



A SZINTETIKUS SZÁLERŐSÍTÉS HATÁSA A BETON TÖRÉSI ENERGIÁJÁRA

*A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen
a PhD fokozat követelményeinek részleges teljesítéséeként
benyújtott disszertáció rövid összefoglalója*

Juhász Károly Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

2018

1. Bevezetés

A szálerősítésű beton (Fibre Reinforced Concrete – FRC) a kompozit anyagok csoportjába tartozik, ahol a mátrix a beton, a szálak pedig a betonba kevert különféle alakú (egyenes, kampós, hullámos, stb.) és anyagú (acél, polipropilén, üveg, stb.), a beton elem méretéhez képest rövid szálak. A szálakat a friss betonban elkeverik, ennek során feltételezzük a tökéletes és egyenletes elkeveredést. A beton öntése során azonban a felületek (zsaluzatok) közelében a szálak orientációja megváltozik, irányítottá válik. Ezt a hatást a szakirodalom zsaluhatásnak (wall-effect) nevezi. A zsaluhatást jelenleg nem veszik figyelembe a szabványos gerendakísérletek kiértékelésénél.

Dolgozatom első részében modellt készítettem a merev (acél) és hajlékony (szintetikus) szálak elkeveredésének a vizsgálatára és a zsaluhatás figyelembe vételére. Az elkeveredési modell alapján számított értékeket kísérleti eredményekkel verifikáltam. Az elkeveredési modell alapján egy új kiértékelési módszert fejlesztettem ki, amely figyelembe veszi a szálak elhelyezkedését, ezáltal pontosabb eredményeket ad.

Az elkevert szálak a beton törése során megnövelik a beton törési energiáját. A szálerősítésű beton törési energiája így két részre bontható: a szálerősítés nélküli beton mátrix törési energiájára és a szálak által hozzáadott törési energiára. Felmerül a kérdés, hogy ez a hozzáadott törési energia szálra jellemző érték vagy függ a betontól is? A beton mátrix önmagában is egy kétfázisú anyag, amely a kavicsvázból és az azt körülvevő habarcsból (cementpép és homok) áll. A szálak a beton mátrixszal való kapcsolata a szálak és a habarcs közötti kapcsolattól függ. Az elvégzett vizsgálatok kiterjednek a szálak és beton habarcsának kapcsolatára, az adalékanyag méretének

hatására, a beton törési energiájának és a szálerősítés hozzáadott törési energiájának a kapcsolatára, továbbá a szálak hosszának a hatására.

Dolgozatom második részében egy törési energián alapuló új anyagmodellt, majd laboratóriumi kutatásokat és azoknak az eredményeit mutatom be. Az acél és szintetikus szálerősítések hasonlóságait és különbségeit prezentálom, majd értékelem. A szálak hatását vizsgálom olyan betonokban, ahol a habarcs fázis azonos, de az adalékanyag váz különböző, majd vizsgálom a szálak adagolásának, illetve a szálak hosszának a hatását is.

2. Szálak anyaga és tulajdonsága, szálerősítésű beton vizsgálati módszerei

Anyaguk szerint az ACI 544 (2002) négy fő csoportba sorolja a szálakat (SFRC – acél szálak, GFRC – üveg szálak, SNFRC – szintetikus szálak, NFRC – természetes szálak), míg a polipropilén szálakat geometriai méretük alapján (szálak átmérője) a brit BS EN 14889 nevű szabvány (B/517 Technical Committee, 2006) másik két fő csoportba sorolja: mikroszálak (átmérő $< 0,30\text{mm}$) és makroszálak (átmérő $> 0,30\text{mm}$).

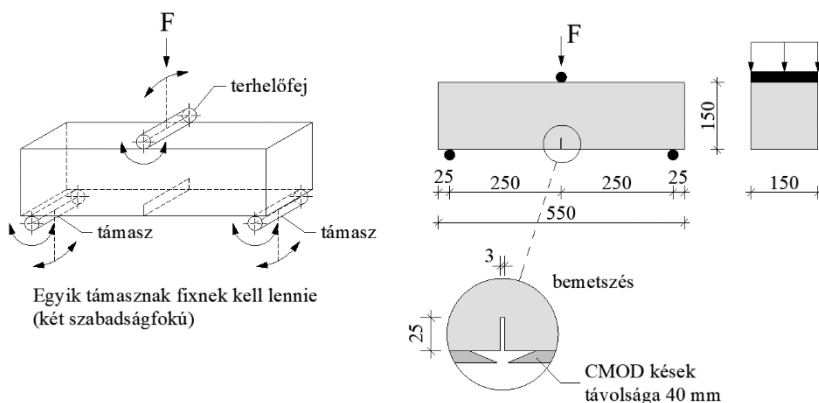
Anyaguk alapján a legelterjedtebb száltípusok az acél és a szintetikus szálak. Ezeket összehasonlítva találhatóak előnyök és hátrányok is mindkét száltípus használata esetében. A szénlábnyom (carbon footprint) értékeket vizsgálva a szintetikus szálaknál jobb eredményeket kapunk, mint az acél esetében (Bernard, 2009). Kivitelezési oldalról a szállítás és bedolgozhatóság kapcsán is a szintetikus szálak az előnyösebbek (Juhász, 2014). A szálak anyagparamétereit vizsgálva azonban már az acélszálak értékei kedvezőbbek.

A szintetikus szálak használata ellen szól az anyag viszko-elasztikus volta, alacsony rugalmassági modulusa (acél: 210 GPa, polipropilén: 3-10 GPa), illetve az acélhoz viszonyított alacsony olvadási pontja (acél: +1500 C°, polipropilén: +120-200 C°) (Zheng and Feldman, 1995; Kusterle, 2009). Ezen tulajdonságok ellenére a szálerősítésű beton, mint kompozit anyag tulajdonsága más, mint amire az alkotó anyagok tulajdonságaiból következtetni lehet.

A legfontosabb előnye a szintetikus szálaknak a korróziómentesség. Már berepedt acél szálerősítésű betonoknál is megjelenhet a korrózió (Jen and Ostertag, 2016), akár 0,1 mm-es repedéstágasságnál is (Nordström, 2000). Az acélszálak korróziója az elem szilárdságát is ronthatja, illetve a felületen megjelenhetnek rozsdafoltok is (Balouch, 2010).

A szálerősítésű beton fontosabb időfüggő mechanikai tulajdonsága a kúszás és az öregedés. A szálerősítésű beton, mint kompozit anyag kúszása jelentkezik mind az acél, mind a szintetikus szálak esetében is. Ebből adódóan a kúszást nem csak a szálak anyagi szintű kúszása okozza, hanem a betonban való mechanikai viselkedése is: a szálak kihúzódása. A szálerősítésű betonok kúszása jelenleg is fontos kutatási terület. Az acél és szintetikus szálerősítésű betonok öregedését Bernard (2008) vizsgálta. Kutatásai szerint az acél szálerősítésű betonok idővel veszítenek a duktilitásukból, míg a szintetikus szálakkal erősített betonoké változatlan, vagy kis mértékben növekszik.

Szálerősítésű betonok főbb anyagvizsgálati eljárásai a tiszta húzóvizsgálat, hajlított gerendavizsgálat, központosan nyomott panelvizsgálat, hasító vizsgálat és a kiékelt hasító vizsgálat. Jelen kutatásban hárompontos hajlítási vizsgálatokat használtam a RILEM TC 162 (Vandewalle et al., 2000) ajánlásai alapján (1. ábra).



1. ábra. Hárompontos (felezőpontos) hajlítási vizsgálat a RILEM TC 162 (Vandewalle et al., 2000) ajánlásai alapján

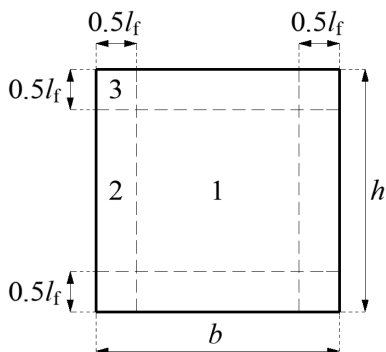
3. Szálak elkeveredésének analitikus modellje

Egységnyi keresztmetszeten áthaladó szálak darabszáma egy fontos paraméter. Romualdi és Mandel is foglalkozott ennek az értéknek a meghatározásával a szálerősítésű beton első fontosabb tudományos cikkében (Romualdi és Mandel, 1964), ahol a szálerősítésű beton viselkedését és a keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámát vizsgálták.

Egyenletes eloszlás feltételezésével, valószínűség-számítás segítségével határozta meg a keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámát Naaman (1972) a doktori disszertációjában. Empirikus eredmények alapján adott számítási módszert Krenchel (1975), aki bevezette az elkevert szálak jellemzésére az orientációs faktort, ami a szálerősítésű anyagmodellek alapjává vált.

A szálak orientációja a zsaluzat közelében megváltozik, ezzel az orientációs faktor is. Ezt a szakirodalom wall-effect-

nek, magyarul zsaluhatásnak nevezi. Az irodalomban jellemzően négyszög keresztmetszetű gerendát vizsgálnak, melyek esetén a zsaluhatás a széleken (egy zsalu) és a sarkokon (két zsalu) lép fel. Dupont és Vandewalle (2005) foglalkozott a zsaluhatás orientációs tényezőre gyakorolt hatásával acélszálak esetében.

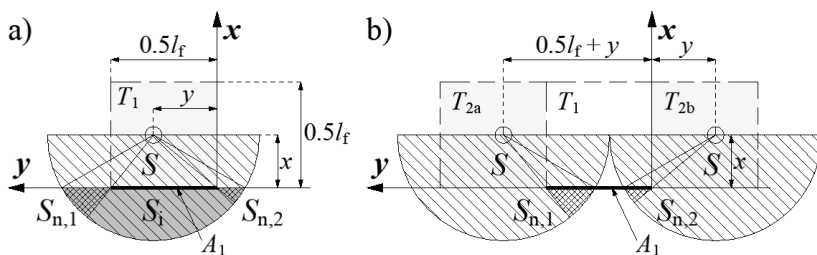


2. ábra. Keresztmetszeti zónák (Dupont és Vandewalle, 2005)

Acél és szintetikus szálak betonban való keveredés szempontjából a lényeges különbség a szálak merevsége: míg az acél szálakat merevnek tekinthetjük, addig a szintetikusakat hajlékonynak. Ezt a különbséget Oh, Kim és Choi (2007) szintetikus szálerősítésű gerendák vizsgálata során nem vette figyelembe, azonban Alberti, Enfedaque és Gálvez (2017) már ajánlást tett a szálak hajlékonyságának a modellezés során való figyelembevételére.

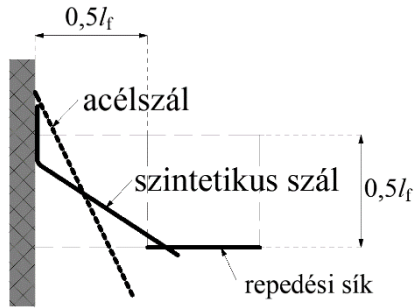
A szálak orientációja a zsaluzat közelében megváltozik, részlegesen irányítottá válik. Ez az irányítottság más acél és szintetikus szálak esetében, emiatt a keresztmetszeten áthaladó szálak darabszáma is eltérő mértékben változik a zsaluzat közelében. A javasolt modell alkalmas merev és hajlékony szálak elkeveredésének figyelembe vételére.

Acélszálak esetében a javasolt modell Naaman (1972) levezetésének a továbbfejlesztése. A modell lehatárolt térrészekben levő szálak dőlésének valószínűségét vizsgálja, mely során figyelembe veszi a szomszédos térrészekből való átnyúlást is (3. ábra). A térrész határán levő zsaluzat esetén bevezetem a kvázi-zsaluhatás fogalmát, mely a zsaluzat melletti szálak átnyúlásának korlátozása miatt jön létre. Megmutatom, hogy így a zsaluzat hatása a keresztmetszet mélyebb részeiben is jelentkezik. A modell eredményei alapján Dupont és Vandewalle (2005) orientációs faktorait módosítom.

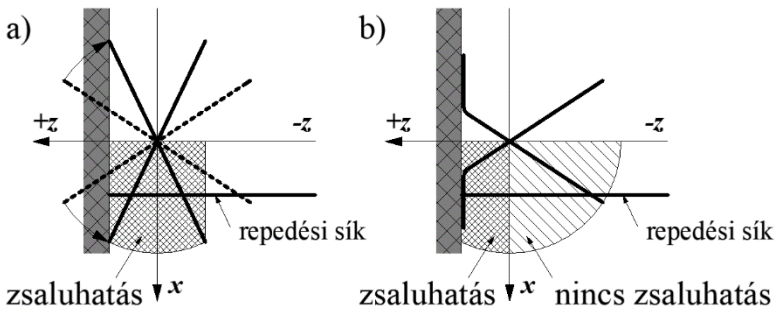


3. ábra. a) A T_1 térrészből A_1 oldallap dőlésének értelmezése
 b) A szomszédos T_{2a} és T_{2b} térrészekből való átnyúlás

Szintetikus szálak esetében a modell feltételezi, hogy a szálak elhajlanak a zsaluval történő találkozás esetén. Emiatt a kvázi-zsaluhatás nem érvényesül (4. ábra), illetve a zsaluhatás is kevésbé befolyásolja a keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámát (5. ábra).

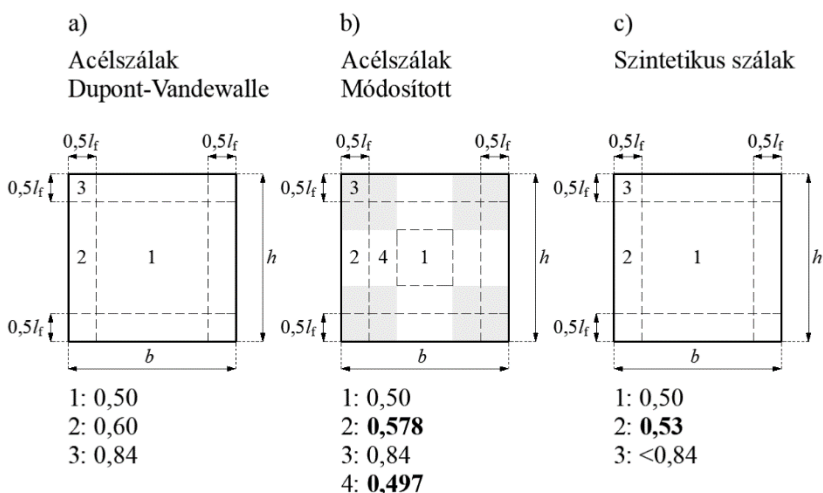


4. ábra. Zsaluhatás esetén a szomszédos térrészbe való átnyúlás értelmezése acél és szintetikus szálak esetén



5. ábra. A zsaluzat hatása a keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámára a) acél és b) szintetikus szálak esetében

A modell eredményei alapján megadom az orientációs faktorokat a keresztmetszet különböző zónáiban (6. ábra). Az eredményeket nagyszámú gerenda vizsgálatokkal verifikáltam.



6. ábra. Keresztmetszeti zónák és a hozzájuk tartozó orientációs faktorkok

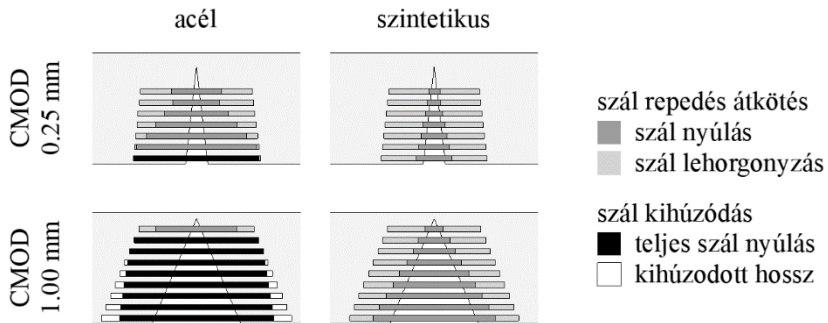
4. A gerenda kísérletek új kiértékelési módszere

A szálerősítésű betonok általánosan elfogadott vizsgálati módszere a három vagy négyponthas gerenda hajlítási vizsgálat, amelynél a mért értékek a terhelő erő, a középponti lehajlás és/vagy CMOD (Crack Mouth Opening Displacement – repedés megnyílás). Ezek a vizsgálatok legtöbb laboratóriumban könnyen elvégezhetőek, habár az eredmények szórása nagy még a legkörültekintőbben elkészített próbatestek esetében is. A zsaluhatás jelentkezik ezeknél a vizsgálati módszereknél, amely kihatással van az eredményekre. Két paramétert definiáltam: szálmunka és szálnyomaték, melyek segítségével a zsaluhatás figyelembe vehető. Egy új kiértékelési módszert mutattam be, ahol a szálak elhelyezkedése figyelembe lett véve a kiértékelés

során. Ezzel a módszerrel pontosabb értékek kaphatóak kevesebb gerenda vizsgálat elvégzésével is.

5. Anyag paraméterek

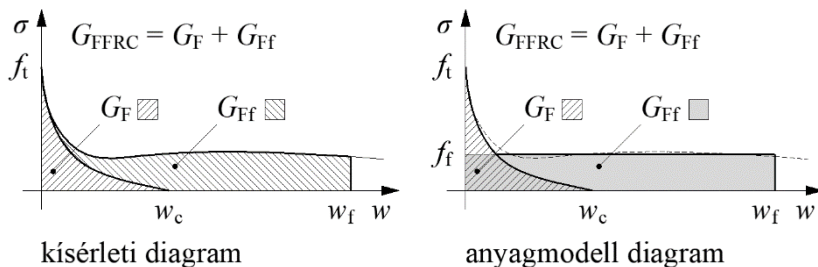
A szintetikus szálak rugalmassági modulusa (8-12 GPa) sokkal kisebb, mint az acél szálaké (210 GPa), ennek ellenére hasonló erő-CMOD diagramokat kaphatunk megfelelő adagolásoknál. Ennek oka a különböző energia abszorpciókban rejlik: amíg az acélszálak kihúzódnak a beton mátrixból, addig a szintetikus szálak átkötik a repedést. Ezeket a különböző viselkedéseket elemeztem hajlított gerenda kísérletekkel.



7. ábra. Szál repedés átkötés és kihúzódás acél és szintetikus szálak esetében

A szálak hatását a szálerősítésű beton törési energiájával adhatjuk meg, mely két részre bontható: a beton törési energiájára és a szálak által hozzáadott törési energiára. Számos ajánlást találunk az irodalomban a beton törési energiájának definiálására, ezekből néhány bemutatásra került. A beton törési energiájának és a szálak által hozzáadott törési energiának az

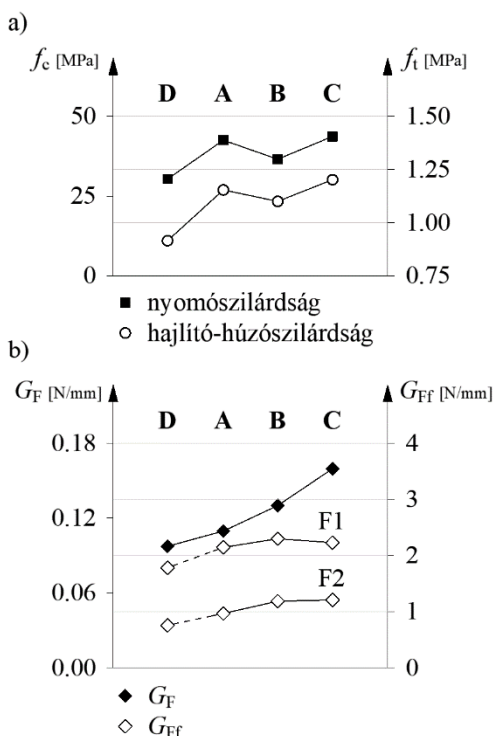
ismeretében a szálerősítésű beton anyagmodellje könnyen megadható.



8. ábra. Szálerősítésű beton kísérleti és anyagmodell diagramja

6. A hozzáadott törési energia és az adalékanyagváz összefüggései

Szintetikus szálak esetében a szálak energia abszorpciója leginkább a szálak kihúzódása a mátrixból, illetve a repedést átkötő szálak nyúlása, amelyet leginkább a szál és a beton habarcs fázisának a kapcsolata definiál. Felmerül a kérdés, hogy a betonba kevert adalékanyagoknak van-e hatása a szálak energia abszorpciójára, azaz a hozzáadott törési energiára. A hozzáadott szálak hatását kísérletekkel vizsgáltam olyan betonokban, ahol a betonok habarcs fázisa azonos, de az adalékanyag váz különböző volt. Ezen kísérletek eredményei kerülnek bemutatásra.



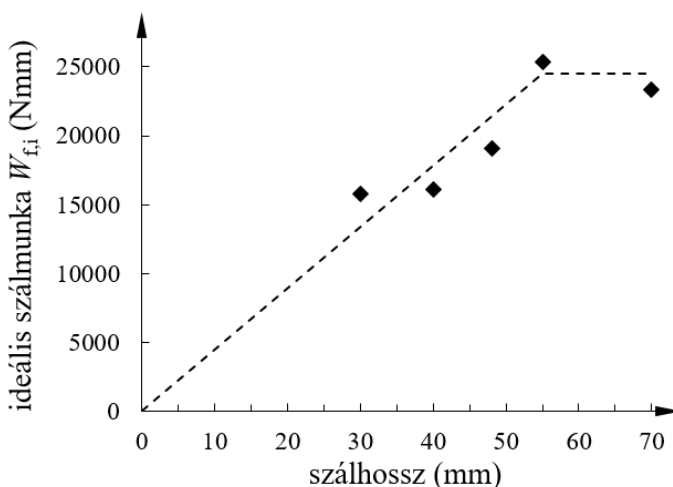
9. ábra. a) Szálerősítés nélküli beton nyomószilárdsága és hajlító-húzószilárdsága [MPa];
 b) Beton törési energiája (G_F) és a szálak által hozzáadott törési energia (G_{Ff}) [N/mm];

7. A szálhossz hatása a hozzáadott törési energiára

A szálak egyik lényeges paramétere a szálhossz. Egy bizonyos lehorgonyzási hossz felett a szálak nem kihúzódnak a mátrixból, hanem elszakadnak. Ezt a szálhosszat kritikus szálhossznak (l_c) nevezik az irodalomban acélszálak esetében, de

hasonlóan használható szintetikus szálak esetében is. A kritikus hosszát kísérletileg határozzák meg. Az optimális szálhossz (l_{opt}) a kritikus szálhossz kétszerese, amely alapján biztosítható, hogy a törési keresztmetszeten áthaladó szálak mindegyike kihúzódjon a mátrixból elszakadás helyett.

Szintetikus szálakhoz tartozó optimális szálhosszat hajlított gerenda kísérlettel vizsgáltam, mely során azonos szálkötegből (roving) készült különböző hosszúságú szálakkal készültek a próbagerendák. A beton összetétele valamint a szálak adagolása minden esetben megegyező volt. A legnagyobb szálmunkához tartozó szálhosszat vettem az ideális szálhosszának. A kísérletek alapján megállapítható volt, hogy a legnagyobb szálmunkához tartozó szálhossz nagyobb volt, mint a kritikus szálhosszból származtatott ideális szálhossz, ugyanakkor ennek is van egy felső határa, amely felett már csökken a szálmunka.



10. ábra. Szálhossz és szálmunka összefüggése

8. Tézisek

1. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász, 2018)

Az egységnyi keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámának meghatározására egy analitikus modellt vezettem be, amely különbséget tesz merev (acél) és hajlékony (szintetikus) szálak között.

1.1. A szálak orientációjának egyenletes eloszlásához a szálakat az azimut szögük és a szálvégpontok magasságának egyenletes eloszlása mellett kell definiálni. Megmutattam, hogy Romualdi és Mandel (1964) keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámának levezetése azonos eredményt ad Naaman (1972) levezetésével, ha a szálak orientációja ilyen módon van megadva.

1.2. Dupont és Vandewalle (2005) acélszálakhoz megadott orientációs faktorait tovább fejlesztettem, és modell segítségével megmutattam, hogy a zsaluhatás a keresztmetszet széleitől távolabb levő zónákban is jelentkezhet, amelyet kvázi-zsaluhatás zónának neveztem el. Megadtam merev (acél) szálak esetén az orientációs faktorokat a zsaluhatás és a kvázi-zsaluhatás zónákban.

1.3. Hajlékony (szintetikus) szálak esetében a javasolt modell a szálak merev elfordulása helyett a szálak elhajlását feltételezi a zsaluval történő találkozáskor. A modell segítségével megmutattam, hogy ebben az esetben a kvázi-zsaluhatás nem jelentkezik. Megadtam hajlékony (szintetikus) szálak esetén az orientációs faktorokat a zsaluhatás zónában.

2. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász, 2013c; Juhász, 2015a; Tóth, Juhász and Pluzsik, 2017)

2.1. Bevezettem a szálnyomaték és a szálmunka fogalmát, amelyet hárompontos gerenda hajlítási vizsgálat eredményei alapján adhatunk meg. Bevezettem az ideális szálnyomaték és az ideális szálmunka fogalmát, amely a tökéletes elkeveredést feltételező analitikus modell alapján határozható meg, amelyet az ideális állapotnak tekintünk.

2.2. Kísérletileg igazoltam, hogy a kísérletben használt száltípusoknál és száladagolásoknál, illetve kísérletben használt betonoknál a szálmunka lineárisan arányosan nőtt a szálnyomatékkal, mind acél, mind szintetikus szálak esetén.

3. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász, 2013a)

Kísérletileg igazoltam, hogy a kísérletben használt száltípusoknál és száladagolásoknál, illetve kísérletben használt betonnál az acélszálak kihúzódtak a beton mátrixból már kis repedéstágasságnál is, addig a szintetikus szálak átkötötték a repedést (az acél- és szintetikus szálak hossza nagyjából egyforma volt). Ez a különböző energia abszorpció az oka annak, hogy az acél és a szintetikus szálerősítésű beton, mint kompozit anyag erő-CMOD diagramja hasonló tudott lenni gerenda hajlító vizsgálat esetében.

4. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász, 2013a)

Bevezettem egy egyszerű anyagmodellt húzásra szálerősítésű betonokhoz. Bevezettem a hozzáadott törési energia fogalmát (G_{Ff}), amelyet két paraméterrel: a repedés utáni maradó húzószilárdsággal (f_f) és a maximális repedéstágassággal (w_f) lehet definiálni. Ezzel a két paraméteres modellel a gyakorló mérnökök egyszerűen tudják definiálni a szálerősítésű beton anyagmodelljét.

5. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász, 2013a)

Kísérletileg vizsgáltam az adalékanyag hatását a szintetikus szálerősítésű beton hozzáadott törési energiájára. Olyan betonokkal végeztem a kísérletet, ahol a beton habarcs fázisa azonos, de az adalékanyag váz különböző volt. A beton minden esetben telített volt, hogy a szálak ágyazása biztosítva legyen. Kísérletileg igazoltam, hogy a kísérletben használt szálak, száladagolások és betonok esetében az olyan betonoknál, ahol a habarcs fázis azonos volt, az adalékanyagok hatása a törési energiára elhanyagolható volt, habár a hatása nyomó- és hajlító-húzószilárdságra jelentős volt.

6. tézis

(kapcsolódó publikáció: Juhász and Kis, 2017)

Kísérletileg igazoltam, hogy a kísérletben használt betonok, szálak és száladagolások esetén, szabványos gerenda kísérleteknél a szintetikus szálak optimális szállhossza hosszabb,

mint az acélszálaknál definiált optimális szálhossz, amely a kritikus lehorgonyzási hossz kétszerese.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- Juhász, K. P. (2013a). Modified fracture energy method for fibre reinforced concrete. In A. Kohoutková et al. (eds.) *Proceedings of Fibre Concrete 2013: Technology, Design, Application*, Prague, Czech Republic, pp. 89-90.
- Juhász K. P. (2013c). Szintetikus makro szálerősítésű beton gerendavizsgálatok kiértékelése a valós száleloszlás vizsgálata alapján. *Anyagvizsgálók lapja*, Vol. 23, No. 3-4, pp. 93-97.
- Juhász, K. P. (2015a). Evaluation of fibre reinforced concrete beam test results based on the examination of the real fibre distribution. In A. Kohoutková et al. (eds.) *Proceedings of Fibre Concrete 2015*, Prague, Czech Republic.
- Juhász, K. P. (2015b). Szintetikus szálerősítésű betonok hozzáadott törési energiája az adalékanyag függvényében, *Építés-Építészettudomány*, Vol. 43, No. 3-4, pp. 317-329.
- Juhász, K. P. and Kis, V. (2017). The effect of the length of macro synthetic fibres on their performance in concrete. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 246 (1), Paper 012027.
- Tóth, M., Juhász, K. P., Pluzsik, A. (2017). Effect of mixed fibers on the ductility of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29, No. 9.
- Juhász, K. P. (2018). Acél és szintetikus szálak orientációjának meghatározása szálerősítésű betonban, *Építés-Építészettudomány*, Vol. 46, No. 1-2, pp. 221-238.

Hivatkozások

- ACI Committee 544. (2002). *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete* (ACI 544.1R-96). Retrieved from: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=544196>
- Alberti M. G., Enfedaque A. and Gálvez, J. C. (2017). On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 77, pp. 29-48.
- Balouch, S., Forth, J. and Granju, J.-L. (2010). Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 40 (3), pp. 410-414.
- Bernard, E. S. (2008). Embrittlement of fiber-reinforced shotcrete. *Shotcrete*, 10 (3), pp. 16-21.
- Bernard, E. S. (2009). Design of fibre reinforced shotcrete linings with macro-synthetic fibres. In: *Shotcrete for Underground Support XI, ECI Symposium Series*, P11. (Accessed 15 June, 2013) Retrieved from: <http://dc.engconfintl.org/shotcrete/14>
- B/517 Technical Committee. (2006). *Fibres for concrete - part 2: Polymer fibres*. (BS EN 14889).
- Dupont, D. and Vandewalle, L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement & Concrete Composites* 27, pp. 391-398.
- Jen, G. and Ostertag, C. P. (2016). Experimental observations of self-consolidated hybrid fiber reinforced concrete on corrosion damage reduction. *Construction and Building Materials* 105, pp. 262-268.
- Juhász, K. P. (2014). Mikro és makro szintetikus szálakkal készített beton próbatestek vizsgálata. *Építés-Építészettudomány*, 42 (1-2), pp. 57-72.

- Krenchel, H. (1975). Fibre spacing and specific fibre surface. In: A. Neville, (ed.) *Fibre reinforced cement and concrete*, London: The Construction Press, pp. 67-75.
- Kusterle, W. (2009). Viscous material behaviour of solids – creep of polymer fibre Reinforced concrete. In: *Proceedings of the 5th Central European Congress on Concrete Engineering*. Baden, pp. 95-99.
- Naaman, A. E. (1972). A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete. Doctoral thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Nordström, E. (2000). Steel fibre corrosion in cracks durability of sprayed concrete. Licentiate thesis, Lulea University of Technology, Lulea.
- Oh, B. H., Kim, J. C. and Choi, Y. C. (2007). Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers. *Engineering Fracture Mechanics* 74, pp. 243-257.
- Romualdi, J. P. and Mandel, J. A. (1964). Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. *Journal of the American Concrete Institute*, 61 (6), pp. 657-671.
- Vandewalle, L., et al. (2000). RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Recommendations. *Materials and Structures*, 33 (1), pp. 3-5.
- Zheng, Z. and Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science* 20, pp. 185-210.