

SZINTETIKUS MAKRO SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETON GERENDAVIZSGÁLATOK KIÉRTÉKELÉSE A VALÓS SZÁLELOSZLÁS VIZSGÁLATA ALAPJÁN
EVALUATION OF SYNTHETIC MACRO FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAM TEST RESULTS BASED ON EXAMINATION THE REAL FIBRE DISTRIBUTION
JUHÁSZ KÁROLY PÉTER

Kulcsszavak: beton, szálerősítésű beton, gerendateszt, teszteredmények kiértékelése
Keywords: concrete, fibre reinforced concrete, beam test, evaluation of test results

KIVONAT

Szálerősítésű beton gerendák szabványos vizsgálata az 1 vagy 2 ponton terhelt kéttámaszú gerendateszt, melynek útvezérelt vizsgálat során a terhelő erőt, középponti relatív lehajlást és/vagy a CMOD értéket mérjük. A szálak hatása leginkább a húzó-hajlító szilárdság elérése, azaz a repedés megjelenése után jelentkezik, mint maradó feszültség. Ezt a feszültséget mérjük ki az irányelvek alapján definiált lehajlásig vagy repedéstágasságig. A szálerősítésű beton definíciójából következően feltételezzük, hogy a szálak a beton testben véletlenül, minden irányban és egyenletesen helyezkednek el. Ez az egyenletes elhelyezkedés azonban csak a szál és a keresztmetszet méretétől függően nagy reprezentatív méretnél feltételezhető. Ezt a reprezentatív méretet a tesztelt gerenda elemek számának vagy keresztmetszeti méretének növelésével érjük el.

Szálerősítésű lőtt betonoknál gerendateszt helyett négyzetes vagy kör alakú panel tesztek készítenek, ahol ez a reprezentatív méret a tesztelt anyag térfogatához képest relatív nagyobb. Hátránya a repedések megjelenésének kontrolálhatatlansága, így a CMOD mérés nem lehetséges.

Jelen cikkemben azt vizsgálom, hogy a szabványos gerendatesztnél ezt a szórást hogyan csökkenthetjük egyszerű vizsgálati módszer alkalmazásával szintetikus makro szálerősítésű beton gerendáknál.

ABSTRACT

The standard test methods for fibre reinforced concrete (FRC) are the 3 or 4 points bending beam tests with displacement control measuring the force, middle point deflection and/or CMOD. The fibres will take effect after reaching the flexural strength, e.g. after crack as residual post crack stress. This residual stress is measured until certain deflection or crack opening defined in the

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék;
 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
 Egyetem, Czakó Adolf Laboratórium,
 laborvezető, juhasz@sz.t.bme.hu

guidelines. According to the definition of the FRC the fibres are located in the concrete randomly and uniformly in all direction. This uniformity could be presumed at a sufficiently large representative size depending on the fibre and section size. This representative size could be reached by increasing the number of the beams or the area of the section.

At fibre reinforced shot-concrete (FRS) round or square panel test is used where this representative size is relatively larger compared to the element volume. Disadvantage of this is the uncontrolled crack propagation, thus measuring the CMOD isn't possible.

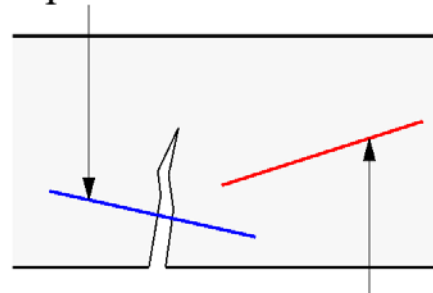
In this article the possibility of decreasing of dispersion is researched with simple method at synthetic fibre reinforced beams.

BEVEZETÉS

Szálerősítésű betonok repedés utáni hatása leginkább a szál anyagától, geometriájától és a vizsgált repedéshez viszonyított elhelyezkedésétől függ. Jelen cikkben ennek az elhelyezkedésnek az eredményre gyakorolt hatását vizsgálom. A szálakat elhelyezkedésük alapján két fő csoportba rendezhetjük:

- repedést nem keresztező;
- repedést keresztező szálak (1. ábra).

repedést keresztező



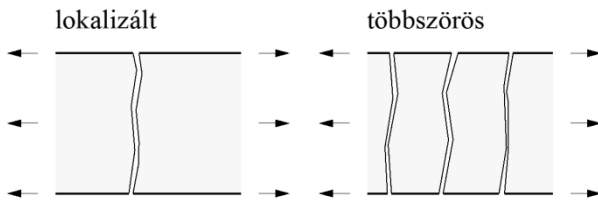
repedést nem keresztező

1. ábra: repedés elhelyezkedése

Fig. 1 crack location

A gerendán megjelent repedés pedig két féle lehet:

- lokalizált;
- többszörös (2. ábra).



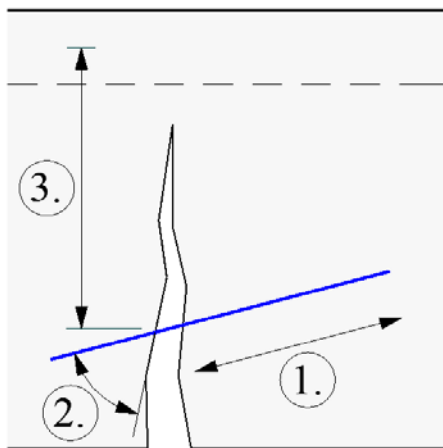
2. ábra: lokalizált és többszörös repedés

Fig. 2 localized and multiply crack

A többszörös repedés magas adagolású acélszálaknál lehetséges, ebben az esetben a feszültség repedéstágasság diagramnál a beton húzószilárdság elérése után felkeményedés van. Szintetikus makroszálaknál és szokványos adagolású acélszálaknál a feszültség repedéstágasság diagram a húzószilárdság elérése után visszaesik, amely a repedés lokalizációjában manifesztálódik. Ebben a cikkben a lokalizált repedésekkel foglalkozom.

Belátható, hogy a szálerősítésű beton gerenda vizsgálati végeredményére a repedést keresztező szálak vannak leginkább hatással, a repedést nem keresztező szálak hatása a beton rugalmas tartományában jelentéktelenül kicsi. A maradó feszültség szempontjából a repedést keresztező szálak legfontosabb geometriai paraméterei a következők (3. ábra):

- szál lehorgonyzott hossza (1);
- szál és a repedés keresztmetszet között bezárt szög (2);
- szál távolsága a nyomott betonzóna súlypontjától (3).



3. ábra: szál geometriai paraméterei

Fig. 3 geometrical parameters of the fibre

A szintetikus polipropilén szálak rugalmassági modulusa nagyságrendileg kisebb, mint az acélszálé, ugyanakkor bizonyos adagolásnál a maradó feszültségre gyakorolt hatása azonos [2]. Ez csak

úgy érhető el, ha térfogatszázalékban több szálat alkalmazunk, azaz egy szátra kisebb feszültség jut, illetve a dolgozó szál hossza is kisebb, azaz a makroszálak nem a végükön vannak lehorgonyozva, hanem a felület mentén folytonosan. Acélszálak esetében feltételezzük, hogy a rövidebben lehorgonyzott szálfél húzódik ki a betonból, a másik mozdulatlan marad [5] már kis repedéstágasságnál is. Szintetikus szálaknál még nagyobb repedéseknél is csak kisebb szálhossz dolgozik [1]. Mivel a szintetikus makro szálak hossza az acél szálak hosszának a nagyságrendjében van (3-5 cm), így a lehorgonyzási hosszának kisebb a szerepe.

A szálak és a repedés keresztmetszet között bezárt szög hatással van a szál kihúzóására, utólagos vizsgálata és kimérése azonban nehézkes. A szál nyomott betonzónától való távolsága viszont egyszerűen kimérhető érték, így ennek a hatását vizsgálom a végeredményre. A nyomott zóna a keresztmetszet méreteihez képest elhanyagolhatóan vékony betonsáv, így a gerenda felső szélétől lehet mérni a távolságokat.

A KÍSÉRLET LEÍRÁSA

Egy tudományos kísérlet során a szálak hatását vizsgáltam különféle adalékanyaggal készült betonban, ahol az eredmények összehasonlításánál fontos volt valóban hasonlóan homogén szálerősítésű gerendákat keresni. Ennek kapcsán kerestem egy olyan vizsgálati eljárást, amelynél relatív kis munkával sokkal pontosabb eredményt kapok.

Egy szériában 6 gerenda szerepelt, 4 féle betonban 2 féle száltípussal és adagolással. A betonok jellemzői az 1. táblázatban, míg a szálak jellemzői a 2. táblázatban szerepelnek

Beton neve	adalékanyaga
Beton-A	$d_{max} = 4$ mm habarcs
Beton-B	$d_{max} = 8$ mm gömbölyű kavics
Beton-C	$d_{max} = 22$ mm zúzott kavics
Beton-D	$d_{max} = 16$ mm liapor

1. táblázat: betonok

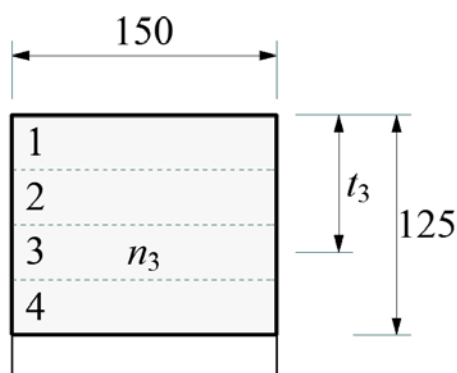
Table 1. concretes

Az elkészült beton próbagerendákat a RILEM TC162 ajánlásai alapján [4] 4 mm-es lehajlásig terheltem, közben mértem az erőt és a repedéstágasságot.

Szál neve	adagolása	szálhossz	szálátmérő	szál darabszám
Szál-1	6 kg/m ³	48 mm	0,5 x 1,3 mm	60241 db/kg
Szál-2	4 kg/m ³	54 mm	0,4 x 1,4 mm	35587 db/kg

2. táblázat: szálak

Table 2 fibres



4. ábra: zónák az eltört felületen

Fig. 4. zones on the cracked surface

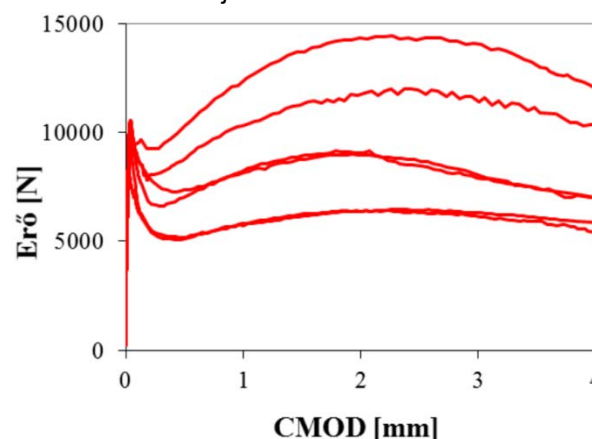
A szál-elhelyezkedés vizsgálata a következőképp zajlott:

- a gerendateszt elvégzése után a gerendát ketté törtem;
- a ketté tört keresztmetszetet mindkét gerenda félben 4 horizontális zónára osztottam;
- a zónákban található szálakat megszámláltam, a kihúzódott szálakat 1-szeres szorzóval, a szakadt szálakat 0,5-os szorzóval;
- a szál darabszámot összesítettem mindegyik zónában külön (4. ábra).

EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Az erő-CMOD diagramokban nagy szórás jelentkezett, holott a beton és a száladagolás azonos volt (5. ábra). Ez a nagy szórás több, a kísérleti módszerben rejlő pontatlanság együttes hatásként jön létre. Ha egy keverésből több gerendát öntünk és az egyik gerendában több szál lesz, akkor természetesen a másikban kevesebb. A szálak nyomott betontól mért távolsága is nagyban befolyásolja az eredményeket: a nyomott oldalhoz közeli szálak erőkarja kisebb, mint a bemetszésnél levő szálaké. Valós alkalmazásoknál azonban a szálak nagy keresztmetszeti felületen dolgoznak, ahol ezek a keverési problémák nem okoznak gondot: a gyengébb keresztmetszet szerepét átveszi a mellette lévő erősebb keresztmetszet. Kísérletekből ezt a keverési pontatlanságot kellene kiküszöbölni és a szálak betonmátrixszal való együttműködésének hatására fókuszálni. Meg-

jegyzem, tiszta húzókísérletnél a repedés keresztmetszeten áthaladó szálak elhelyezkedése nem, csak darabszáma fontos, hiszen ott a teljes keresztmetszet húzott és az ellenállást a szálakban ébredő erők összege adja. A tiszta húzókísérlet elvégzése azonban nehézkes, próbatest alakja bonyolultabb, szabványosítva nincs. Ezen okok miatt az iparban főleg a gerendateszt vizsgálat terjedt el, ahol azonban számít a szálak nyomott zónától mért erőkarja is.



5. ábra: A-beton és Szál-1 széria erő-CMOD eredményei

Fig. 5. Force-CMOD results of Concrete-A and Fibre-1

Az egyes eredményekből egy szálerősítésű betonra jellemző munka mértékegységű értéket képeztem, a szálmunkát (W_f), amely az erő-CMOD diagram 4 mm-es CMOD értékig vett görbéje alatti terület az 5. ábra szerint. Mértékegysége Joule. A szálmunka nem azonos a szálak által végzett munkával, de arányos vele, így kvalitatív összehasonlításokhoz alkalmas.

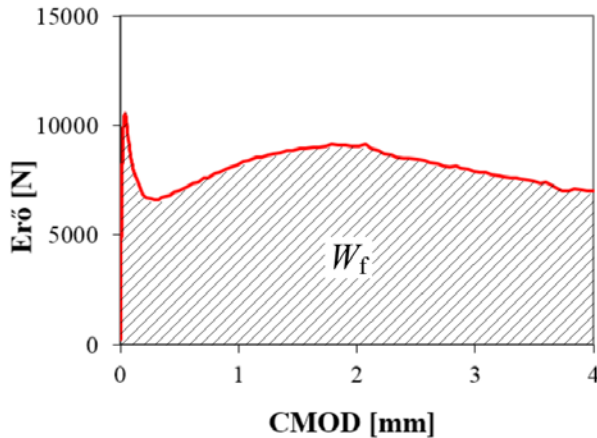
Inverz kísérleti eredmények alapján a szintetikus szálakban keletkező feszültségek nagyjából azonosak a repedéstágasság növekedése esetén, ezért a keresztmetszeten elhelyezkedő szálakhoz egy szálnyomatékot (S_f) tudok rendelni az alábbi képlettel:

$$S_f = \sum_{i=1}^4 t_i n_i a \quad (1)$$

ahol:

S_f : szálnyomaték;

- t_i : szálmazók távolsága a nyomott szélső száltól (4. ábra);
 n_i : szálok darabszáma az aktuális mezőben;
 a : egy szál keresztmetszeti területe, egységnyi.



6. ábra: szálok által 4 mm-es CMOD értékig végzett munka

Fig. 6. fibre work until 4 mm of CMOD

A szálnyomaték számításakor a szál keresztmetszeti területét egységnyiinek vettem, így a mértékegysége méter.

A szálmunkákat és a szálnyomatékokat száltípusonként egy-egy diagramba rendeztem, amelyek a 7. ábrán láthatóak.

AJÁNLOTT KIÉRTÉKELÉS

A 7. ábrán jól látható, hogy a nagyobb szálnyomatékhoz nagyobb szálmunka is tartozik, bizonyos szórás mellett. A megrajzolt lineáris trendvonalak azonban jól mutatják az eredmények középértékének a változását. Ha feltételezünk egy tökéletes száleloszlást és tudjuk a fajlagos keresztmetszeten áthaladó szálok darabszámát, akkor kiszámítható az ehhez a keresztmetszethez tartozó szálnyomaték is. A trendvonal és a hozzá tartozó szórás ezen szálnyomatéknál vett értéke vehető a szálerősítésű gerenda azon középértékének, amelynél a szálok elhelyezkedéséből adódó szórás részben kiküszöböltük.

Romualdi és Mandel [3] levezetése alapján a véletlenszerűen elhelyezkedő szálok távolsága illetve a fajlagos keresztmetszeti felülethez tartozó darabszáma a következő:

$$T_{se} = \sqrt[3]{\frac{V}{0,41 N}} \quad (2)$$

ahol:

- T_{se} : hatékony szálok távolsága;
 V : térfogat;

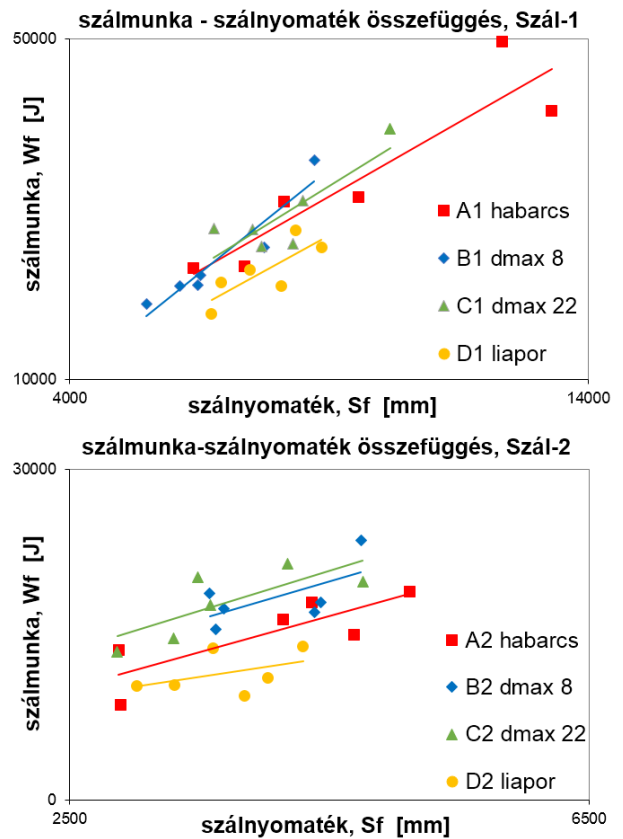
N : szálok darabszáma a térfogatban.

$$n_a = \frac{l}{T_{se}^3} = \frac{0,41 N l}{V} \quad (3)$$

ahol:

- n_a : fajlagos keresztmetszetre eső szálok darabszáma;
 l : szálhossz.

Ezekből az egyenletekből jelen esetben a 3. táblázatban levő értékeket kapjuk.



7. ábra: szálmunka és szálnyomaték összefüggése

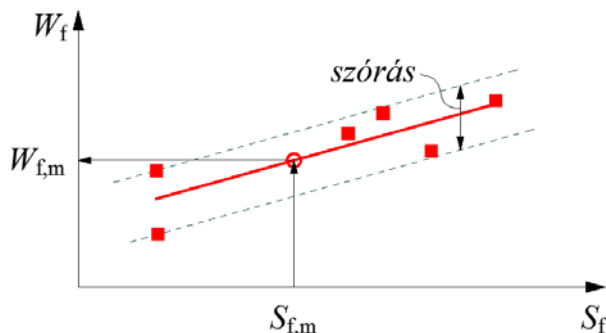
Fig. 7. relation of the fibre work and fibre moment

A mért és a számolt értékek közel állnak egymáshoz, így Romualdi és Mandel képlete alkalmasnak látszik az átlagos szál darabszám számítására, amelyből számolható az átlagos szálnyomaték: $S_{f,m}$. A trendvonal ehhez a nyomatékhoz tartozó értékéből kapható a szálmunka átlagértéke: $W_{f,m}$, melyből a szórással származtatható a szálmunka karakterisztikus és tervezési értéke (8. ábra). Az anyagmodell ebből az irodalomban ismertett számos módszerrel meghatározható [4].

	szálak darabszáma 1 m ³ -ben N [db]	szálak hatékony távolsága S _{se} [mm]	szálak darabszáma eltört felületen (125x150 mm) n _a [db]	szálak darabszámának átlaga, mért érték [db]
Szál-1	60 241 x 6 = 361 446	18,89 mm	133,3	129,9
Szál-2	35 587 x 4 = 142 348	25,78 mm	59,0	64,8

3. táblázat: szálak darabszáma az eltört felületen

Table 3. number of fibres on the cracked surface



8. ábra: kiértékelés módszere

Fig. 8. method of evaluation

MEGÁLLAPÍTÁSOK

A diagramokról jól látható, hogy a szálnyomaték növekedésével arányosan növekszik a szálak munkája is. Egy trendvonal meghúzásával a szálak munkájának a szórása is látszódik, amely a trendvonal két oldalán levő legtávolabbi értékek trendvonalától mért távolságának összege. Ha ismerjük, hogy a keresztmetszeten hány szálnak kell átlagosan áthaladnia, akkor kiszámítható ennek az ideális keresztmetszetnek a szálnyomatóka, majd a trendvonalnál lévő értékből becsülhető a szálerősítésű beton átlagos szálmunkája is. Ebből az értékből a szórás segítségével kiszámítható a karakterisztikus illetve tervezési szálmunka is. Ez a fajta kiértékelési módszer így figyelmen kívül hagyja a keverési pontatlanságot, ami a hajlított elemnél a szálak erőkarjainak változása miatt többszöröződik. Nem veszi viszont figyelembe a szálak által bezárt szöveget, így a repedéssel kis szöveget bezáró, gyengén vagy alig dolgozó szálakat is teljes értékkel veszi figyelembe, akárcsak a repedésre merőleges szálakat. Ezt azonban nehezen lehetne a vizsgálatba beépíteni, kimérni, és az eredmények azt igazolják, hogy nem is szükséges.

A kiértékelési módszer továbbá alkalmas kutatási eredmények összehasonlítására, ahol nem elsősorban a szálerősítésű beton teljesítményének kimérése a fontos, hanem hasonlóan elkeveredett szálak betonra mért hatásának kvalitatív összehasonlítása.

ÖSSZEFOGLALÁS

Egy új, relatív egyszerű módszert mutattam szintetikus makro szálerősítésű betonok gerenda vizsgálatának pontosabb kiértékelésére, amely mind az iparban, mind a tudományos kutatásokban jól hasznosítható eljárás. Az eljárást elsősorban szintetikus makro szálakra vizsgáltam, ahol a szál lehorgonyzási hosszának kisebb a szerepe még nagy repedéstágasságnál is. Acélszálak esetében a szálak lehorgonyzása nagyban módosíthat az eredményen, így alkalmazása további kísérletekkel ellenőrizendő.

HIVATKOZÁSOK

- [1.] Juhász, K. P. (2013) „Modified fracture energy method for fibre reinforced concrete”, *Fibre Concrete 2013: Technology, Design, Application*, Prága, Csehország, 2013.09.12-2013.09.13. pp. 89-90. Paper p07. ISBN: 978-80-01-05238-9
- [2.] Juhász, K. P., (2014) „Mikro és makro szintetikus szálakkal készített beton próbatestek vizsgálata”, *Építés-építésztudomány*, 42:(1-2) pp. 57-71.
- [3.] Romualdi, J.P., Mandel, J. A. (1964) „Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement”, *ACI Journal*, 1964. June, pp 657-670
- [4.] Vandewalle, L., et al. (2002) „RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, January-February 2000, pp 3-5
- [5.] Voo, J. Y. L., Foster, S. J., (2003) „Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension”, *Uniciv Report No. R-420*, School of Civil and Environmental Engineering, the University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, June 2003, 86 pp.