	20	1,00	1,32	0,81	0,53	0,44	2,44	0,92	0,99	1,42
	SC-GC5-6	0	1,00	-7,58	-	-5,68	-10,04	-12,22	-12,40	-17,19	-7,45
Acél		0	1,00								
	SC-GS7-8	-1,35	1,00	4,71	8,94	4,84	8,17	7,70	-	7,43	30,69
	SC-GS6	-4,85	1,00	1,07	1,39	1,20	1,43	1,46	1,50	1,44	8,21
	SC-GS5	-9,85	1,00	0,86	1,03	0,96	1,05	1,00	1,19	1,03	-
	SC-GS4	-20	1,00	0,87	0,94	0,83	0,89	0,86	1,01	0,88	-
	SC-GS3	-27,5	1,00	1,27	1,19	1,26	1,21	1,17	1,33	1,16	-
	SC-GS2	-35	1,00	1,05	1,06	1,02	1,04	0,99	1,17	0,99	-
	SC-GS1	-40	1,00	0,96	0,91	0,86	0,84	0,92	1,00	0,92	0,99

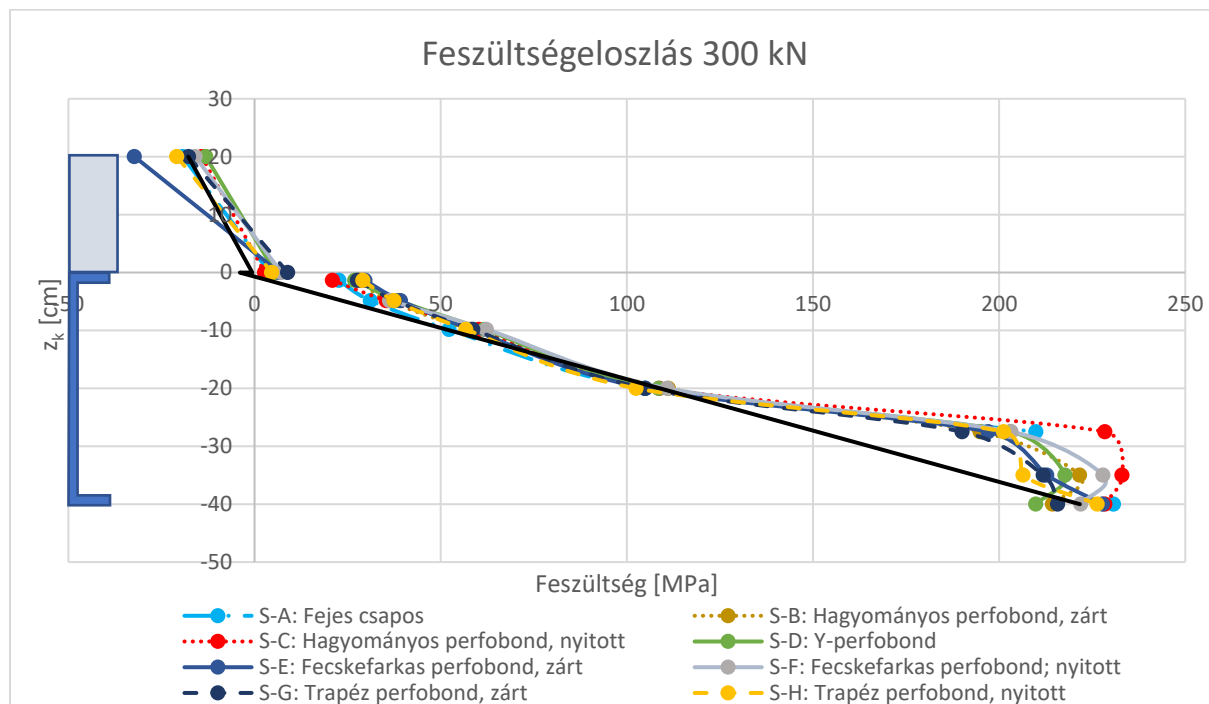
5. táblázat: 100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek fajlagosan.

Megfigyelhetjük, hogy a különböző kapcsolóelemmel kialakított gerendák feszültségeloszlásai hasonlóan viselkednek egymáshoz, de eltérnek az elméleti lineáris feszültségeloszlástól. Az is jól látszik grafikusan és számszerűen, hogy a rugalmas számítás alapján feltételezett legnagyobb feszültséget a mért értékektől csak a nyitott fecskéfarkas perfobond gerenda feszültségei haladják meg. A beton részben minden típusnál keletkezik húzófeszültség, a nyomófeszültségek értékei pedig minden esetben nagyobbak a számítottnál.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

A feszültségek nagysága viszont függ a kapcsolóelem kialakításától, ugyanis a fecskefarkas, a trapéz és az Y-perfobondokkal készített gerendák keresztmetszetében a gerinc felső pontjaiban mérhető nagyobb feszültségek. A csapos, és nyitott furatos perfobond feszültségei kisebbek, viszont ezek is átlépik a feltételezett feszültség értékét.

Nagyobb terhelés esetében a 41. ábra azt mutatja be, hogyan alakulnak a feszültségeloszlások.



41. ábra: Feszültségeloszlások rugalmas állapotban, 300 kN teher esetén.

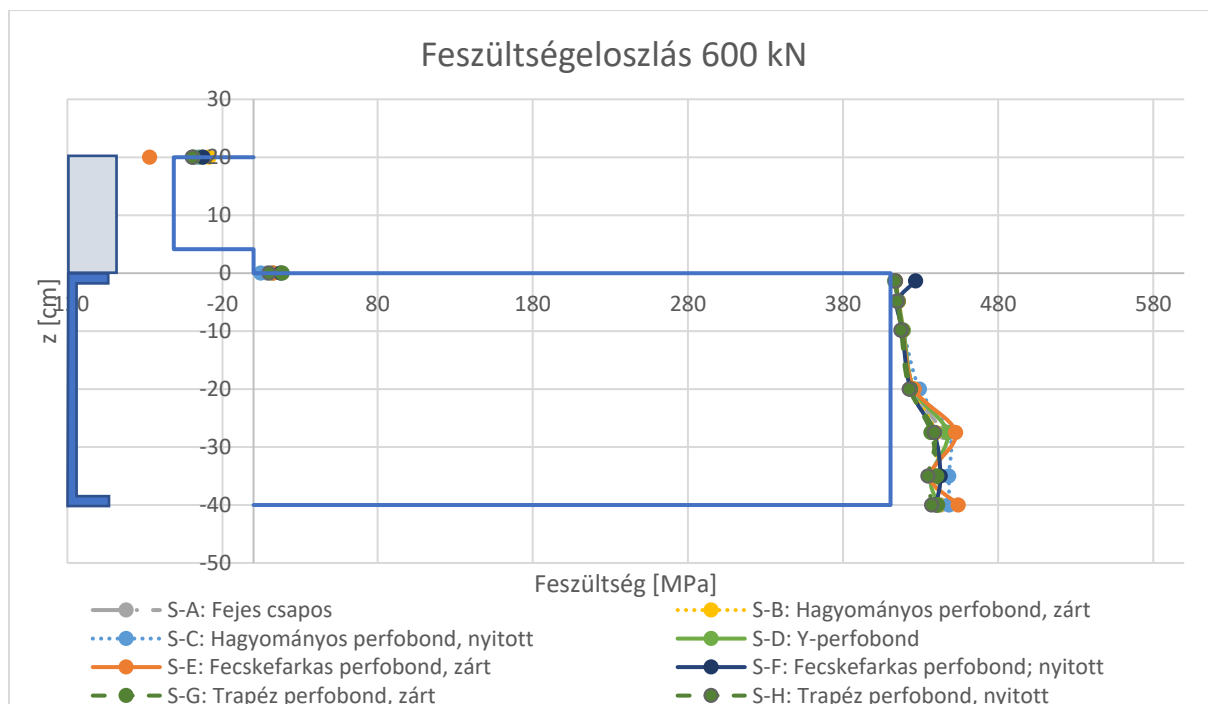
Azt várjuk, hogy a tendencia megegyezik egészen addig, amíg az acél alsó pontjában a feszültség eléri a folyási feszültséget. Azonban azt tapasztaljuk, hogy az acél szelvény alsó felében az eddiginél jobban eltér a tényleges feszültségeloszlás a feltételezettől, méghozzá a mért feszültség nagyobb lesz, mint a számított. Ne feledjük, hogy a 5.3.4 fejezetben bemutatottak alapján, a folyási feszültség eléréséhez $F_{el} = 555,67$ kN terhelő erőre van szükség, tehát még mindig rugalmas tartományban vagyunk.

6.4.2 Feszültségeloszlások a képlékeny tartományban

Az előző fejezethez hasonlóan, most képlékeny állapotban mutatom be az egyes innovatív kapcsolóelemmel kialakított gerendák középső keresztmetszetének feszültségeloszlását. A 6.3.2 fejeztben ismerttettem a képlékeny számítást, melyben feltételeztem, hogy az acél teljes keresztmetszetében folyik, a beton feszültségei elérik a nyomószilárdságának 85%-át.

A 42. ábrán 600 kN terhelő erő hatására létrejött feszültségeloszlást láthatjuk, az összes típus esetében. Az értékeket számszerűen a 6. táblázat, fajlagosított értékeit pedig a 7. táblázat tartalmazza.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



42. ábra: Feszültségeloszlások képlékeny állapotban, 600 kN teher esetén.

600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek											
	Bélyeg száma	z _k [cm]	Számított feszültség [MPa]	Mért feszültség [MPa]							
				S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
Beton	SC-GC1-3	20	-43,69	-38,75	-28,61	-35,76	-33,53	-66,86	-32,46	-38,77	-39,48
	SC-GC5-6	0	-43,69	8,81	-	4,77	12,52	12,61	17,64	18,67	10,06
	SC-GS7-8	-1,35	410,63	413,68	413,27	413,43	413,83	414,05	426,89	413,94	413,84
	SC-GS6	-4,85	410,63	415,49	414,98	415,59	415,84	415,75	415,09	415,56	415,08
	SC-GS5	-9,85	410,63	418,42	418,09	418,89	419,03	418,41	418,12	418,21	417,41
	SC-GS4	-20	410,63	425,78	425,32	429,34	425,67	425,99	423,50	423,64	422,77
	SC-GS3	-27,5	410,63	445,32	439,74	448,51	447,33	452,73	438,71	436,85	439,13
	SC-GS2	-35	410,63	444,24	439,46	448,30	436,57	436,16	442,82	440,60	434,89
	SC-GS1	-40	410,63	443,15	441,81	448,51	440,97	454,32	439,99	441,16	437,25

6. táblázat: 600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültsége.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek											
	Bélyeg száma	z_k [cm]	Számított feszültség [MPa]	Mért feszültség [MPa]							
				S-A	S-B	S-C	S-D	S-E	S-F	S-G	S-H
Beton	SC-GC1-3	20	1,00	0,89	0,65	0,82	0,77	1,53	0,74	0,89	0,90
	SC-GC5-6	0	1,00	-0,20	-	-0,11	-0,29	-0,29	-0,40	-0,43	-0,23
	SC-GS7-8	-1,35	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,04	1,01	1,01
	SC-GS6	-4,85	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	SC-GS5	-9,85	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
	SC-GS4	-20	1,00	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03
	SC-GS3	-27,5	1,00	1,08	1,07	1,09	1,09	1,10	1,07	1,06	1,07
	SC-GS2	-35	1,00	1,08	1,07	1,09	1,06	1,06	1,08	1,07	1,06
	SC-GS1	-40	1,00	1,08	1,08	1,09	1,07	1,11	1,07	1,07	1,06

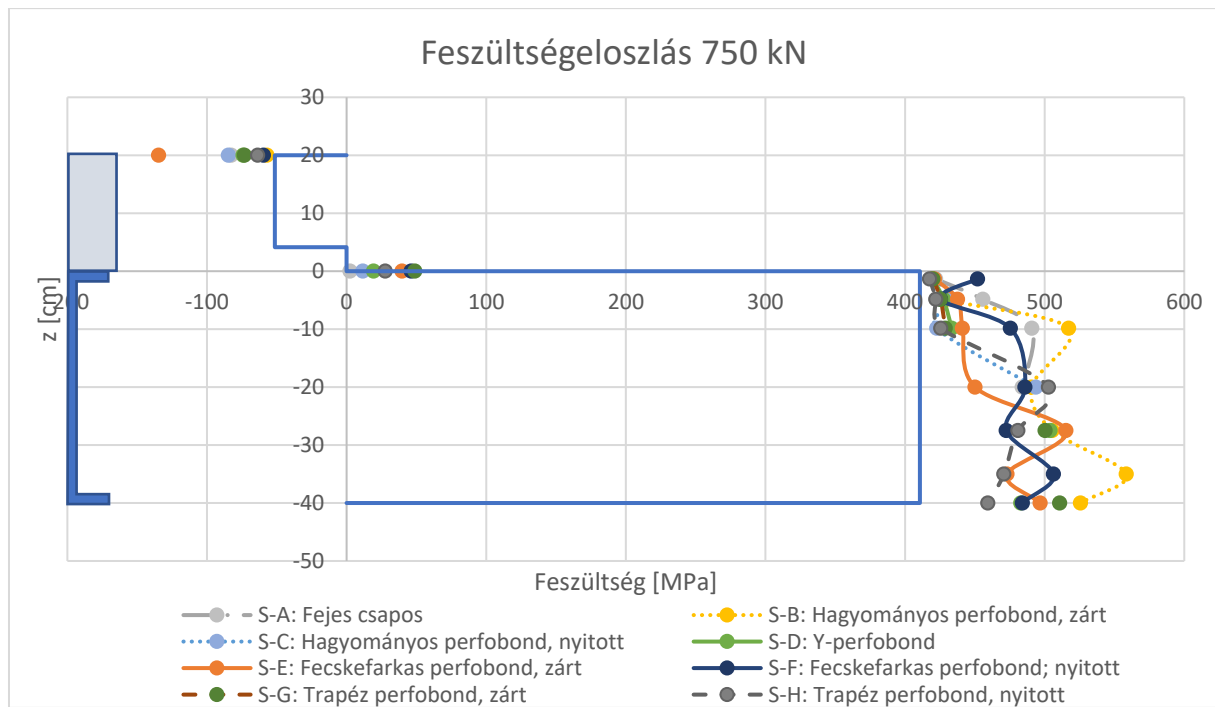
7. táblázat: 600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek fajlagosan.

A grafikonon, és számszerűen is jól látszik, hogy az acélban az összes típus feszültségeloszlása nagyobb a feltételezettnél, és az acél alsó övében nagyobb, mint fentebb. Ebből arra lehet következtetni, hogy a feltételezés, mely szerint a teljes keresztmetszet folyik, még nem következett be, vagyis további terhet képes felvenni az öszvérgerenda. Láthatjuk, hogy a beton felső szakaszában a számítottnál nagyobb nyomófeszültség keletkezik. A 7. táblázat is jól mutatja, hogy csak kis mértékben térnek el a feszültségek a feltételezettől, és egymástól.

Megfigyelhetjük, hogy a beton alsó szélén mindig keletkezik húzófeszültség, és egyértelműen látszik, hogy a számítás során meghatározott semleges tengely valóban a betonban található.

A tönkremenetelt okozó terhelő erőt megközelítve a 43. ábrán láthatjuk, hogyan változik a feszültségek eloszlása. A tönkremenetel közeli teherszinteken a nyúlásmérő bélyegek nagy része tönkremegy, és nem tudja mérni a megnyúlásokat, így az $F = 750$ kN terhelési szintet választottam ki vizsgálatra (ekkor még a bélyegek nagy része ép).

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján



43. ábra: Feszültségeloszlások képlékeny állapotban, 750 kN teher esetén.

Láthatjuk, hogy az acél mért pontjaiban tovább növekszik a feszültség, viszont a 42. ábrán tapasztalható egyenletes feszültségmegoszlás tendenciája megszűnik. A betonban a húzófeszültségek is növekednek körülbelül 50 MPa-ig.

6.5 A feszültségeloszlások elemzésének összegzése

A fejezetben ismertettem az innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvérgerendák középső keresztmetszetének feszültségeloszlásait rugalmas és képlékeny állapotban. Bemutattam a feszültségek előállításának módját a mért értékekből, majd táblázatosan és grafikusán elemeztem az adatokat különböző teherszintek esetén. Rugalmas állapotban a mért feszültségeloszlásokat jól közelítik, képlékeny állapotban viszont minden esetben átlépik a feltételezett feszültségábrát. A képlékeny semleges tengely jól látható, hogy a betonban van a feltételezésnek megfelelően.

7. Következtetések

A jelen tanulmányban az innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók szerkezeti viselkedését elemeztem gerendakísérlet alapján. Az utóbbi időben az öszvértartók együttműködéséért felelős nyírt kapcsolóelemek vizsgálata rendkívül kutatott terület, melyet a szakirodalmi áttekintésből is láthattunk. Ez az elemzés azonban nem kinyomókísérlet alapján vizsgálja az egyes kapcsolóelemeket, hanem globálisan, gerendakísérlettel, így nagyobb rálátást kapunk a teljes gerenda viselkedésére.

A teherbírási vizsgálatkor megfigyeltük, hogy az összes gerenda tényleges tönkremeneteléhez szükséges terhelő erő nagyobb, mint a képlékeny alapon számított (5-10 % tartalék), de az értékek csak kis mértékben térnek el egymástól.

A lehajlás – terhelő erő diagramokon nagyobb tehernél jól látszanak az egyes innovatív kapcsolóelemekkel felszerelt gerendák viselkedései. A zárt kialakítású hagyományos perfobond mutatja a legnagyobb lehajlást, míg a zárt fecskefarkas és trapéz perfobondok a legkisebb lehajlást.

A terhelő erő – relatív elcsúszás diagramok megmutatták, hogy a gerendán a szélső keresztmetszettől a középső keresztmetszet felé haladva, ugyanakkora tehernél fokozatosan növekszik a relatív elcsúszás, ami ellent mond annak az elméletnek, hogy az elcsúszás a középső keresztmetszetben zérus, és a gerendán kifelé haladva egyre nagyobbak.

A relatív elcsúszások elemzésénél a tényleges és közelítő görbék, valamint a paramétereket alapján megállapítható, hogy a fejes csapos kapcsolati típustól optimálisabb viselkedést mutatnak az innovatív kapcsolóelemek: a csapos kialakításhoz tartozik a legkisebb duktilitás. A zárt kialakítású hagyományos perfobond duktilitása, és görbe alatti területe a legnagyobb, vagyis a legnagyobb alakváltozó képességgel rendelkezik. Ennek lehetséges oka, hogy az egyenes lemez felhasítja a betont. A trapéz kialakítású perfobond kötések ettől eltérően viselkednek. Ezek a típusok rendelkeznek a legnagyobb kezdeti merevséggel, és viszonylag nagy duktilitással. Az Y-perfobond és fecskefarkas perfobondok átmenetet képeznek az előbb említett kettő között.

A feszültségeloszlások rugalmas alapon történő vizsgálata során megfigyelhettük, hogy a különböző kapcsolóelemmel kialakított gerendák feszültségeloszlásainak tendenciái hasonlóak. A feszültségek nagysága viszont függ a kapcsolóelem kialakításától, ugyanis a fecskefarkas, a trapéz és az Y-perfobondokkal készített gerendák keresztmetszetében a gerinc felső pontjaiban mérhető nagyobb feszültségek. A csapos és nyitott furatos perfobond feszültségei kisebbek, de ezek is átlépik a feltételezett feszültségek értékét. Az alsó övben viszont az összes típus jól közelíti a számítás során meghatározott legnagyobb feszültséget.

Képlékeny feszültségek esetén a rugalmastól eltérő jelenséget tapasztalhatunk. A feltételezett folyási feszültségtől az acél szelvény alsó részében jelentősen eltérnek a mért értékek, ugyanakkor az összes típus hasonlóan viselkedik, a feszültségek nagyságai pedig csak kisebb mértékben térnek el egymástól, tehát itt már nem érvényesülnek az egyes kialakítások típusai annyira, mint rugalmas tartományban.

Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének elemzése gerendakísérleti eredmények alapján

A képlékeny semleges tengely a betonban van, így abban húzófeszültségek is megjelentek, egészen 50 MPa-ig. Ugyanakkor rugalmas tartományban is jelentős húzófeszültséget észleltünk. Mindkét esetben viszont nagyobb nyomófeszültségek ébredtek a számítottnál.

Összességében tehát megállapítható, hogy a háromdimenziós (Y, fecskefarkas) és trapéz perfobond kialakítású gerendák merevebben viselkednek, kisebb relatív elcsúszásokkal, és nagyobb duktilitással rendelkeznek. Ezáltal ezen típusokban nagyobb feszültségek ébrednek, főleg rugalmas állapotban.

A hagyományos, zárt kialakítású perfobond speciálisan viselkedik, ugyanis itt tapasztalható a legnagyobb elcsúszás az acél és a beton között, a legnagyobb duktilitás és görbe alatti terület, vagyis ennek a típusnak van a legnagyobb alakváltozó képessége. A feszültségek ebben az esetben kisebbek, mint a merevebb kialakítású kapcsolóelemekkel felszerelt gerendáknál mind rugalmas, mind képlékeny tartományban.

Ábra- és táblajegyzék

1. ábra: Csapos kapcsolat [4].....	5
2. ábra: Perfobond kapcsolóelemek típusai [5].	6
3. ábra: S-A: Fejes csapos kialakítás.	9
4. ábra: S-B: Hagyományos perfobond, zárt furat.	9
5. ábra: S-C: Hagyományos perfobond, nyitott furat.....	10
6. ábra: S-D: Y- perfobond.....	10
7. ábra: S-E: Fecskefarkas perfobond, zárt furat.....	10
8. ábra: S-F: Fecskefarkas perfobond, nyitott furat.	10
9. ábra: S-G: Trapéz perfobond, zárt furat.	11
10. ábra: S-H: Trapéz perfobond, nyitott furat.	11
11. ábra: A gerenda azonosító jelrendszere.	11
12. ábra: Terheléstörténet.	12
13. ábra: A terhelő keretbe helyezett gerenda.....	13
14. ábra: Terhelő keret kialakítása.	13
15. ábra: Az öszvér gerenda műszerterve.....	14
16. ábra: Nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése.	14
17. ábra: Méretek.....	15
18. ábra: Keresztmetszeti tényezők.	16
19. ábra: Keresztmetszeti tényezők.	16
20. ábra: Semleges tengely a betonban.....	17
21. ábra: Összesített terhelés - lehajlás diagram.	20
22. ábra: SN4, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.	21
23. ábra: SN3, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.	21
24. ábra: SN2, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.	22
25. ábra: SN1, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.	22
26. ábra: SS1, Összesített terhelés - relatív elcsúszás diagram.....	23
27. ábra: 20 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.	24
28. ábra: 40 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.	24
29. ábra: 60 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.	25
30. ábra: 80 mm lehajláshoz tartozó elcsúszások oszlopdiagram.	25
31. ábra: Közelítő függvény illesztése.	26
32. ábra: Paraméterek értelmezése.....	27
33. ábra: Fejes csapos, fecskefarkas és Y-perfobond közelítő görbéi.....	30
34. ábra Fejes csapos, hagyományos és trapéz perfobond közelítő görbéi.	30
35. ábra: A gerendakísérlet során meghatározott feszültség – fajlagos nyúlás diagramok. ...	33
36. ábra: Képlékeny modulus meghatározása.	34
37. ábra: z_s és z_k értelmezése, értékei táblázatosan.	35
38. ábra: Feszültségeloszlás rugalmas állapotban.	36
39. ábra: Feszültségeloszlás képlékeny állapotban.....	36
40. ábra: Feszültségeloszlások rugalmas állapotban, 100 kN teher esetén.	37
41. ábra: Feszültségeloszlások rugalmas állapotban, 300 kN teher esetén.	39

*Innovatív kapcsolóelemekkel kialakított öszvér gerendatartók viselkedésének
elemzése gerendakísérleti eredmények alapján*

42. ábra: Feszültségeloszlások képlékeny állapotban, 600 kN teher esetén.....	40
43. ábra: Feszültségeloszlások képlékeny állapotban, 750 kN teher esetén.....	42
1. táblázat: Képlékeny töréshez tartozó teher számított és mért értékei.....	18
2. táblázat: SN4 relatív elcsúszások összehasonlítása számszerűen.....	29
3. táblázat: SN4 relatív elcsúszások összehasonlítása fajlagosan.....	29
4. táblázat: 100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek.....	38
5. táblázat: 100 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek fajlagosan.....	38
6. táblázat: 600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültsége.....	40
7. táblázat: 600 kN terhelő erő hatásából keletkező feszültségek fajlagosan.....	41

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Szatmári István: Öszvértartók, egyetemi jegyzet, 1998.
- [2] MSZ EN 1994-1-1: 2004. Eurocode 4: Öszvérszerkezetek tervezése: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok.
- [3] Dr. Dunai László: Szakértői jelentés, SteelBeam projekt, 10. feladatrész: Prototípusok kísérleti analízise, 2. fejezet
- [4] non, (2017). [image] Available at: <https://www.revitcity.com/images/nohotlink.gif> [Accessed 26 Oct. 2017].
- [5] Anon, (2017). [image] Available at: <http://ascelibrary.org/cms/attachment/6384/79660/figure1.gif> [Accessed 26 Oct. 2017]. Anon, (2017). [image] Available at: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0143974X14002545-gr1.jpg> [Accessed 26 Oct. 2017]. Anon, (2017). [image] Available at: <http://docplayer.com.br/docs-images/24/3760063/images/4-0.jpg> [Accessed 26 Oct. 2017].
- [6] Slutter RG, Fisher JW. Fatigue strength of shear connectors. Highw Res 1966; 147:65–88.
- [7] B. S. Jayas, M. U. Hosain: Behaviour of headed studs in composite beams: push-out tests, 1988.
- [8] E. C. Oguejiofor, M. U. Hosain: A parametric study of perfobond rib shear connectors, 1994.
- [9] Gattesco N, Giuriani E, Gubana A. Low-cycle fatigue test on stud shear connectors. J Struct Eng 1997;123(2):145–50.
- [10] M. Feldmann, H. Gesella (University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany): Crack propagation at headed shear studs in composite beams, 2005.
- [11] Sang-Hyo Kim, Kyu-Tae Choi, Se-Jun Park, Seung-Min Park, Chi-Young Jung: Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector, 2012.
- [12] L.F. Costa-Neves, J.P. Figueiredo, P.C.G. da S. Vellasco, J. da Cruz Vianna: Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: An experimental approach, 2013.
- [13] S.H. Kim, J. Choi, S.J. Park, J.H.A, C.H Jung. Behaviour of composite girder with Y-type perfobond rib shear connectors; *Journal of Constructional Steel Research* 103. 2014. 275-289.
- [14] Sang-Hyo Kim, Won-Ho Heo, Kyung-Sik Woo, Chi-Young Jung, Se-Jun Park: End-bearing resistance of Y-type perfobond rib according to rib width-height ratio, 2014.
- [15] Shuangjie Zheng, Yuqing Liu, Teruhiko Yoda, Weiwei Lin: Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector, 2015.
- [16] Sang-Hyi Kim, Kun-Soo Kim, Sejun Park, Jin-Hee Ahn, Min-Kyu Lee: Y-type perfobond rib shear connectors subjected to fatigue loading on highway bridges, 2016.
- [17] MSZ EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: B.2.4 Testing procedure