

ACÉLSZÁL ERŐSÍTÉSŰ VASBETON GERENDÁK REPEDEZETTSÉGI ÁLLAPOTA

CRACKIG BEHAVIOUR OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAMS

KISS Lilla, VARGA Ákos

IV. éves építőmérnök hallgató
IV. éves építőmérnök hallgató
Debreceni Egyetem Műszaki Kar Építőmérnöki Tanszék
4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.

Kivonat: Napjainkban az építőanyagok között egyre szélesebb körben alkalmazzák a különböző anyagú, alakú szálakkal erősített betonokat. A szálak anyagának, méretének és mennyiségének megválasztása a megoldandó feladat függvénye. Szálerősítésű beton felhasználásával jelenleg elsősorban ipari padlók, repülőtéri kifutópályák, alagútszerkezetek, csörszerkezetek, hídpályalemezek stb. készültek. Remélhető előnyös tulajdonságai miatt fokozottan előtérbe kerül a szálerősítésű beton szerkezeti elemekben való alkalmazási lehetőségeinek feltárása. Felhasználásával előre gyártott keretszerkezetek helyszínen készülő csomópontjait, síklemez földem - oszlop kapcsolatait, koncentrált erőbevezetés környezetét, nyírásnak fokozottan kitett tartószakaszokat (pl. vasbeton síklemez földem átszűrődása és átlukadása) lehetne kedvezően kialakítani.

Kulcsszavak: acélszál erősítésű beton, repedezettségi állapot, repedéstávolság, repedéstágasság

Abstract: One of the main motivations of applying fibre reinforcement in concrete structures and in reinforced concrete structural elements is to increase the toughness properties of the concrete matrix. After initiation of cracks, fibres can carry residual forces in the cracked section by bridging the two face of crack providing redistribution of the stresses in the structural elements consequently resulting significant increment in the overall structural toughness, decreasing crack propagation and crack width. Therefore steel fibre reinforced concrete is especially applied for concreting industrial floor slabs, roads and pavements, airfield runways, tunnel structures, tubes and other concrete products.

Keywords: fibre reinforced concrete, cracking behavior, crack spacing, crack width

1. BEVEZETÉS CÉLKITŰZÉSEK

Tudományos Diákköri dolgozatunk elkészítéséhez korábbi kísérleti eredményeket használtunk. A kísérleteket 1995 és 1996 között a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának Vasbetonszerkezetek Tanszékén végezték Dr. Balázs L. György, Dr. Erdélyi László és Dr. Kovács Imre közreműködésével [5], [8], [11]. A kísérletek célja az acélszál erősítés hatásainak vizsgálata volt vasbeton és feszített beton gerendák hajlítási viselkedésére. A kísérletek során nagyszámú mérési eredmény feldolgozására és kiértékelésére került sor, melyek egy része alapját képezte több tudományos publikáció elkészítésének, továbbá Dr. Kovács Imre PhD értekezésének [2]. A kísérleti eredmények nagy számára való tekintettel az utóbbi időszakban nem került teljes részletezettséggel feldolgozásra a gerendák terhelés során mért és vizsgált repedezettségi állapotára vonatkozó adatbázis. Ennek megfelelően dolgozatunk elkészítése során az acélszál erősítésű vasbeton gerendák repedezettségi állapotával, a repedések tágasságával és azok távolságával foglalkoztunk. Elvégzett kutatásaink során, a kísérletsorozat alapján készült MKM 150/94 sz. "Acélszál erősítésű vasbeton gerendák viselkedése" (Témavezető: Dr. Balázs L. György) és az OTKA F025621 "Acélszál erősítésű beton- és vasbeton szerkezetek méretezése" c. Kutatási Jelentés (Témavezető: Dr. Kovács Imre) illetve Doktori (PhD) értekezés "Effect of steel fibres on the structural behaviour of concrete members" (Szerző: Dr. Kovács Imre) [2] vasbetongerendákra vonatkozó kísérleti eredményeit használtuk fel.

Célunk az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész Általános és az épületekre vonatkozó szabályok) [3] szabvány használhatósági határállapotáról szóló 7. Fejezetében ismertetett repedéstágasság meghatározására szolgáló modelljének kiterjesztése volt acélszál erősítésű vasbeton gerendákra.

Tudományos Diákköri dolgozatunkban tematikusan az alábbi munkarészeket végeztük el:

- A rendelkezésünkre bocsátott kísérleti eredmények grafikus és numerikus feldolgozása.
- Vasbeton gerendák szabvány szerinti repedéstágasság számítása, a kísérleti programban szereplő anyagjellemzők értékeivel.
- Kísérleti eredmények alapján a szabvány szerinti számítási eljárás kiterjesztése acélszál erősítésű vasbeton keresztmetszetek repedéstágasságának meghatározására.

Kutatásunk végén eredményeinket összefoglalva vontuk le következtetéseinket, és alkottuk meg az acélszálak hatásának figyelembe vételére alkalmas, a szálerősítést tartalmazó húzott betonöv merevítő hatását figyelembe vevő modelleket. A szálerősítés hatását a maximális repedéstávolság modelljében egy már meglévő, a „ k_3 ” tényező kiterjesztésével, illetve a húzott acélbetétek és beton öv megnyúlás különbségének modelljében egy új tényező („ k_f ”) bevezetésével javasoljuk figyelembe venni.

2. ACÉLSZÁL ERŐSÍTÉSŰ BETONOK

Az a gondolat, hogy az építőanyagok egyes mechanikai jellemzőit különböző szálak adagolásával kedvezően lehet befolyásolni szinte egyidős az emberiség kultúrtörténetével. Már a rómaiak is alkalmaztak különböző szálakkal erősített építőanyagokat szerkezeteikben. Kezdetben különösebb elvi megfontolások nélkül a természetben nagy mennyiségben előforduló szálakat, például szalmát, napraforgószárat, lószórt, bambuszt majd a beton újra felfedezését követően azbesztet, műanyagot, üveget és acélt is alkalmaztak, ill. alkalmaznak szálak formájában. A szálerősítésű beton tehát olyan építőanyag, amely a hagyományos beton összetevők (kötőanyag, víz, adalékanyag, adalékszerek) mellett a térben véletlenszerűen de egyenletesen elhelyezkedő, különböző alakú és anyagú szálakat is tartalmaz (1. Fénykép).



1. Fénykép: Acélszál erősítésű beton

A szálerősítésű beton felhasználásának kezdete a XIX. sz. végére tehető, amikor *A. Berand* (1874) a beton rideg tulajdonságainak csökkentése érdekében fémhulladékot adagolt receptúrájához, eljárását 1893-ban szabadalmaztatta is. A szálerősítésű beton ipari alkalmazása párhuzamosan folyt tudományos igényű vizsgálatával. Az amerikai *Porter* már 1910-ben kísérletezett acélszál erősítésű betonnal, majd *Fricklin* 1914-ben vasszögekkel erősített betonra kapott szabadalmat. *Zitkewic* 1938-ban ugyancsak szabadalmaztatta lágymas drótdarabokkal erősített betonra vonatkozó eljárását. Hazánkban a 1920-as években alkalmaztak először vasreszelék adagolású betont, majd 1950-ben

Rényiben vetődött fel a gondolat, hogy a beton tulajdonságainak javítására vashuzal darabokat keverjenek a betonba. Hazai és nemzetközi viszonylatban is korszakalkotó javaslatát azonban részletesen nem dolgozta ki.

A szálerősítésű beton elvi alapjainak lerakása így *Romualdi* és *Batson* valamint *Mandel* nevéhez fűződik, akik az 1950-es évek végén és az 1960-as évek elején végeztek kutatásokat acélszál erősítésű betonok mechanikai tulajdonságainak meghatározása céljából. Elsőként foglalkoztak a *szálorientáció* és a *száltávolság* fogalmával, modellezési lehetőségével valamint betonra gyakorolt hatásaival.

1965-ben az egyesült államokbeli *Battelle Development Co.* szabadalmat kapott az acélszál erősítésű betonra, melynek feltalálója *Romualdi*, és amely a világon elsőként *Wirand* elnevezéssel szabadalmi oltalmat kapott. Hazánkban, 1972-ben a *Mélyépítő Vállalat* kezdte meg előre gyártott csatornacsövek esetében ennek az új építőanyagnak az alkalmazását (*Szabó Iván, Dombi József*).

Kutatások folytak a *SZIKKTI*-ben, utódvállalatánál a *Betonolith Kft*-nél (*Kausay Tibor*), a *Betonopus Bt*-nél (*Kausay Tibor*), a *Dombeton Kft*-nél (*Dombi József*), *Innomat Kft.* (*Magyari Béla*), *Budapesti Műszaki Egyetem Építőanyagok Tanszékén* (*Balázs György, Erdélyi Attila*), *Vasbetonszerkezetek Tanszékén* (*Balázs L. György, Kiss Rita, Sebők Ferenc, Erdélyi László*), *Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén* (*Dulácska Endre*), *Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén* (*Arany Piroska, Balázs L. György, Erdélyi Attila, Salem G. Nehme*), a *Pécsi Tudományegyetem Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén* (*Orbán Zoltán*), valamint a *Debreceni Egyetem Építőmérnöki Tanszékén* (*Dr. Kovács Imre*) Az ipari alkalmazások széleskörű elterjedését nagymértékben segítette *Polgár László*.

3. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK

3.1 Alkalmazott szálak

A vizsgálathoz $l=30$ mm hosszú és 0,5 mm átmérőjű ($l/\varnothing=60$) acélszálak kerültek alkalmazásra. A hajlított-nyírt tartók felét, - mely 9 tartót foglal magába – a BEKAERT cég kampós végű DRAMIX típusú szálaival, másik felét D&D Kft. hullámosított acélszálaival készülték.

3.2 Mérési módszer

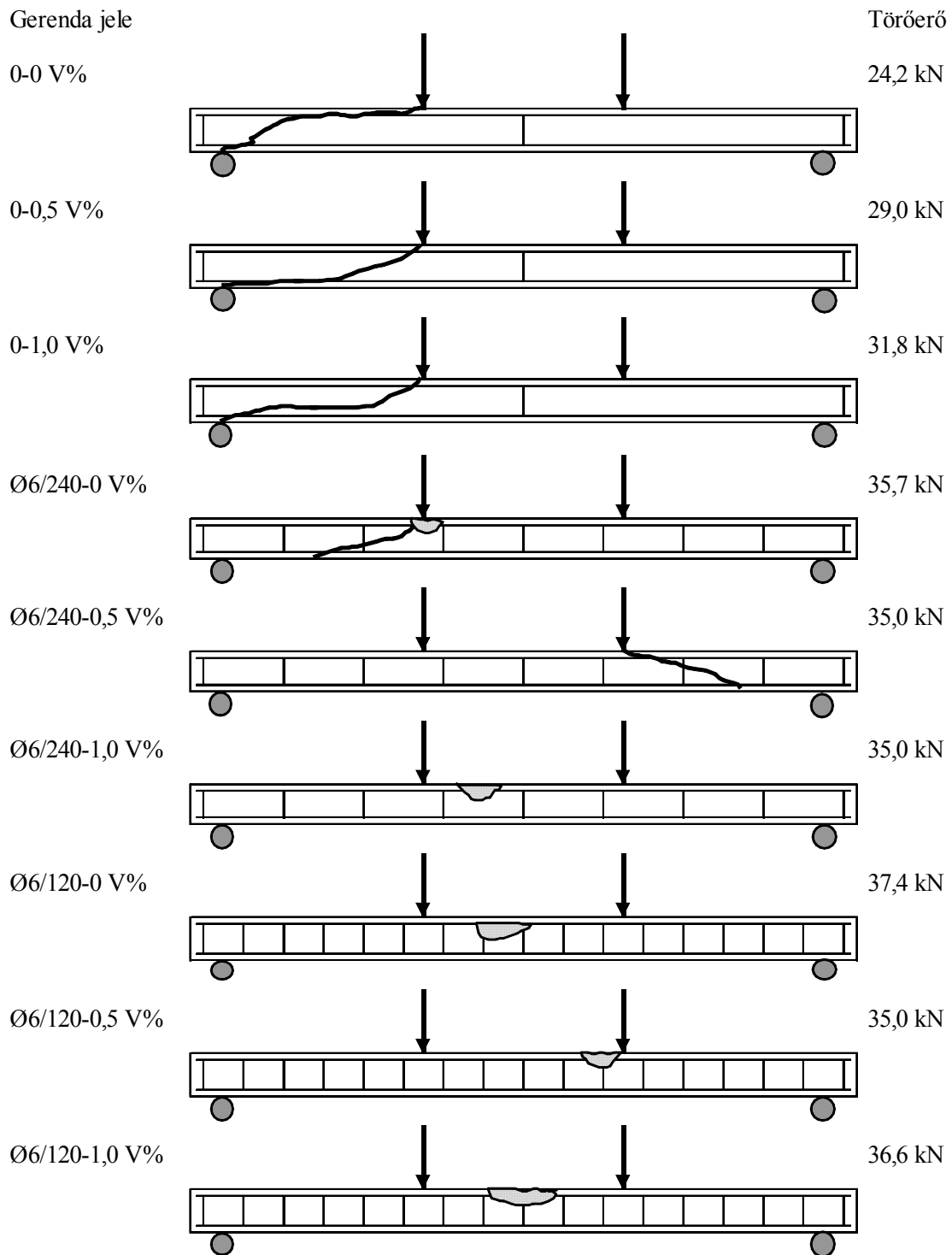
A tartó középponti lehajlását W20-as elektromágneses útagóval mérték. A terhelőerő – középponti lehajlás ábrát X-Y rajzolóval közvetlenül rajzolták meg. A repedéstágasságokat a húzott acélbetétek súlyvonalában mérték repedéstágasság mérő mikroszkóppal a tartók egyik oldalán, leolvasva minden egyes repedés tágasságát (leolvasási pontosság: 0,01 mm volt). A repedések alakját fölrajzolták a tartókra is, hogy fényképen azonosíthatók legyenek. A repedéseket megjelenésük sorrendjében sorszámokkal látták el.

3.3 Törőerők és tönkremeneteli módok

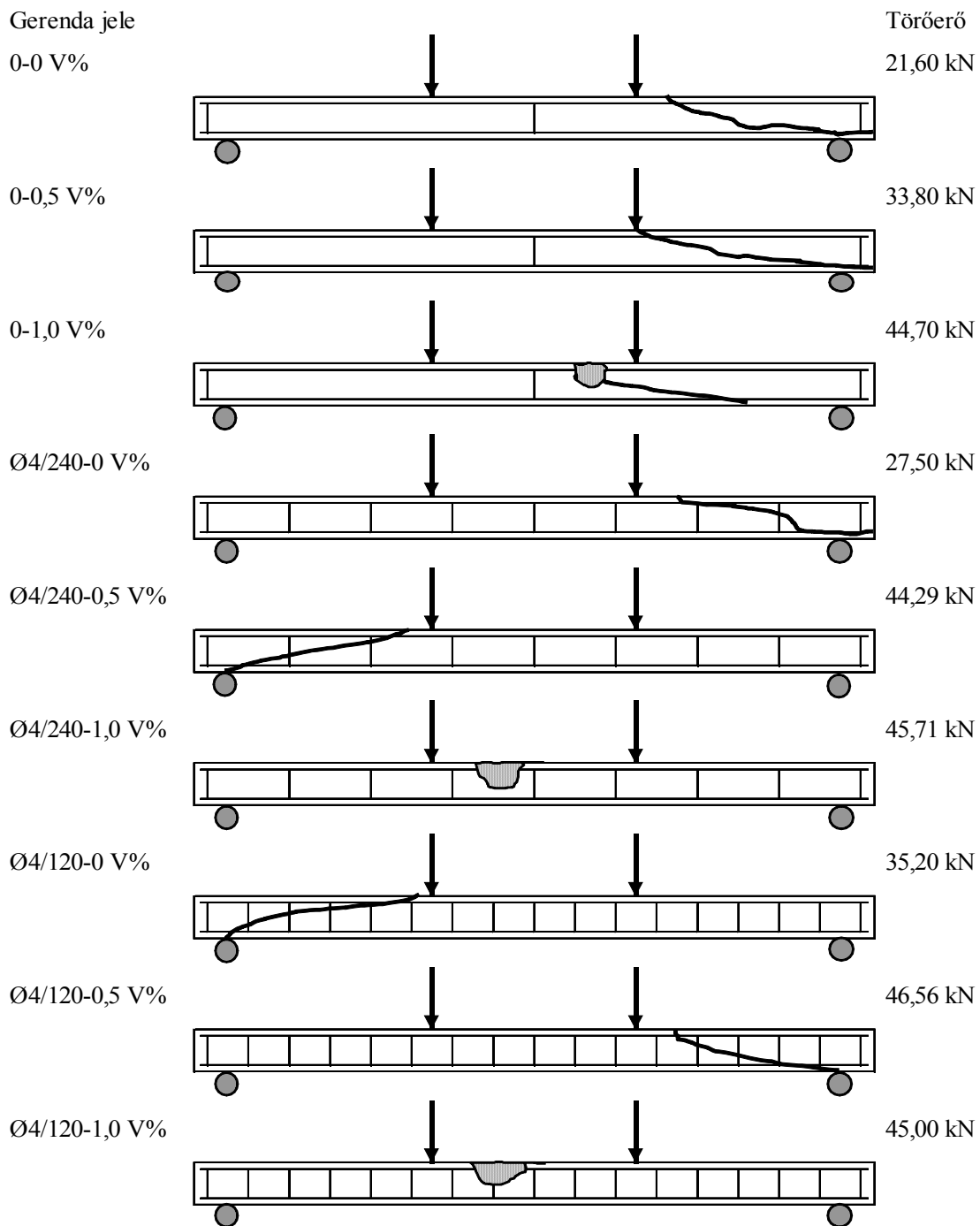
A Dramix és D&D száladagolással készült gerendák vasalási rendszerét, törőerőit, a tönkremeneteli módokat az 1. és 2. Ábra foglalja össze. A tudományos kutatásunk során a DRAMIX szálerősítésű gerendák közül a 120 mm kengyelkiosztású gerendákat vettük figyelembe, mivel a kísérlet során ezen gerendák tönkremenetele hajlításból származott mind, 0 V%, 0,5 V% és 1,0 V% száltartalom mellett. A D&D szálakkal erősített gerendák között nem volt kutatásunkat segítő kísérleti eredmény, mivel kimondottan hajlítási tönkremenetel nem történt az azonos térfogatban alkalmazott acélszálak esetén.

3.4 Repedezettségi állapot

A repedéstágasságot a húzott vasalás magasságában minden teherlépcsőben mikroszkóppal mérték meg. A repedések számát már akkor is feljegyezték, amikor a tágasságuk még nem volt mérhető az acélbetét magasságában. A repedések számából látható, hogy DRAMIX szálak esetén már az első repedések megjelenésétől kezdve a száltartalom növelésével csökkent a repedések száma.



1. ábra: Acélszál erősítésű vasbeton gerendák törésképei és törőerői DRAMIX ZC 30/5 kampós szálak alkalmazása esetén [1], [2]



2. ábra: Acélszál erősítésű vasbeton gerendák törésképei és törőerői D&D szálak alkalmazása esetén [1], [2]

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A rendelkezésünkre álló Dramix illetve D&D száltípussal végzett kísérleti eredményeket feldolgoztuk. A repedéstávasság modelljének acélszál erősítésű gerendákra történő kiterjesztéséhez olyan kísérleti eredmények elemzése volt szükséges, ahol az egyes eltérő száltartalmú gerendák kengyelezése és tönkremeneteli módja azonos volt. Ennek megfelelően vizsgálatainkat és számításainkat a Dramix száltartalommal készült gerendákra korlátoztuk, melyek nyírési vasalása a szerkesztési szabályoknak megfelelően $\varnothing 6/120$ erősségű volt. A további fejezetekben a többi gerendára vonatkozó eredményeket pusztán az acélszál erősítés hatásának szemléltetése érdekében mutatjuk be.

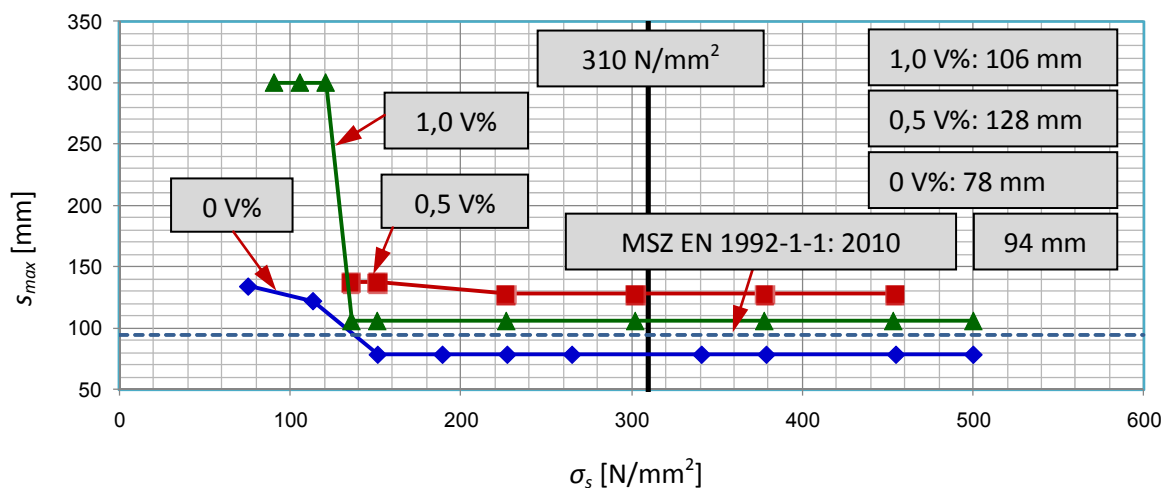
4.1 Acélbetétekben számított feszültség (σ_s)

A nyomatékok meghatározása után, ideális keresztmetszeti jellemzők segítségével a II. feszültségi állapothoz tartozó acélfeszültségeket számítottuk ki az Eurocode 2 előírásainak megfelelően. A szabványtól abban tért el számításunk, hogy nem tervezési értékeket (f_{cd} , f_{yd}), hanem a betonszilárdság esetén, a kísérleti úton, henger próbatesten meghatározott átlagos nyomószilárdságot (f_{cm}), a betonacél esetén a folyáshatár névleges értékét (f_y) használtuk fel. Ezt mind a szálerősítés nélküli, mind pedig a 0,5 V% és 1,0 V% száltartalmú gerendák esetén minden egyes teherlépcsőben elvégeztük.

4.2 Hajlítási repedésekből számított maximális repedéstávolságok (s_{max})

Kutatásunk e szakaszában egyértelművé vált, hogy a kísérlet során vizsgált gerendák közül – a szálak típusának figyelmen kívül hagyása mellett – a hajlítási jellegű tönkremenetelt szenvedett gerendák alkalmasak a repedezettségi állapotra vonatkozó – mely alapvetően a húzott és hajlított elemek esetében követhető a szabvány összefüggéseivel – egyértelmű következtetések levonására.

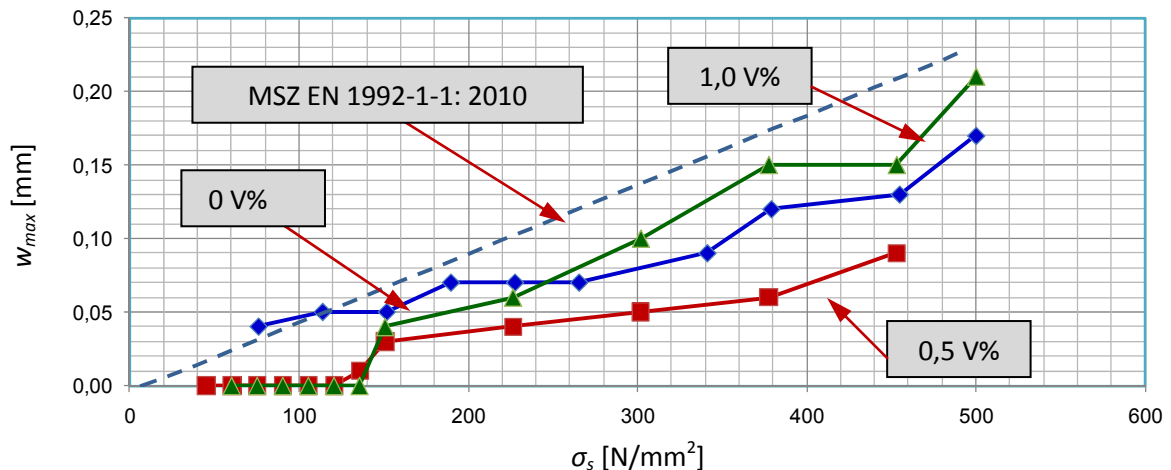
A maximális repedéstávolságok értékeinek meghatározása a kísérlet során mért adatokból történt. A kialakult repedéseket az adott helyen sorszámmal látták el. A sorszámok a repedések bekövetkezésének sorrendjét jelölik. Minden teherlépcsőnél adott számú repedések alakultak ki, amely alapján le tudtuk olvasni a két egymás mellett lévő, de egymástól legtávolabb elhelyezkedő repedés távolságát. Ezeket az adatokat a száltartalom és a kengyelkiosztás szerint vizsgáltuk (3. Ábra).



3. ábra: Repedéstávolságok Dramix szálerősítés esetén

4.3 Hajlítási repedésekből számított maximális repedéstágasságok (w_{max})

Mivel a repedéstágasságok a kísérlet során minden egyes teherlépcsőnél mérhetőek voltak, így a maximális érték meghatározható. Ennek függvényében adott teherlépcsőhöz tartozik az acélbetétben számítható feszültség, melyet a 4. Ábra diagramjának x tengelye tartalmaz, valamint egy maximális repedéstágasság, mely az y tengelyen értelmezhető. Mivel a diagramokat a szálerősítés mértéke szerint csoportosítottuk, ezért látható egymáshoz viszonyított arányuk.



4. ábra: Maximális repedéstágasságok

5. A REPEDÉSTÁGASSÁG MSZ EN 1992-1-1:2010 SZERINTI VIZSGÁLATA

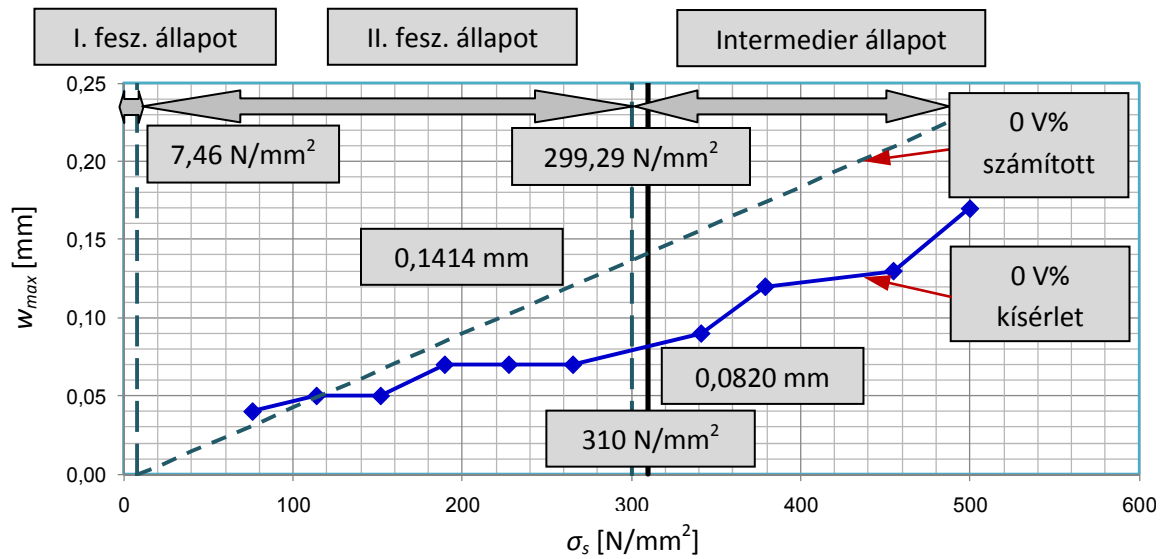
5.1 Az acélbetétben ébredő feszültségek (σ_s)

Az acélbetétben ébredő feszültségek meghatározása az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész Általános és az épületekre vonatkozó szabályok) [3] szabvány előírásainak megfelelően történt. Számításunk során a kísérletben mért átlagértékeket alkalmaztuk. A számításokat mind a szálerősítés nélküli gerendára, mind pedig a 0,5 V% szálerősítést tartalmazó gerendára elvégeztük.

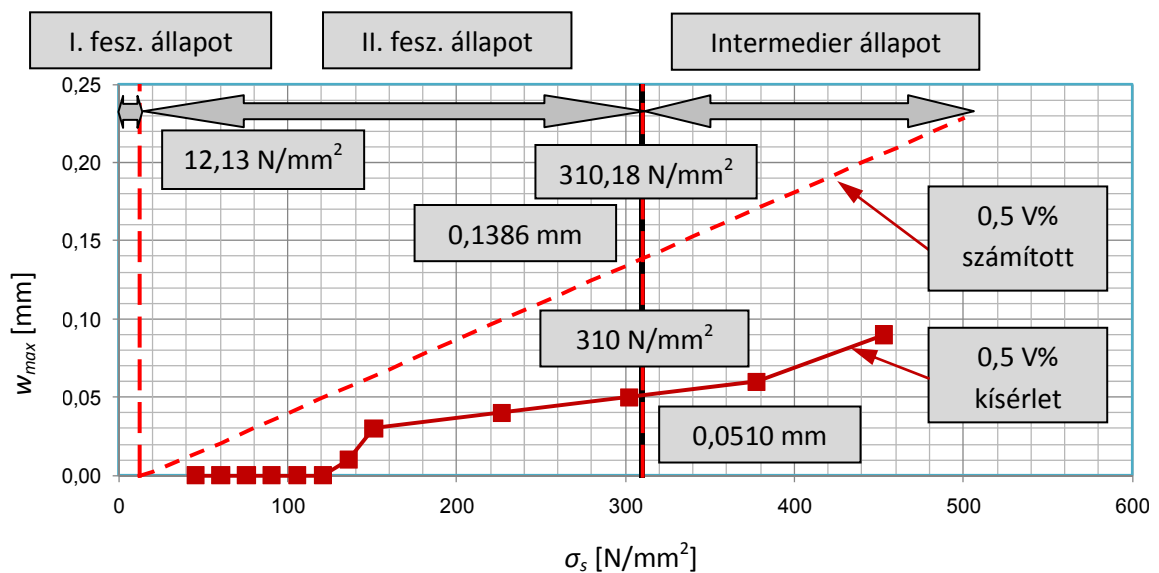
5.2 Repedéstágasság meghatározása

A repesztőnyomaték elérését követően az acélbetétekben ébredő feszültség változásokat lineárisnak tekinthetjük. Ezen acélfeszültség értékekben határoztuk meg a repedések tágasságát.

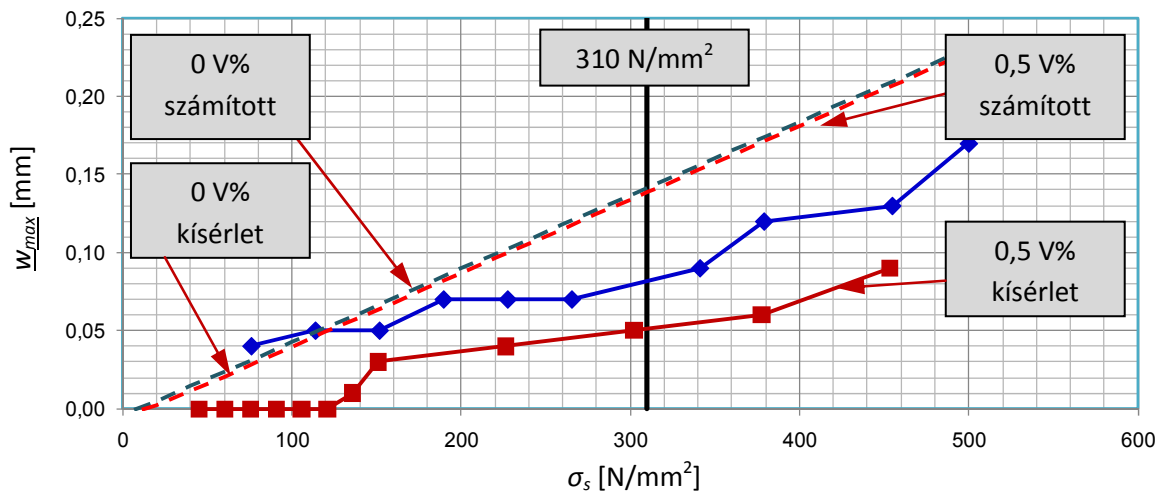
A kapott eredményekből egyértelműen látszik, hogy a jelenlegi szabvány csupán a keresztmetszet geometriai és az alkotók anyagjellemzői alapján veszi figyelembe a repedezettségi állapotot, az egyéb – a teherbírást növelő – erősítő hatásokat egyáltalán nem. Az adatok kiértékelése során arra a megállapításra jutottunk, hogy a két különböző anyagi tulajdonsággal rendelkező betonkeresztmetszet, a repedezettségi állapotát illetően a szabvány szerint számított eredmények között szinte elhanyagolható mértékű különbség mutatkozik. Ez azzal magyarázható, hogy a száladagolás hatására a tervezett betonreceptúrák kísérleti úton mért szilárdsági értékei is igen kis mértékben térnek el egymástól. Ez az eltérés a repedéstágasságnál 2% csökkenést mutat a nagyobb szilárdsági értékekkel rendelkező 0,5 V% száltartalmú betonkeverék felé. Viszont a kísérleti eredmények igazolták azt a feltevésünket, miszerint acélszál erősítés hatására a húzott beton öv merevítő hatása lényegesen megnő. Ez a húzott betonacélok magasságában mért repedéstágasságok csökkenéséhez vezetett, melynek mértéke a szálerősítést nem tartalmazó próbatesthez képest 38% csökkenés. Az összehasonlításból egyértelműen látszik, hogy (közel) azonos szilárdsági értékekkel rendelkező betonok esetében a száladagolás hatásával szabvány szinten érdemes foglalkozni (5., 6., 7. Ábra).



5. ábra: Repedéstágasságokat összehasonlító diagram a szálerősítést nem tartalmazó betonkeverék kísérleti illetve számított eredményei alapján [12]



6. ábra: Repedéstágasságokat összehasonlító diagram a szálerősítést tartalmazó betonkeverék kísérleti illetve számított eredményei alapján [12]



7. ábra: Repedéstágasságokat összehasonlító diagram mindkét betonkeverék kísérleti illetve számított eredményei alapján [12]

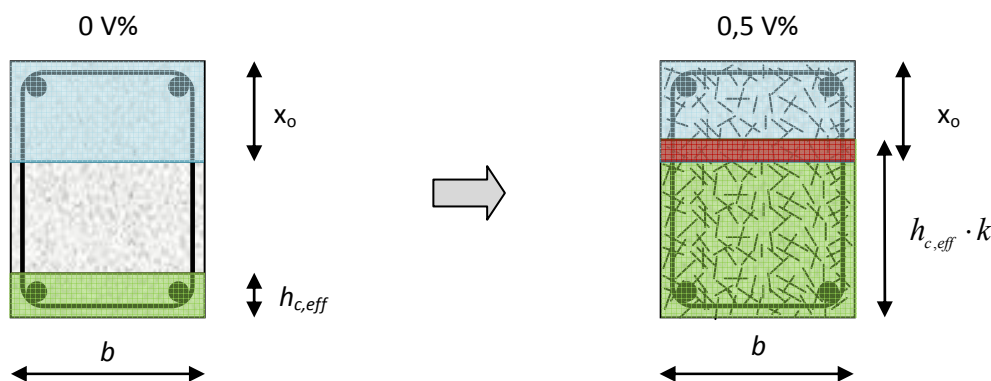
6. A REPEDÉSTÁGASSÁG MODELLJÉNEK KITERJESZTÉSE ACÉLSZÁL ERŐSÍTÉSŰ GERENDÁKRA

6.1 Maximális repedéstávolság kiterjesztése acélszál erősítésű gerendákra

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) [3] szabvány részletes repedéstágasság számításában szereplő maximális repedéstávolság képletét használtuk fel.

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \sigma}{\rho_{p,eff}}$$

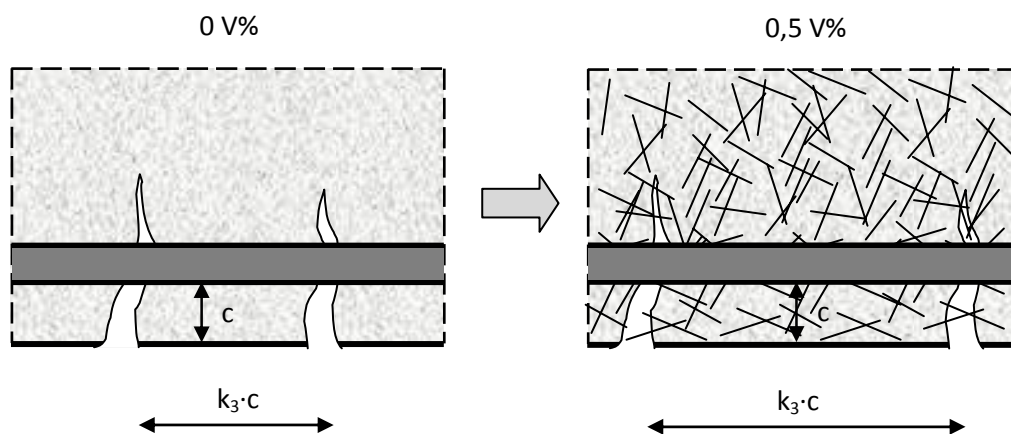
Először az acélbetétek keresztmetszeti területének és a hatékony húzott beton keresztmetszet – berepedt állapotban – hányadosát vizsgáltuk meg ($\rho_{p,eff}$). Első felvetésünk szerint az acélszálak merevítő hatását a hatékony húzott beton keresztmetszet növekedésével kívántuk figyelembe venni. A modellben az általunk bevezetett új tényező („ k ”) a húzott öv merevítő hatását a hatékony húzott beton öv magasságának ($h_{c,eff}$) növelésével biztosítja. Számításaink alapján azonban arra a következtetésre jutottunk, hogy ez a magasság az acélszál erősítés hatására többszörösére (3-4 szeres növekedés) növekedne, ami már a keresztmetszet nyomott zónájába is belenyúlna (8. ábra). A húzott beton öv merevítő hatásának a figyelembe vétele a hatékony húzott öv keresztmetszeti területének önmagában történő megnövelésével így nem szolgáltat jó megoldást (8. ábra).



8. ábra: A húzott beton öv magasságának változása az első feltevés alapján

6.1.1 Modellalkotáshoz felhasznált összefüggés és indoklása

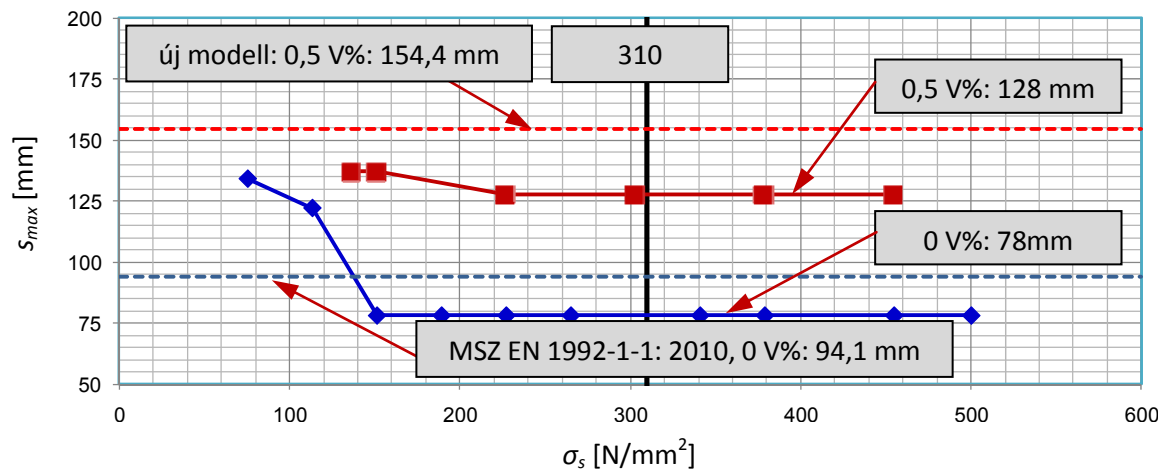
Tekintettel arra, hogy a megnövelt hatékony húzott keresztmetszeti terület figyelembe vételének gondolata nem nyújtott megoldást, a továbbiakban a maximális repedéstávolság hatását a vizsgált összefüggésben szereplő, az egyes repedések távolságát a húzott acélbetéteken lévő betonfedés függvényében megadó $k_3 \cdot c$ tagban kerestük. 0 V% acélszáltartalmú gerendák esetében elvégzett számításaink alapján meggyőződünk arról, hogy a maximális repedéstávolság összefüggésében szereplő $\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \sigma}{\rho_{p,eff}}$ tag a maximális repedéstávolság értékének mindössze kb. 15-20%-át teszi, így a kísérleti úton tapasztalt jelenség figyelembe vétele a $k_3 \cdot c$ tag módosításában rejlik (9. Ábra).



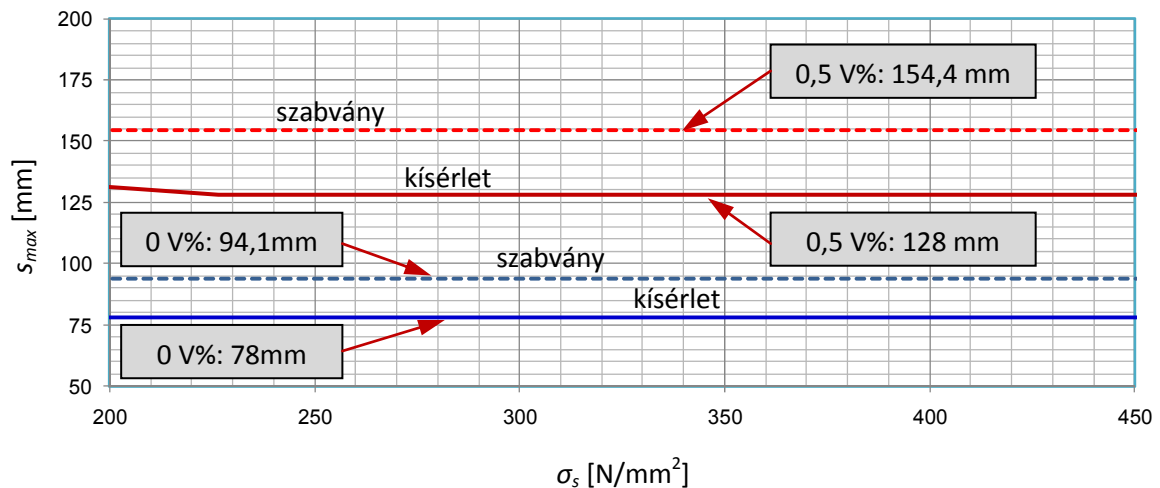
9. ábra: Repedéstávolság változása a szálerősítés hatására

6.1.2 Modell bemutatása

Mind a száltartalom nélküli, mind pedig a 0,5 V% száltartalommal rendelkező gerendák esetében leolvastuk a 310 N/mm² acélbetétben ébredő feszültség értékéhez tartozó, kísérleti eredményekből származó maximális repedéstávolságot. A száltartalom nélküli gerenda repedéstávolságát az MSZ EN 1992-1-1: 2010 [3] szabvány maximális repedéstávolságra vonatkozó összefüggéséből ki tudjuk számítani. (Ezen érték is 310 N/mm² acélfeszültséghez tartozik.) Mivel ~200 N/mm²-től konstans értékek szerepelnek, ezért a függvények egyenesnek tekinthetők ezen a szakaszon. A száltartalom nélküli gerendák esetében így egyértelműen meghatározható a szabvány szerinti számítás, illetve a kísérlet alapján meghatározott maximális repedéstávolságok aránya. Ez pedig azt eredményezi, hogy a 0,5 V% száltartalmú kísérlet alapján meghatározott repedéstávolság értékéhez egyértelműen hozzárendelhető egy a szabvány szerinti maximális repedéstávolság értéke, mely ugyancsak egy konstans egyenest fog eredményezni. Megállapítható volt, hogy a 0,5 V% száltartalommal rendelkező gerenda esetében a maximális repedéstávolság 40% növekményt eredményez a száladagolással nem rendelkező gerendákhoz képest. Ezt mutatja a 10. és 11. Ábra.



10. ábra: 0,5 V% szártartalommal rendelkező gerendához tartozó szabvány szerinti maximális repedéstávolsága



11. ábra: 0,5 V% szártartalommal rendelkező gerendához tartozó szabvány szerinti maximális repedéstávolság modellje

6.1.3 A „ k_3 ” tényező kiterjesztése szálerősített betonokra

A modell alkalmazhatóságának feltétele, hogy megtaláljuk azt a paramétert, melynek az összefüggésben való alkalmazása esetén nő a maximális repedéstávolság az acélszál tartalom növelésével. Ennek a hatásnak a figyelembe vételét a „ k_3 ” tényezőben láttuk, amely a húzott acélbetéteken lévő betonfedés többszörösében értelmezi az egyes repedések közötti távolságot. Kísérleti eredmények alapján kifejeztük a „ k_3 ” tényező értékét 0,5 V% acélszál tartalmú elemek esetében:

$$S_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \varnothing}{\rho_{p,eff}} \Rightarrow k_3 = \frac{S_{r,max} \cdot \rho_{p,eff} - k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \varnothing}{\rho_{p,eff} \cdot c} \Rightarrow k_3 \approx 6,10$$

Vizsgálataink alapján javaslatunk a szálerősítés hatásának figyelembe vételére a „ k_3 ” tényező megnövelése.

Összefoglalva a száladagolás hatását, a szabvány összefüggésében a „ k_3 ” tényező módosításával javasoljuk figyelembe venni:

- 0 V% \longrightarrow $k_3=3,40$
- 0,5 V% \longrightarrow $k_3=6,10$

6.2 Maximális repedéstágasság kiterjesztése acélszál erősítésű gerendákra

Modellalkotáshoz felhasznált összefüggés és indoklása

Kiindulásként a szabvány alapján meghatározott repedéstágasság részletes számítását vizsgáltuk:

$$w_k = s_{r,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Kísérleti eredmények alapján meghatároztuk, ill. rendelkezésre álltak az egyes teherszintekhez tartozó maximális repedéstávolság valamint a maximális repedéstágasság értékei. Felhasználva a szabványban szereplő összefüggést, a kísérleti úton meghatározott mennyiségekből kifejeztük a repedések közötti acélbetét és beton elem fajlagos alakváltozásának különbségét:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{w_{\max}}{s_{\max}}$$

Tekintettel arra, hogy a fajlagos alakváltozás-különbség összefüggése a beton húzott övének merevítő hatásával módosítja a húzott acélbetétekben ébredő feszültséget – és alakváltozási értéket:

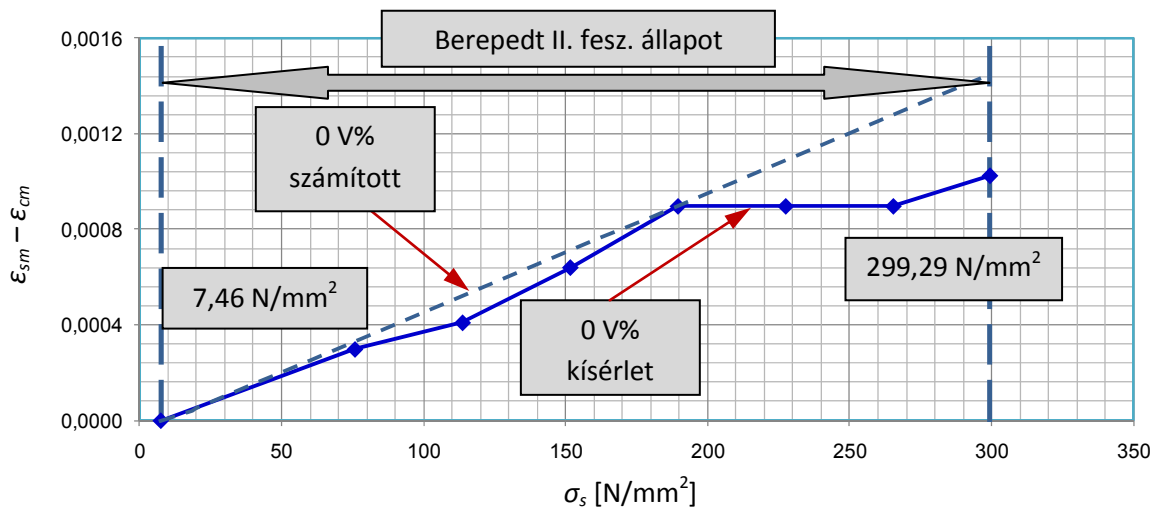
$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}) \cdot k_f}{E_s}$$

a kísérleti úton és szabvány szerinti számítással nyert fajlagos alakváltozás-különbség – $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ mennyiség – lehetőséget ad az acélszál erősítés hatásának figyelembe vételére. Feltevésünket azzal indokolhatjuk, hogy a lineárisan rugalmas, inhomogén keresztmetszetekben – így a vasbeton keresztmetszetekben és vélhetően az acélszál erősítésű keresztmetszetekben is – az egyes alkotó elemekben ébredő feszültségek az egyes rugalmassági modulusokkal valamint térfogatarányukkal arányosan vesznek részt az erőjátékban (keverési szabály):

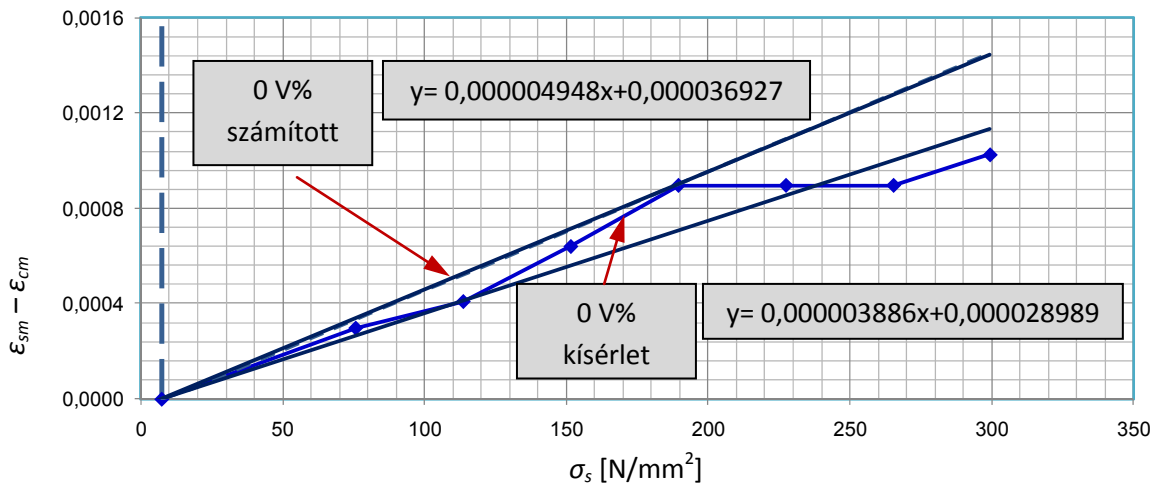
$$\begin{aligned} E_{cf} &= (1 - V\%) \cdot E_c + V\% \cdot E_f \\ \varepsilon \cdot E_{cf} &= \varepsilon \cdot (1 - V\%) \cdot E_c + \varepsilon \cdot V\% \cdot E_f \\ N_{cf} &= N_c + N_f \end{aligned}$$

Modell bemutatása

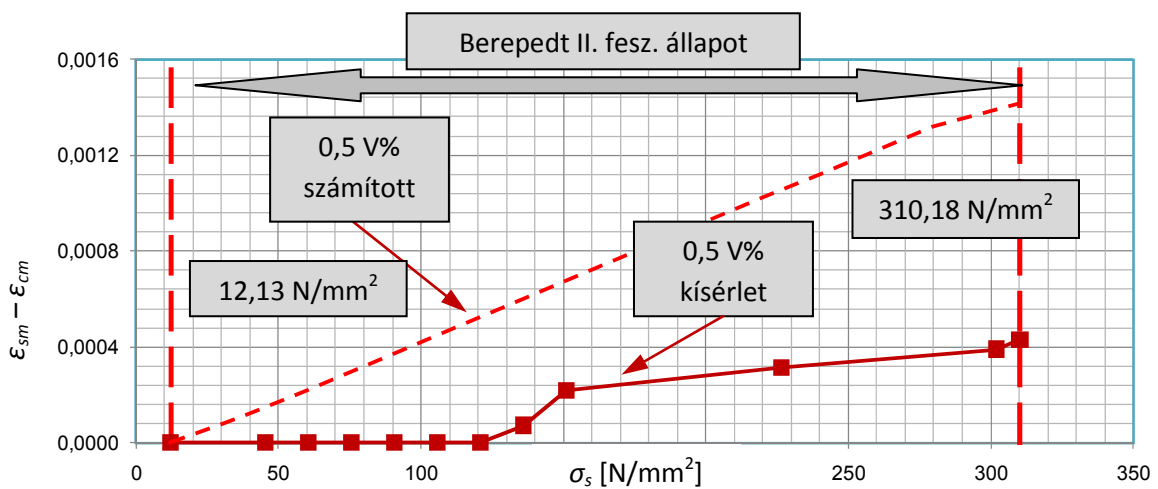
Az $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ különbség értékeit diagramban (12. Ábra) foglaltuk össze. A száltartalom nélküli vasbeton gerendák $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ megnyúlás értékei közel azonos eredményeket mutatnak a szabvány illetve a kísérlet alapján számítva, hiszen ezekben az összefüggésekben magának a szálaknak a hatása nem, csak az anyagjellemzők hatása érvényesül. Jelen függvényeket lineáris trendvonalakként közelítettük, melyek abból a kezdő feszültségből indulnak ki, ami számításaink alapján a repesztönnyomatékhoz tartozik (13. Ábra). Eredményeink alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy a szálerősítést is tartalmazó gerendák esetén a szabvány szerint és a kísérleti eredmények alapján számított eredmények között igen nagy eltérés van. A modell acélszál erősítésű elemekre történő kiterjesztésével célunk az volt, hogy a húzott betonacél és a beton fajlagos megnyúlásának különbsége összefüggésben paraméter bevezetésével az $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ megnyúlás értékében figyelembe vehető legyen a szálerősítés hatása (14. Ábra).



12. ábra: Acél – ill. beton fajlagos megnyúlás különbségének értékei kísérlet és szabvány szerint, 0 V% szártartalom esetén



13. ábra: Acél – ill. beton fajlagos megnyúlás különbségének értékei kísérlet és szabvány szerint, 0 V% szártartalom esetén lineáris közelítéssel



14. ábra: Acél – ill. beton fajlagos megnyúlás különbségének értékei kísérlet és szabvány szerint, 0,5 V% szártartalom esetén

A 0,5 V% száltartalmú kísérleti görbét is lineáris trendvonalal közelítettük a modell kiterjesztéséhez. Ezután a szálerősítés nélküli eredményekből kiszámított aránnyal hozzárendeltük a 0,5 V% száltartalmú lineáris egyenessel közelített függvényhez a hozzá tartozó szabvány szerinti függvényt, amely már a szálerősítés hatását is figyelembe veszi.

A „ k_f ” tényező meghatározása

A kísérleti és számítási eredmények alapján a szabványban szereplő $\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$ összefüggést célszerűnek tűnt egy a szálak hatását is figyelembe vevő „ k_f ” tényezővel kiegészíteni, mely tényező értéke szálerősítést nem tartalmazó elemek esetén 1. A „ k_f ” tényezőt az alábbi átrendezéssel fejeztük ki és határoztuk meg:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_f \cdot k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad , \quad (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot E_s = \sigma_s - k_f \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}) \cdot k_f$$

$$k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}) \cdot k_f = \sigma_s - (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot E_s \quad , \quad k_f = \frac{\sigma_s - (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot E_s}{k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}$$

ahol,

$$k_t = 0,4 \quad , \quad f_{ct,eff} = f_{cm} = 2,457 \text{ N/mm}^2 \quad , \quad \rho_{p,eff} = \frac{A_{s,prov}}{A_{c,eff}} = \frac{402}{2879} = 0,140$$

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2 \quad , \quad \alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{22400} = 8,93$$

A II. feszültségi állapotban kiválasztott acélbetétben ébredő feszültség megadása mellett:

$$\sigma_s = 200 \text{ N/mm}^2$$

Ehhez tartozó $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ érték, mely a diagramból olvasható le:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 2,85559 \cdot 10^{-4}$$

„ k_f ” tényező kifejezve:

$$k_f = \frac{\sigma_s - (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot E_s}{k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})} \quad , \quad k_f = \frac{200 - 2,85559 \cdot 10^{-4} \cdot 200000}{0,4 \cdot \frac{2,457}{0,140} \cdot (1 + 8,93 \cdot 0,140)} \approx 9,00$$

Ezen „ k_f ” tényező tehát egy olyan kísérleti úton meghatározott paraméterként vehető figyelembe, mely az acélszálerősítés hatásával növeli a húzott öv merevítő hatását, csökkentve a húzott acélbetétekben ébredő feszültséget. Összegezve, a következő eredményeket kapjuk:

- 0 V% \longrightarrow $k_f = 1,00$
- 0,5 V% \longrightarrow $k_f = 9,00$

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerkezeti beton napjaink egyik legelterjedtebb építőanyaga. Teljesítőképességének növelése – a fokozódó környezeti hatások mellett – a folyamatosan növekvő ipari igényekre való tekintettel állandó kihívást jelent. A szerkezet használati élettartamát meghatározó tartóssági jellemzők alapvetően a használhatósági határállapotok vizsgálata során jelentenek erőtanijellegű vonatkozásokat. Vasbeton szerkezetek esetén a repedezettségi állapot pontos vizsgálata jelenti az egyik meghatározó feladatot, melyet a dolgozatunkban ismertetett repedéstágasság számítási modell acélszál erősítésű elemekre történő kiterjesztésével kívántunk szolgálni.

Tudományos Diákköri dolgozatunk elkészítéséhez korábbi kísérleti eredményeket használtunk. A kísérleteket 1995 és 1996 között a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának Vasbetonszerkezetek Tanszékén végezték Dr. Balázs L. György, Dr. Erdélyi László és Dr. Kovács Imre közreműködésével. Célunk az **MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész Általános és az épületekre vonatkozó szabályok)** [3] szabvány használhatósági határállapotáról szóló 7. Fejezetében ismertetett repedéstágasság meghatározására szolgáló modelljének (7.3.1–7.3.4) kiterjesztése volt acélszál erősítésű vasbeton gerendákra.

A vizsgált eredmények alapján megállapítható, hogy az acélszál erősítésű vasbeton gerendák terhelése során a repedések maximális távolsága egy bizonyos teherszint felett – a szálerősítést nem tartalmazó gerendákhoz hasonlóan – nem változik. A repedések távolsága nagyobb, mint a száltartalom nélküli betonoké. A repedések tágassága 0,5 V% acélszál tartalom esetén csökkent a szálerősítést nem tartalmazó betonhoz képest.

A kísérleti eredmények feldolgozása alapján megállapítható, hogy száladagolás hatását érdemes figyelembe venni a használhatósági határállapotban elvégzett repedéstágasság részletes vizsgálata során.

A kísérleti eredmények nagy számára való tekintettel az utóbbi időszakban nem került teljes részletezettséggel feldolgozásra a gerendák terhelés során mért és vizsgált repedezettségi állapotára vonatkozó adatbázis. Ennek megfelelően dolgozatunk elkészítése során az acélszál erősítésű vasbeton gerendák **repedezettségi állapotával, a repedések tágasságával és azok távolságával** foglalkoztunk. **Célunk** tehát az volt, hogy a rendelkezésre álló kísérleti adatok és elméleti megfontolások alapján ezt a kedvező jelenséget a számítási eljárásokba beépítsük.

Tudományos Diákköri dolgozatunk eredményét az alábbi kutatási folyamatok elvégzése után kaptuk meg. Először a rendelkezésünkre bocsátott **kísérleti eredményeket grafikus illetve numerikus módon feldolgoztuk.** Ezután a kísérletben szereplő acélszál erősítésű betonból készült próbatestek mért anyagi jellemzőivel elvégeztük a **szabvány szerinti részletes repedéstágasság számítását.** Majd a feldolgozott kísérleti eredményeket összevetve a szabvány szerint számított eredményeinkkel, **új modellek megalkotásával** a szabvány szerinti számítási eljárást kiterjesztettük az acélszál erősítésű vasbeton keresztmetszetekre.

Tudományos kutatásunk eredménye az MSZ EN 1992-1-1:2010 szabvány [3] repedéstágasság számítási modelljének kiterjesztése acélszál tartalmú vasbeton gerendákra. A szálerősítés hatását a maximális repedéstávolság modelljében egy már meglévő, a „ k_3 ” tényező kiterjesztésével, illetve a húzott acélbetétek és a beton öv megnyúlás különbségének modelljében egy új tényező („ k_f ”) bevezetésével javasoljuk figyelembe venni:

$$s_{r,\max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \emptyset}{\rho_{p,\text{eff}}} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ V\% } \quad k_3 = 3,40 \\ 0,5 \text{ V\% } \quad k_3 = 6,10 \end{array} \right.$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_f \cdot k_i \cdot \frac{f_{ct,\text{eff}}}{\rho_{p,\text{eff}}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,\text{eff}})}{E_s} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ V\% } \quad k_f = 1,00 \\ 0,5 \text{ V\% } \quad k_f = 9,00 \end{array} \right.$$

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Dolgozatunk nem készülhetett volna el Dr. Kovács Imre tanszékvezető, főiskolai tanár segítségével, és biztatása nélkül. A közös munka folyamán megismerkedtünk a kutató munka szépségeivel, és számtalan új ismerettel lettünk gazdagabbak.

AZ ELVÉGZETT MUNKÁT ÉS A MEGJELENÉST AZ OKTATÁSÉRT
KÖZALAPÍTVÁNY TÁMOGATTA AZ NTP-OKA-XXII-038 PÁLYÁZAT ALAPJÁN.



9. HIVATKOZÁSOK

- [1] **Kovács, I.**, "Acélszálalású vasbeton gerendák viselkedése", TDK dolgozat, Budapesti Műszaki Egyetem, 1995/1996, Vasbetonszerkezetek Tanszéke
- [2] **Kovács, I.**, "Effect of steel fibres on the structural performance of concrete members" Doctoral (PhD) thesis, University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2005.
- [3] **MSZ EN 1992-1-1: 2010 – EUROCODE 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok 7. Fejezet (7.3.1-7.3.4)**
- [4] **Kovács, I.**, "Beton szívósságának növelése acélszálakkal", Diplomamunka, 1996, Budapesti Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vasbetonszerkezetek Tanszéke
- [5] **Kovács, I., Balázs, Gy., L., Erdélyi, L.**, "Fiber Reinforced Prestressed Concrete", Proceedings of the FIP Symposium 1997 Johannesburg, Vol.1, pp.223-232.
- [6] **Kovács, I., Balázs, Gy., L.**, "Increase in shear strength of beam by applying fiber reinforcement", Proceedings in honour of Prof. Mehlhorn's 65 birthday, Sept. 1997, pp.10-17.
- [7] **Kovács, I.**, "Shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams", Proceedings of the First International Conference of Ph.D. Students, Miskolc, Hungary, August 1997.
- [8] **Kovács, I., Erdélyi, L., Balázs, L., Gy.**, "Acélszálalású vasbetongerendák törési viselkedése", BME Vasbetonszerkezetek Tanszékének Tudományos Közleményei, 1997., Budapest, pp.119-130.
- [9] **Kovács, I., Balázs, Gy., L.**, "Flexural behavior of RC and PC beams with steel fibers", Proceedings of the 5th RILEM Symposium on HPFRCC Mainz, May 15-19. 1999. pp.
- [10] **Kovács, I., Gy., L., Balázs,** "Concrete members with Traditional Reinforcement and Fibers", Proceedings of the fib Symposium Prague, Oct. 13-15. 1999. pp. 247-253.
- [11] **Kovács, I., Erdélyi, L., Balázs, L., Gy.**, "Vasbeton gerendák törési viselkedése acélszálalású és hagyományos vasalás egyidejű alkalmazása esetén", Szálalású betonok – a kutatástól az alkalmazásig – Konferencia kiadvány, Budapest, 1999. március 4-5., pp. 139-151.
- [12] **Kovács, I., Gy., L., Balázs,** "Effect of steel fibres on the cracking behaviour of RC members" Proceedings of the sixth RILEM Symposium on fibre reinforced concrete, Bergamo, Italy, 2004., Vol. 2. pp. 1007-1016.

ACÉLSZÁL ERŐSÍTÉSŰ VASBETON GERENDÁK REPEDEZETTSÉGI ÁLLAPOTA

CRACKIG BEHAVIOUR OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAMS

A szerkezeti beton napjaink egyik legelterjedtebb építőanyaga. Teljesítőképességének növelése – a fokozódó környezeti hatások mellett – a folyamatosan növekvő ipari igényekre való tekintettel állandó kihívást jelent. A szerkezet használati élettartamát meghatározó tartóssági jellemzők alapvetően a használhatósági határállapotok vizsgálata során jelentenek erőteni jellegű vonatkozásokat. Vasbeton szerkezetek esetén a repedezettségi állapot pontos vizsgálata jelenti az egyik meghatározó feladatot, melyet a dolgozatunkban ismertetett repedéstágasság számítási modell acélszál erősítésű elemekre történő kiterjesztésével kívántunk szolgálni.

A szerzők Tudományos Diákköri dolgozatukban korábbi kísérleti eredményeket használtak. A kísérleteket 1995 és 1996 között a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának Vasbetonszerkezetek Tanszékén végezték Dr. Balázs L. György, Dr. Erdélyi László és Dr. Kovács Imre közreműködésével. Céljuk az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész Általános és az épületekre vonatkozó szabályok) [3] szabvány használhatósági határállapotáról szóló 7. Fejezetében ismertetett repedéstágasság meghatározására szolgáló modelljének (7.3.1–7.3.4) kiterjesztése volt acélszál erősítésű vasbeton gerendákra.

A vizsgált eredmények alapján megállapították, hogy az acélszál erősítésű vasbeton gerendák terhelése során a repedések maximális távolsága egy bizonyos teherszint felett – a szálerősítést nem tartalmazó gerendákhoz hasonlóan – nem változik, a repedések távolsága nagyobb, mint a száltartalom nélküli betonoké, továbbá a repedések tágassága 0,5 V% acélszál tartalom esetén csökkent a szálerősítést nem tartalmazó betonhoz képest.

A kísérleti eredmények feldolgozása alapján megállapították, hogy szaladagolás hatását érdemes figyelembe venni a használhatósági határállapotban elvégzett repedéstágasság részletes vizsgálata során.

A kísérleti eredmények nagy számára való tekintettel az utóbbi időszakban nem került teljes részletezettséggel feldolgozásra a gerendák terhelés során mért és vizsgált repedezettségi állapotára vonatkozó adatbázis. Ennek megfelelően dolgozatuk elkészítése az acélszál erősítésű vasbeton gerendák repedezettségi állapotának, a repedések tágasságának és azok távolságának modellje újszerű, mely lehetőséget ad a szabványban szereplő összefüggések kiterjesztésére, általánosítására.

A szerzők új tudományos eredményeiket azok újszerűségére való tekintettel a jövőben szakmai folyóiratokban leközölhetik. Megállapításaik jelentős eredményt jelentenek a szálerősítésű betonok szerkezeti elemekben történő alkalmazása terén, mivel a repedezettségi állapot leírására vonatkozó összefüggések a jelenleg érvényes szabványban ezen anyagokra vonatkozóan nem szerepelnek. A tudományos eredmények a közvetlen szakmai alkalmazás lehetősége mellett oktatási segédletben is hasznosan érvényesülhetnek.

A dolgozat szerzőinek szakmai előmenetelét elsősorban a szerkezettervezés területén támogatja az elkészült munka, hiszen olyan ismeretekkel rendelkeznek, melyek az iparban dolgozó kollégák számára hasznosíthatók. OTDK helyezésük MSc szintű tanulmányok folytatása esetén a felvételi szabályzatokban rögzített többletpontokat eredményez, mellyel sikeres felvételijük esélyei javulnak.

*Dr. Kovács Imre főiskolai tanár
sk.*