



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

ÉPÍTÉSZMÉRNÖKI KAR

SZILÁRDSÁGTANI ÉS TARTÓSZERKEZETI TANSZÉK

RÖVID ACÉLSZÁLAK HATÁSA A GERENDA NYÍRÁSI TÖNKREMENTELÉRE

SZERZŐ: BOTOS ANNA

KONZULENSEK: PLUZSIK ANIKÓ, JUHÁSZ KÁROLY PÉTER

2016

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, A KUTATÁS CÉLJA	3
2. SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK	4
3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....	7
3.1. BETONKEVERÉK.....	7
3.2. FRP ERŐSÍTÉS.....	7
3.3. SZÁLAK.....	8
3.4. MÉRÉSI MÓDSZER	10
4. ELŐZMÉNYEK, IRODALOM	11
4.1. HAJLÍTÁSI VISELKEDÉS	11
4.2. NYÍRÁSI VISELKEDÉS	12
4.3. TAPASZTALATI EGYENLETEK AZ IRODALOMBÓL	14
5. KÍSÉRLETEK EREDMÉNYEI.....	17
5.1. PRÓBAGERENDÁK	17
5.2. HAJLÍTÁSVIZSGÁLAT	18
5.3. NYÍRÁSVIZSGÁLAT.....	20
6. VERIFIKÁCIÓ: ÖSSZEVETÉS TAPASZTALATI EGYENLETEKKEL	25
7. ÖSSZEFOGLALÁS.....	31
8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	33
9. FELHASZNÁLT IRODALOM.....	34

1. BEVEZETÉS, A KUTATÁS CÉLJA

Az egyre nagyobb népszerűségnek örvendő, egyre szélesebb felhasználási körben alkalmazható szálerősítésű beton különböző anyagú és formájú szálakkal készülhet. A leggyakrabban használt acél és a műanyag szálak mellett folyamatosan találkozhatunk újabb alternatívákkal. Egy lehetséges változat az autógumi gyártásakor keletkező rövid acél szál, melyet jelenleg semmilyen formában nem használnak fel, hulladékként kezelnek. Környezetvédelmi szempontból tekintve az eshetőséget, a „hulladékszál” felhasználásával kevesebb lehet a természetbe kerülő, újrahasznosításra nem alkalmas szemét mennyisége.

Az elvégzett laborkísérletek során azt vizsgáltuk, hogy a véletlenszerű elhelyezkedésű, de egyenletesen elkevert szálak hogyan változtatják az ágyazó anyagunk, vagyis a beton mechanikai tulajdonságait. Azt teszteltük, hogy az említett rövid acél szál hatással van-e a betongerendák hajlítási teherbírására, duktilitására, valamint nyírási teherbírására. Vizsgáltuk, hogy vékony tartókban helyettesíthető-e szálakkal a kengyel nyírási igénybevétel esetén.

Jelen kutatás további célja a szálerősítésű betonok nyírószilárdságára vonatkozó tapasztalati egyenletek alkalmazhatóságának vizsgálata. A szálerősítésű betonok méretezésének nagy problémája, hogy jelenleg az irodalomban csak irányelveket találunk, nincsen általánosan elfogadott szabvány. A nyírási ellenállást az egyes elméletek különbözőképpen közelítik. Ezáltal a méretezés jóval bizonytalanabbá válik, mint a vasbeton szerkezetek esetén. Kérdéssé válik a tervezett szálerősítésű szerkezet megbízhatósága, alkalmazhatósága és gazdaságossága.

A tesztekhez használt kisméretű gerendák tönkremeneteli módját három pontos hajlítóvizsgálattal végeztük, ahol a gerendák hajlításra vagy nyírásra mehetnek tönkre. Hajlítási tönkremenetel esetén a nyomott beton zóna morzsolódik, majd a hosszanti betonacél vasalás elszakad, míg nyírási tönkremenetel esetén ferde repedések keletkeznek, melyek megnyílását a kengyelek akadályozzák. Kutatásunkban arra a kérdésre kerestük a választ, hogy megfelelő adagolású rövid acél szállal helyettesíthető-e a gerenda nyírási vasalása - a kengyelezés.

A kísérleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Czakó Adolf laboratóriumában végeztük.

2. SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK

Az emberiség már évezredekkel ezelőtt ráébredt arra, hogy ha különböző szálakat adagolnak az építőanyagokhoz, azzal kedvezően befolyásolhatják annak mechanikai tulajdonságait. Eleinte a természetben megtalálható anyagokat alkalmazták, többek között szalmát és állatszórót, melyeket az agyaghoz keverve egy sokkal tartósabb és ellenállóbb anyagot kaptak. A betonnál is hasonló hatást kívánunk elérni különféle szálak alkalmazásával.

A szálerősítésű beton létrejöttét a XIX. század végére tehetjük, pontosabban 1874-re, amikor is A. Berand fémhulladékot adott hozzá a betonhoz, annak rideg tulajdonságainak csökkentésére, majd ezt az eljárást szabadalmaztatta is 1893-ban. Az 1960-as évek elejéig azonban a módszer alkalmazása ritka volt, az elterjedésével párhuzamosan folytak a vizsgálatok a szálak betonban való viselkedéséről. 1910-ben az amerikai származású Porter acélszál erősítésű betonnal kísérletezett, ezt követően 1914-ben Fricklin a vasszögekkel erősített betont, majd 1938-ban Zitkewic a lágvas drótdarabokkal erősített betont szabadalmaztatta. Magyarországon először az 1920-as években alkalmaztak vasreszelékkel kevert betont, 1972-ben pedig a Mélyépítő Vállalat elkezdte alkalmazni a szálerősítésű betont az előre gyártott csatornacsöveknél.

[Kausay, 1999]

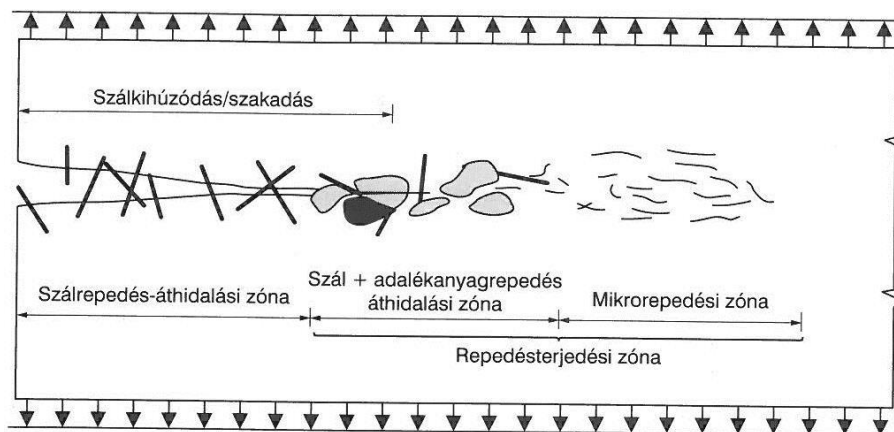
A szálerősítésű beton elvének tudományos alapjait Romualdi és Batson, valamint Mandel rakták le, akik az 1950-es évek végén és az 1960-as évek elején kutatásokat végeztek, hogy meghatározzák az acélszál erősítésű betonok mechanikai tulajdonságait. Ők foglalkoztak először a szálorientációval és a száltávolsággal, ezek betonra tett hatásával, továbbá a modellezési lehetőségükkel. *[Balázs L., Polgár 1999]*

Szálerősítésű beton alatt napjainkban egy olyan építőanyagot értünk, amely a hagyományos beton összetevők (kötőanyag, víz, adalékanyag, adalékszerek) mellett a térben véletlenszerűen, de egyenletesen elhelyezkedő, különböző alakú és anyagú szálakat is tartalmaz. Hagyományos értelemben szálerősítésű betonok alatt a kis száltartalmú, 0,1-2 V% szálmennyiséget tartalmazó betonokat értjük. *[Kiss, Varga 2011]*



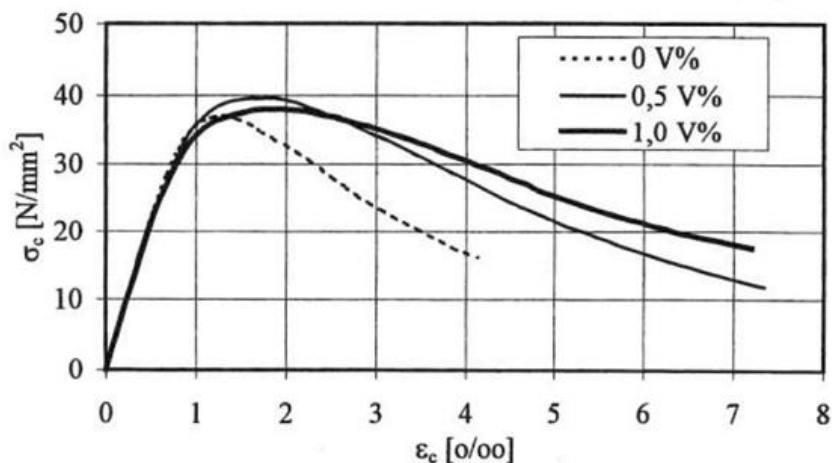
1. ábra - Acélszállal erősített beton [internet]

A szálak mennyiségétől és típusától függően nő a beton repedésáthidaló képessége [2. ábra], törési összenyomódása [3. ábra], nő a beton szívóssága (energiaelnyelő képessége), nő a fáradási szilárdsága, valamint fajlagos ütőmunka bírása [Horst, Volkner, 2004].



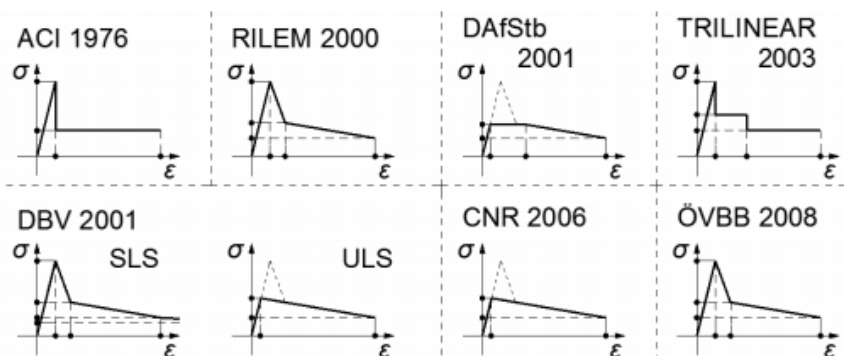
2. ábra - Beton repedésáthidaló képessége [Li-Maalej, 1996]

A 3. ábrán látható a korábbi kutatások eredménye alapján a szálnélküli és a szálerősítésű betonok nyomószilárdsági vizsgálatainak eredménye [Balázs, Erdélyi, 1996]. A szálmennyiség növelésével nő a beton törési összenyomódása, valamint a grafikon alatti terület, melyből az anyag szívósságára, energiaelnyelő képességére lehet következtetni.



3. ábra - Beton σ - ϵ diagramja a száltartalom függvényében [Balázs, Erdélyi, 1996]

Általánosan elismert anyagmodell nem áll rendelkezésünkre, bár a témával foglalkozó ajánlások megalkottak több változatot is [4. ábra]. Ezek figyelembe veszik a szálerősítésű beton azon kedvező tulajdonságait, hogy a húzószilárdság elérése után ugyan lecsökken a feszültség, de egy közel állandó érték továbbra is figyelembe vehető. A keresztmetszet vagy annak egy része tehát berepedés után is alkalmas húzóerő felvételére [Hannant, 1978; Dulácska, 1994].



4. ábra - Szálerősítésű beton σ - ϵ anyagmodelljei különböző ajánlások alapján [Juhász, 2014]

A szálerősítésnek rengeteg előnye van, többek között, hogy a beton friss állapotában állékonyabb; az elem tartóssága és kopásállósága javul; nő a beton szívóssága, duktilitása, törési összenyomódása, hajlító- húzószilárdsága, ütőszilárdsága, dinamikai ellenállóképessége illetve a szakadó nyúlása. Továbbá jobb a vízzárósága és a korrózióállósága; a zsugorodási repedésérzékenysége kisebb; a berepedés után a beton húzószilárdsága nem esik le nullára; a szálak a repedéseket jobban szétosztják, mint a hagyományos vasalás; valamint rövidebb az építési ideje, mint a hálós vasalású betonoknak, és a szerkezetek korán kizsaluzhatók, gőzölés nélkül is [Balázs L., Polgár 1999]. A számos előnyös tulajdonság teszi lehetővé széles körű alkalmazásukat, mint vékony és normál előregyártott elemek, ipari padlóburkolatok, löttbetonok, alagutak, csatornák, tömegbetonok, pályabetonok és dinamikusan igénybevett szerkezetek.

A bedolgozásra és keverésre azonban nagy figyelmet kell fordítani, ugyanis a szálak merevebbé teszik a betonkeveréket, ami megnehezíti a folyamatot, de szerencsére képlékenyítő vagy folyósítószerekkel elkerülhető a probléma. Ha nem megfelelő a bedolgozás és a szálak elkeverése, akkor a beton tulajdonságai romlanak, csökkenhet a szilárdsága és a tapadása, és nőhet a porozitása, ami a rugalmassági modulus csökkenését és az alakváltozások növekedését okozhatja. Ennek elkerülése végett jól megválasztott betonösszetételt kell alkalmazni, amit aztán kellő ideig a megfelelő frekvencián vibrálunk [Balázs L., Polgár 1999].

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. BETONKEVERÉK

A kísérletekben használt beton 70% homokból, 20% cementből és 10% vízből, kavics hozzáadása nélkül készült, mely keverék C20/25 minőségű betont eredményezett, ebből készültek a gerendák. Az ágyazóanyagban az acél szálak eloszlása egyenletes, de az elhelyezkedésük véletlenszerű. A szálakkal erősített és az anélküli gerendák azonos betonból készültek, a szálerősített darabok készítésénél a keverékhez adagoltunk 50 kg/m^3 rövid acél szálát.

3.2. FRP ERŐSÍTÉS

A gerendákhoz a hajlítás felvételére alkalmas hosszanti vasalásként a manapság még különlegesnek, és kevésbé elfogadottnak számító szálerősített polimer (FRP- Fiber Reinforced Polymer) betéteket alkalmaztunk, melyek sok szempontból különböznek a hagyományos



5. ábra- FRP erősítés [internet]

betonacéltól. A betétek 8-10 μm átmérőjű, párhuzamosan futó nagyszilárdságú bazaltszálakból, és azokat összefogó ágyazóanyagból állnak. A kísérletekhez bazaltból készült, 8 mm átmérőjű szálakat használtunk (BFRP- Basalt Fiber Reinforced Polymer).

Az FRP betétek számos tulajdonságukban kedvezőbbnek bizonyulnak, mint az acélbetétek: az elektrolitikus korrózióknak teljesen ellenállnak, kúszásuk és relaxációjuk általában kisebb, tartós szilárdságuk és fáradási szilárdságuk pedig nagyobb, mint a hagyományos acélbetéteké [Balázs, Borosnyói, 2000]. További előnyös tulajdonságaik: kis az önsúlyuk, nem mágnesezhetőek, illetve a fizikai és mechanikai jellemzőik befolyásolhatóak, a meglévő követelményekhez igazíthatóak a megfelelő szálak és ágyazóanyagok kiválasztásával [Borosnyói, 2006].

Az FRP betétek hátránya a betonacélhoz képest, hogy kisebb a rugalmassági modulusuk, anyagáruk magasabb, és az építkezés helyszínén már nem hajlíthatók. A legnagyobb problémát mégis az jelenti, hogy statikus terhelés hatására lineárisan rugalmasan viselkednek, majd folyás nélkül ridegen szakadnak.

Jelen kísérletben a gerendák nyírásra mentek tönkre, így az FRP-vel erősített gerendákat nem terheltük a hosszbetétek szakadásáig.

3.3. SZÁLAK

Napjainkban sokféle alakú (pl.: sima, bordázott, kampós végű, gömb végű, hullámos, csavart), átmérőjű (0,2 mm – 1,2 mm), hosszúságú (13 mm – 60 mm) és bevonatú (pl. galvanizált, réz bevonatú) acélszál létezik. A számos változatában használt acélszál mellett más anyagú szálakat is nagy sikerrel alkalmaznak. A teljesség igénye nélkül léteznek acél, műanyag (pl. polietilén, polipropilén, poliamid, modifikált poliolefin), üveg, szén és bazalt szálak is [Juhász, 2014]. A gyakorlati alkalmazásban az acél- és a műanyag szál van jelen, az üveg- szén- és aramid szálakat még csak kísérleti jelleggel alkalmazzák, utóbbi kettő gyakorlati alkalmazásának magas árak is gátat szab.



6. ábra- Különböző alakú acélszálak [sinekvilaga.hu]



7. ábra- Különböző anyagú szálak [sinekvilaga.hu]

A szálerősítésű betonokat a szálak anyaga alapján 4 fő csoportra osztja az ACI [ACI 544, 2002], míg a polipropilén szálakat geometriai méretük alapján a brit BS EN 14889 nevű szabvány [BS EN 14889, 2006] másik két fő csoportra. Ezt az 1. táblázat mutatja be:

ACI 544					
SFRC acélszálak	GFRC üvegszálak	SNFRC szintetikus és karbon	NFRC természetes		
	– alkáliálló – nem alkáliálló	Ia) monoszálak Ib) fibrillált szálak	– sziszálkender – kókusz – cukornád – stb.	Class I MIKRO $d < 0,30$ mm	BS EN 14889
különböző alakú acélszálak	– alkáliálló	II) különböző alakú szintetikus és karbonszálak		Class II MAKRO $d > 0,30$ mm	

1. táblázat – A szálak csoportosítása az ACI és brit szabvány alapján, ahol d a szálátmérő [Juhász, 2014]

Az ASTM C 116-03 szabvány a szálerősítésű betont 3 általános osztályba sorolja [elastoplastic.com]:

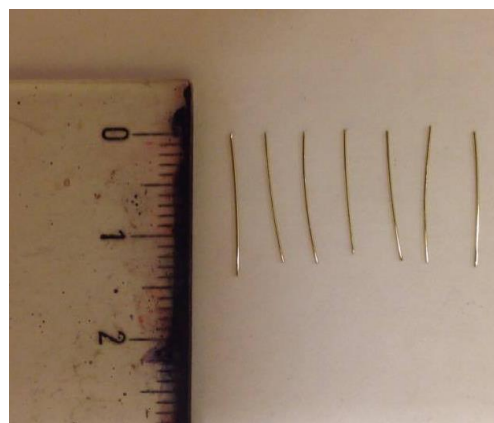
- 1. típus: acélszál erősítésű beton
- 2. típus: üvegszál erősítésű beton
- 3. típus: szintetikusszál erősítésű beton.

A tesztekhez használt rövid acélszálak paraméterei az alábbiak:

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| • anyag: | acél |
| • alak: | egyenes |
| • szín: | arany |
| • átmérő: | 0,3 mm (+/- 0,05 mm) |
| • hosszúság: | 13 mm (+/- 2,0 mm) |
| • sűrűség: | 7,85 g/cm ³ |
| • szakítószilárdság: | 3,15 GPa |
| • rugalmassági modulus: | 190 GPa |



8. ábra – Alkalmazott rövid acél szálak [saját kép]



9. ábra- Alkalmazott rövid acél szálak [saját kép]

Az elkevert szálak véletlenszerű eloszlása és irányítottsága homogénebben erősítik a betont, nem diszkrétén, mint a hagyományos értelemben vett nyírási vasalás, így a szálak egyenletesebb erősítést eredményeznek. A szálak felveszik és továbbítják a feszültséget a kialakult repedések irányától függetlenül, tovább növelve ezzel a repedés utáni szilárdságot, amely globális szinten a szerkezet nyírási ellenállását is növeli. A szálak használata csökkenti a repedésszélességet, és hozzájárul a beton repedéseinek irányításához [Araújo, Nunes, Filho and Andrade, 2014].

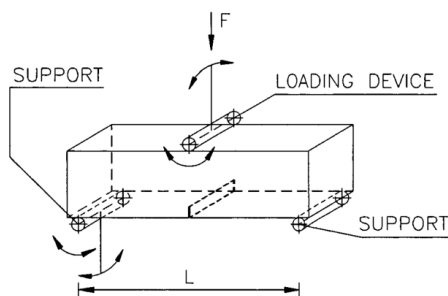
3.4. MÉRÉSI MÓDSZER

A kísérleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Czakó Adolf Laboratóriumában, egy ZWICK Z-150-es típusú univerzális törőgéppel végeztük. Ezzel a géppel út- vagy erővezérelt módon 150 kN-t tudunk előállítani, amellyel különféle húzó, nyomó és hajlító kísérleteket lehet elvégezni.

A próbagerendák tönkremenetelét 3 pontos hajlítással vizsgáltuk. A görgős támaszok közötti távolság 750 mm volt, az 1 mm/s-os útvezérelt terhelés a gerenda közepén hatott. A gerendára ható terhet és a terhelőfej elmozdulását mértük, melyek kapcsolata - a terhelőerő –lehajlás diagram - folyamatosan rajzolódott ki a vizsgálat folyamán.



10. ábra – ZWICK Z-150-es típusú univerzális törőgép [saját kép]

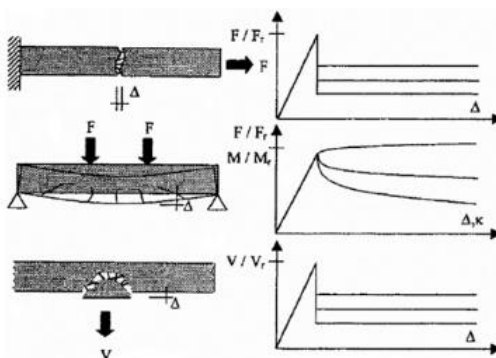


11. ábra – Hárompontos hajlítási vizsgálat elve [RILEM 2002]

4. ELŐZMÉNYEK, IRODALOM

4.1. HAJLÍTÁSI VISELKEDÉS

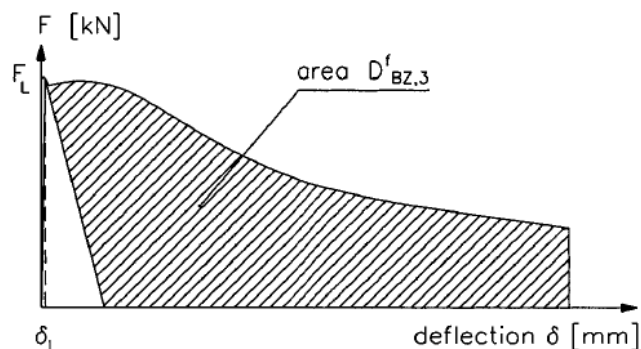
A 12. ábrán láthatók a tengelyirányú húzó, a hajlító, a tengelyre merőleges húzó igénybevételek esetén az erő – elmozdulás jelleg diagramok [Falkner, 1998.]. Látható, hogy a berepedést követően a húzófeszültség nem esik le zérusra, hanem közel konstans értéken állandósul. A szálerősítésű gerenda erőlehajlás vagy nyomatékgörbület ábrája közel rugalmas-képlékeny viselkedésű, esetleg kissé lejjebb vagy följebb fut a szál típusától, de főleg annak mennyiségétől függően. A maradó húzószilárdságnak azért nagy a jelentősége, mert ezzel csökkenthetők a beton viszonylag kis húzószilárdságából adódó nehézségek [Balázs, Polgár, 1999.].



12. ábra - Szálerősítésű betonok sematikus erő - elmozdulás ábrái acélszál alkalmazása esetén [Falkner, 1998]

Hagyományos (feszített vagy nem feszített) vasalás és acélszálak egyidejű alkalmazásakor megállapítható, hogy a törésig bekövetkező lehajlás növekszik [Craig, 1987]. Szálak alkalmazása esetén a nyomószilárdság csupán csekély mértékben növekszik. Ebből kifolyólag, ha a hajlított elem tönkremenetele a nyomott öv tönkremenetele miatt következik be, akkor szálak alkalmazásával csupán csekély mértékben növelhetjük a törőerőt vagy a törőnyomatékot [Balázs, Kovács and Erdélyi, 1998].

Hagyományos erősítés nélküli betonokban a törés a húzott oldal tönkremenetele miatt következik be. Acélszálak alkalmazásával nagy száladagolás esetén növelhető a húzószilárdság, és minden esetben nőni fog a gerendák szívóssága, duktilitása, hiszen a mikrorepedések kialakulása után az acélszálak felveszik a húzófeszültséget. A szívósság általános jellemzésére - vagyis hogy az anyag a törésig mennyi energiát tud elnyelni - az erő-elmozdulás görbe alatti területet használják. A duktilitás pedig a szakadáskor visszamaradó képlékeny alakváltozást jelenti.



13. ábra – Acélszál erősítésű beton jellegzetes erő – elmozdulás diagramja [RILEM, 2002]

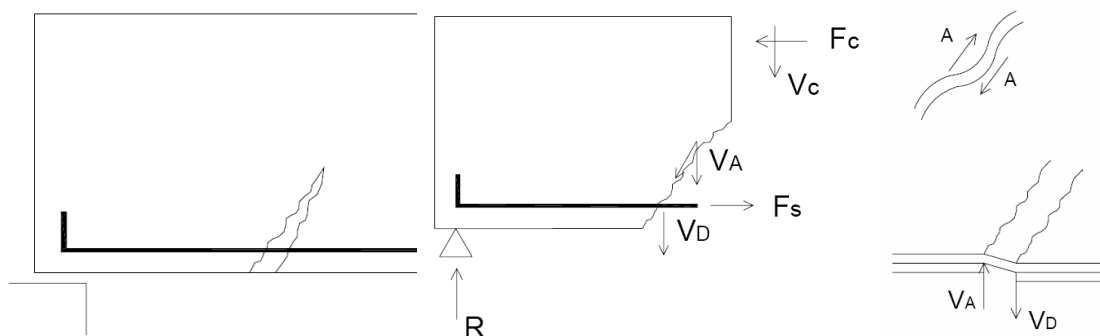
A hajlított gerendában a repedések eloszlása kedvezőbb, és a legnagyobb repedéstágasság értéke kisebb lesz. A szakirodalomban általában úgy tekintik, hogy a szálak jelenléte csökkenti a lehajlást. Más vélemények szerint a lehajlás csak akkor csökkenthető acélszálakkal, ha megfelelő bedolgozással biztosítani tudjuk, hogy a szálerősítésű beton rugalmassági modulusa nagyobb, mint a szál nélküli betoné, - ez pedig nem kézenfekvő, még növekvő nyomószilárdság esetén sem [Erdélyi, 1999].

4.2. NYÍRÁSI VISELKEDÉS

Vasbeton gerendák nyírási viselkedésének és az erre való méretezésnek az alapja, hogy a gerendát egy rácsostartóval közelítik, ahol a nyomott övet a nyomott beton zóna, a húzott övet a hosszanti vasalás, a húzott és nyomott rácsrudakat pedig a nyírási vasak és a nyomott betonoszlopok adják. Régóta fennálló kérdés, hogy hogyan kellene helyesen kombinálni a beton és a nyírási vasalás által felvett nyíróerőket. Sokáig egyszerűen összeadták ezeket az erőket, később a feszültségi állapottól függően vagy csak az egyiket vagy csak a másikat vették figyelembe. Jelenleg újra elfogadott nézet, hogy a teljes teherbírást a két tényező valamilyen kombinációja adja [Kollár, 1998].

Ha megvizsgáljuk egy nyírásra vasalatlan tartó nyírási viselkedését, ahol egy ferde repedés jött létre, megfigyelhető, hogy a teljes nyírási teherbírás több komponensből áll össze. A még be nem repedt részen a nyomott betonzóna belső erői működnek, a beton nyomóereje (F_c) és egy nyíróerő (V_c). A keletkezett repedés nem teljesen sík felületű, így a nyírás itt is át tud adódni. Ezt nyírósúrlódásnak, vagy más néven szemcsehatásnak (angolul aggregate interlock) nevezik, melynek függőleges komponense vesz részt a teherbírásban (V_A). A szemcsehatást tovább segíti a nyomott betonzóna nyírási teherviselése, ám ezt a két hatást nehéz szétválasztani egymástól. A hosszanti vasalás szintén képes lenne függőleges erők felvételére, bár ez a tulajdonsága ritkán érvényesül, ugyanis még mielőtt

elérné a nyírási teherbírást, egy annál kisebb erő hatására leválik róla a betontakarás, a hosszanti vasalás meggörbül, majd elszakad. Ezt a jelenséget csaphatásnak (angolul dowel action) nevezik, melynek szintén a függőleges komponense vesz részt a nyírási teherbírásban (V_D) [Kollár, 1998].



14. ábra – Nyíráásra vasalatlan berepedt gerenda belső erői [Kollár, 1998]

Így a nyíráásra vasalatlan tartó nyírási teherbírása ebből a három hatásból áll össze:

$$V_{Rd} = V_C + V_A + V_D.$$

A nyíráásra bevasalt gerenda esetén a képlet bővül a nyírási vasak által felvehető nyíróerővel (V_{wd}) is:

$$V_{Rd} = V_C + V_A + V_D + V_{wd}$$

A szálerősítésű beton felhasználásnak egyik legígéretesebb területe a szerkezeti elemek nyírási teherbírájának növelése. A térben eloszló szálak nem csak kedvező nyírási teherbírást biztosítanak, hanem a maximális teher elérése után kedvező törési viselkedést tesznek lehetővé (csökken a nyírási ridegség). Kísérletileg igazolódott, hogy a szálak által fölvevett nyíróerő kedvezően kiegészíti, illetve helyettesíti a nyírási vasak által fölvehető nyíróerőt, így fönnáll annak a lehetősége, hogy szálerősítés esetén csökkentjük a kengyelezés mennyiségét. [Batson, Jenkins and Spatney, 1972]

A tervezési javaslatok és számítási módszerek kidolgozói (DIN, 1991; Concrete Society, 1994; Dulácska, 1994; Bekaert, 1995) általában a szálerősítés nélküli betonra érvényben lévő előírások módosításával szándékoznak figyelembe venni a szálak hatását. Általánosan elfogadott elvnek tekinthető például, hogy a nyírási teherbírás számításánál a szálak hatását egy additív taggal vegyék figyelembe [Massányi, Dulácska, 1989]:

$$V = V_c + V_s + V_f,$$

ahol V_c a beton, V_s a kengyelek, V_f pedig a szálak által felvett nyíróerő.

4.3. TAPASZTALATI EGYENLETEK AZ IRODALOMBÓL

Számos különféle módszer létezik a nyírási teherbírás meghatározására az irodalomban, de az egyenletek közül sok csak tapasztalati adatokon alapszik, nem írja le megfelelően az összes paramétert, amelyek befolyásolják a nyírási teherbírást. Sőt a képletek jelentősen eltérnek egymástól, különböző adatok szükségesek hozzájuk, így nagy szórást tartalmaznak, mivel ezek többsége nem valós mechanikai tartalom, hanem görbeillesztésen alapszik, ami az adott körülmények között jó közelítést adott, de nem feltétlenül alkalmazható minden esetben.

Az alábbiakban felsorolok néhányat az irodalomban található tapasztalati egyenletekből, melyek alátámasztják a fentebb leírtakat, valamint a verifikáció alapját képezik.

(4.3.1.) R. NARAYANA SWAMY, R. JONES AND ANDY T.P. CHIAM

$$V_{tot} = V_w + V_c$$

$$V_w = 0,9 \cdot \sigma_{cu} \cdot b_w \cdot d$$

$$V_c = 3,75 \cdot \tau_R \cdot b_w \cdot d$$

$$\sigma_{cu} = 0,41 \cdot \tau \cdot b_w \cdot d \quad \text{ha } l_f < l_c$$

$$\sigma_{cu} = 0,41 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{fu}}{4 \times \tau} \cdot \frac{d_f}{l_f}\right) \cdot \sigma_{fu} \cdot V_f \quad \text{ha } l_f > l_c$$

(4.3.2.) MODIFICATION OF ACI BUILDING EQUATION BY ASHOUR ET AL. (1992)

$$v_u = (0,7 \cdot \sqrt{f'_c} + 7 \cdot F) \cdot \frac{d}{a} + 17,2 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}$$

(4.3.3.) MODIFICATION OF ZSUTTY'S EQUATION BY ASHOUR ET AL. (1992)

$$\text{ha } a/d > 2,5$$

$$v_u = (2,11 \cdot \sqrt[3]{f'_c} + 7 \cdot F) \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{ha } a/d < 2,5$$

$$v_u = (2,11 \cdot \sqrt[3]{f'_c} + 7 \cdot F) \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{2,5 \cdot d}{a} + v_b \cdot \left(2,5 - \frac{d}{a}\right)$$

(4.3.4.) KAUSHIK ET AL. (1987)

$$V_f = 0,24 \cdot U \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{(\rho_f \cdot l_f)}$$

(4.3.5.) SALUJA ET AL. (1992)

$$V_u = \left[0,504 \cdot \sqrt{f_c} + \frac{(176 \cdot p_w \cdot d)}{\frac{M}{V}} + \sigma_{cu} \right] \cdot b \cdot d$$

(4.3.6.) SHARMA (1986)

$$v_{uf} = k \cdot f_t \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^{0,25}$$

(4.3.7.) SHIN ET AL. (1994)

$$ha \quad a/d < 3$$

$$v_n = 0,22 \cdot f_{sp} + 217 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} + 0,834 \cdot v_b$$

$$ha \quad a/d > 3$$

$$v_n = 0,19 \cdot f_{sp} + 93 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} + 0,834 \cdot v_b$$

(4.3.8.) SWAMY ET AL. (1985)

$$v_u = 0,517 + 0,283 \cdot \sigma_{cu}$$

(4.3.9.) DING ET AL. (2011)

$$v_{uf} = \xi \cdot \left[0,97 \cdot \rho_s^{0,46} \cdot f_c'^{\frac{1}{2}} + 0,2 \cdot \rho_s^{0,91} \cdot f_c'^{0,38} \cdot f_{yl}^{0,96} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{-2,33} \right] \\ + 1,75 \cdot I_b \cdot \rho_{st} \cdot f_{yst} + 0,5 \cdot \tau \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \cot \alpha$$

(4.3.10.) AL-TA'AN ET AL. (1990)

$$v_u = v_{uc} + v_{uf}$$

$$v_{uc} = \left(10 \cdot \rho \cdot f' \cdot \frac{d}{a_s}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \frac{a_s}{d} > 2,5$$

$$v_{uc} = (160 \cdot \rho \cdot f')^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d}{a_s}\right)^{\frac{4}{3}} \quad \frac{a_s}{d} < 2,5$$

$$v_{uf} = \sigma_{cu} \cdot \frac{(h-c)}{d} = 0,5 \cdot \tau \cdot v_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \frac{(h-c)}{d}$$

(4.3.11.) HANAI ET AL. (2008)

$$V_u = \frac{[0,325 \cdot (0,15 \cdot V + 0,51) \cdot \sqrt{f_c} \cdot b \cdot d]}{10}$$

(4.3.12.) KWAK ET AL. (2002)

$$v_u = 3,7 \cdot e \cdot f_{spfc}^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} + 0,8 \cdot v_b$$

$$v_b = 0,41 \cdot \tau \cdot F$$

$$e = 1, \quad ha \frac{a}{d} > 3,4$$

$$e = 3,4 \cdot \frac{d}{a}, \quad ha \frac{a}{d} < 3,4$$

(4.3.13.) NARAYANAN, DARWISH (1987)

$$v_u = e \cdot \left(0,24 \cdot f_{ct,sp} + 80 \cdot \rho_{sl} \cdot \frac{d}{a}\right) + 0,41 \cdot \tau_{bf} \cdot F$$

$$e = 1, \quad ha \frac{a}{d} > 2,8$$

$$e = 2,8 \cdot \frac{d}{a}, \quad ha \frac{a}{d} < 2,8$$

(4.3.14.) RILEM TC 162-TDF (2003)

$$V_u = V_c + V_{cf} + V_{sw}$$

$$V_{cf} = 0,7 \cdot k_f \cdot k \cdot \tau_{cf} \cdot b \cdot d$$

$$\tau_{cf} = 0,12 \cdot f_{R,4}$$

5. KÍSÉRLETEK EREDMÉNYEI

5.1. PRÓBAGERENDÁK

A kutatás során összesen 12 darab, azonos betonkeverékből készült, 60 * 120 * 800 mm-es gerendát készítettünk, melyek adatait az alábbi táblázatban foglaltam össze:

	JELE	SZÁLADAGOLÁS	SZÁLAK TÖMEGE	SZÁLAK DB	HOSSZVAS.
01	P0	0 kg/m ³	0 g	0	nincs
02	P25	25 kg/m ³	158 g	cca. 21700	nincs
03	P50	50 kg/m ³	316 g	cca. 43400	nincs
04	P75	75 kg/m ³	474 g	cca. 65100	nincs
05	N1	0 kg/m ³	0 g	0	1Ø8 FRP
06	N2	0 kg/m ³	0 g	0	1Ø8 FRP
07	N3	0 kg/m ³	0 g	0	1Ø8 FRP
08	N4	0 kg/m ³	0 g	0	1Ø8 FRP
09	SZ1	50 kg/m ³	316 g	cca. 43400	1Ø8 FRP
10	SZ2	50 kg/m ³	316 g	cca. 43400	1Ø8 FRP
11	SZ3	50 kg/m ³	316 g	cca. 43400	1Ø8 FRP
12	SZ4	50 kg/m ³	316 g	cca. 43400	1Ø8 FRP

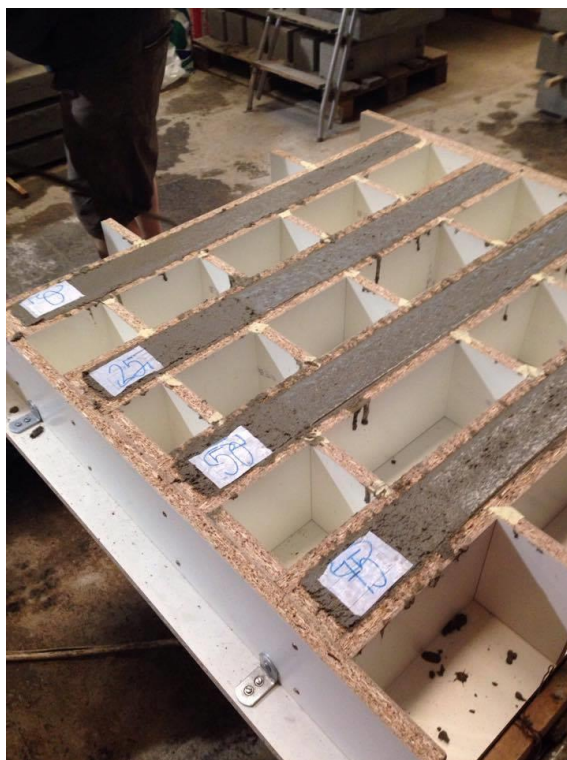
2. táblázat – Kísérletek során vizsgált gerendák adatai

A táblázatban szereplő gerenda jelek magyarázata a következő:

- P0, P25, P50, P75: a hajlításvizsgálathoz használt első körös próbagerendák, különféle szálerősítéssel, hosszanti vasalás nélkül. Ezek segítségével kiválasztottunk a továbbiakban használt optimális számennyiséget, és kísérleti eredményeikből kiszámoltuk a gerendák maradó húzószilárdságát. A „P” betű a próbát jelenti, a 0-25-50-75 pedig a száladagolásra utal
- N1, N2, N3, N4: nyírásvizsgálathoz használt szálerősítés nélküli, hosszanti vasalással rendelkező gerendák, ahol az „N” a normál betonra utal, a számozás pedig megkülönböztetés.
- SZ1, SZ2, SZ3, SZ4: nyírásvizsgálathoz használt szálerősített, hosszanti vasalással rendelkező gerendák, ahol az „SZ” a szálakat jelenti, a számozás pedig szintén csak megkülönböztetés.

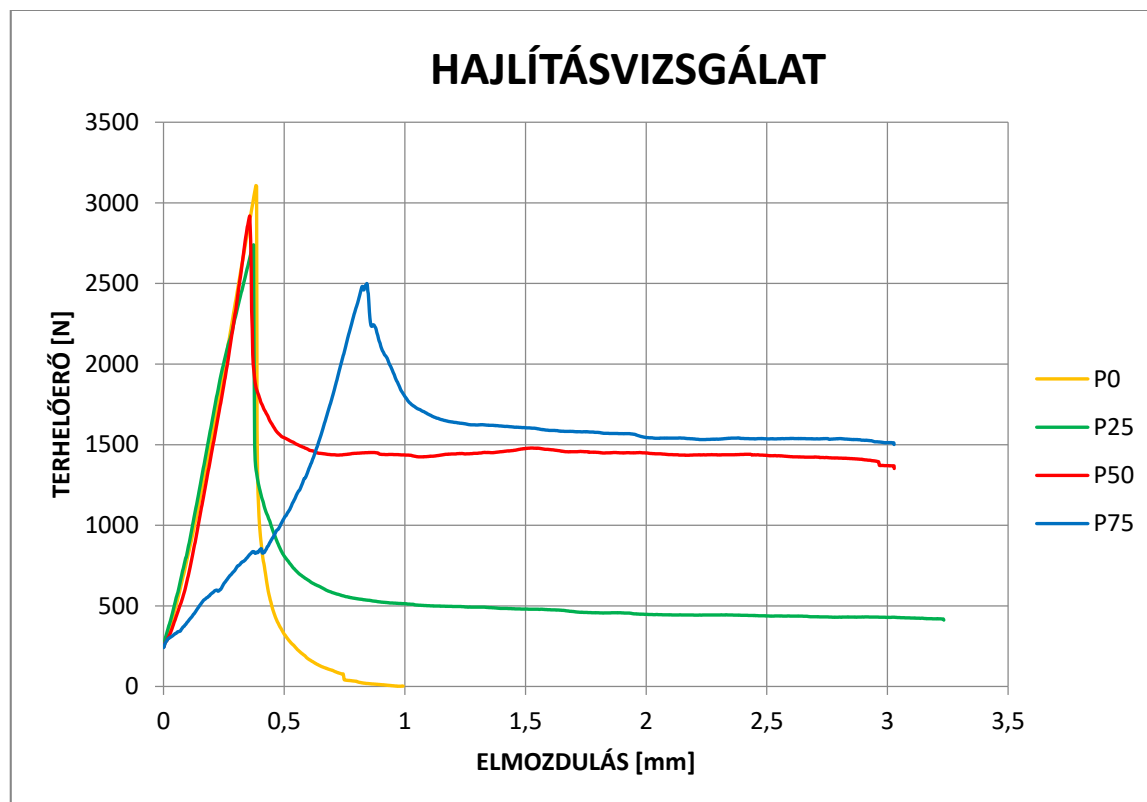
5.2. HAJLÍTÁSVIZSGÁLAT

A gerendák nyírási viselkedésének vizsgálata előtt szükséges volt a hajlítási viselkedés megfigyelése és a megfelelő száladagolás meghatározása. Ehhez négy darab 60 * 120 * 800 mm-es, hosszanti vasalás nélküli gerendát készítettük – egyet szálerősítés nélkül (P0 jelű), a másik hármat pedig különféle száladagolással: 25 kg/m³, 50 kg/m³, 75 kg/m³ (P25, P50 és P75 jelű gerendák).



15. ábra - Hajlításvizsgálathoz használt gerendák [saját kép]

Három pontos hajlításvizsgálatnak vetettük alá ezeket a gerendákat, aminek a célja az volt, hogy a tönkremenetel és az erő – elmozdulás diagram [16. ábra] függvényében meghatározzuk a szálak hatását a húzószilárdságra és a beton duktilitására, valamint, hogy kiválasszuk a nyírásvizsgálatokhoz alkalmazott legoptimálisabb szálmennyiséget. A hajlításvizsgálat további célja, hogy kiszámoljuk a szálerősítésű beton berepedést követő maradó húzószilárdságát, amely tulajdonság a legjobban jellemezi a szálerősítés segítő hatását.



16. ábra – Hajlításvizsgálat során használt különféle száladagolású gerendák erőelmozdulás diagramja

A szálak nélküli beton esetén lágyuló görbe nem látható, a repesztő teher elérése után a gerenda hirtelen tönkrement. A szálerősítésű daraboknál a csúcsterher elérése után a közel konstans értéken maradó húzási ellenállások jellegzetes lágyuló görbéket írtak le.

A repesztő teher a szál nélküli valamint a P25-ös és a P50-es gerendáknál közel azonos volt, míg a P75-nél visszaesést tapasztaltunk, valószínűleg a nagy mennyiségű acélszál rossz elkeveredése miatt.

A P0 (szálak nélküli beton) görbéje a repesztő teher elérése után meredeken esik, a gerenda kis lehajlásnál ridegen tönkremegy.

A P25 (25 kg/m^3 száladagolású beton) a repesztő teher elérése után szintén meredeken esik, majd a csúcsterhelés ötödénél, 500 N teherszintnél közelítőleg állandó értéket vesz fel, majd csökkenő tendenciát mutat.

A P50-nél (50 kg/m^3 száladagolású beton) kisebb a görbe visszaesése, nagyobb teherszinten (nagyjából a csúcsterhelés fele) vesz fel konstans értéket, a csökkenés kevésbé intenzív.

A P75 (75 kg/m³ száladagolású beton) esetén az első repedés nagyobb lehajlásnál következett be, de kisebb értéket vett fel, mint a többi adagolás esetén. Ezután a görbe a repesztőteherhez közeli teherszinten közel konstans értéket vett fel.

Tehát a hajlításvizsgálat azt mutatta, hogy az acélszálak nem növelik a betongerenda teherbírását, azonban jelentősen megnövekedett a gerendák duktilitása a száltartalom függvényében, melyet a törési energia jellemez. Ezt a görbe alatti területek összehasonlításával tudjuk bizonyítani [3. táblázat].

A döntésünk így az 50 kg/m³-es száladagolásra esett, mivel ennél sokkal kedvezőbb viselkedést tapasztaltunk, mint a 25 kg/m³-esnél; a 75 kg/m³ adagolás viszont nem mutatott többlet teherbírást, ami indokolná e száladagolás használatát.

Az eredményül kapott erő-elmozdulás görbékből visszszámoltuk a szálerősítésű betonanyag húzószilárdságát. A maradó teherszintből kiszámoltuk a tartó nyomatéki teherbírását, majd ebből visszszámoltuk a keresztmetszet maradó húzószilárdságát. Ez a húzószilárdság az irodalomban található elméleti összefüggések alapadata.

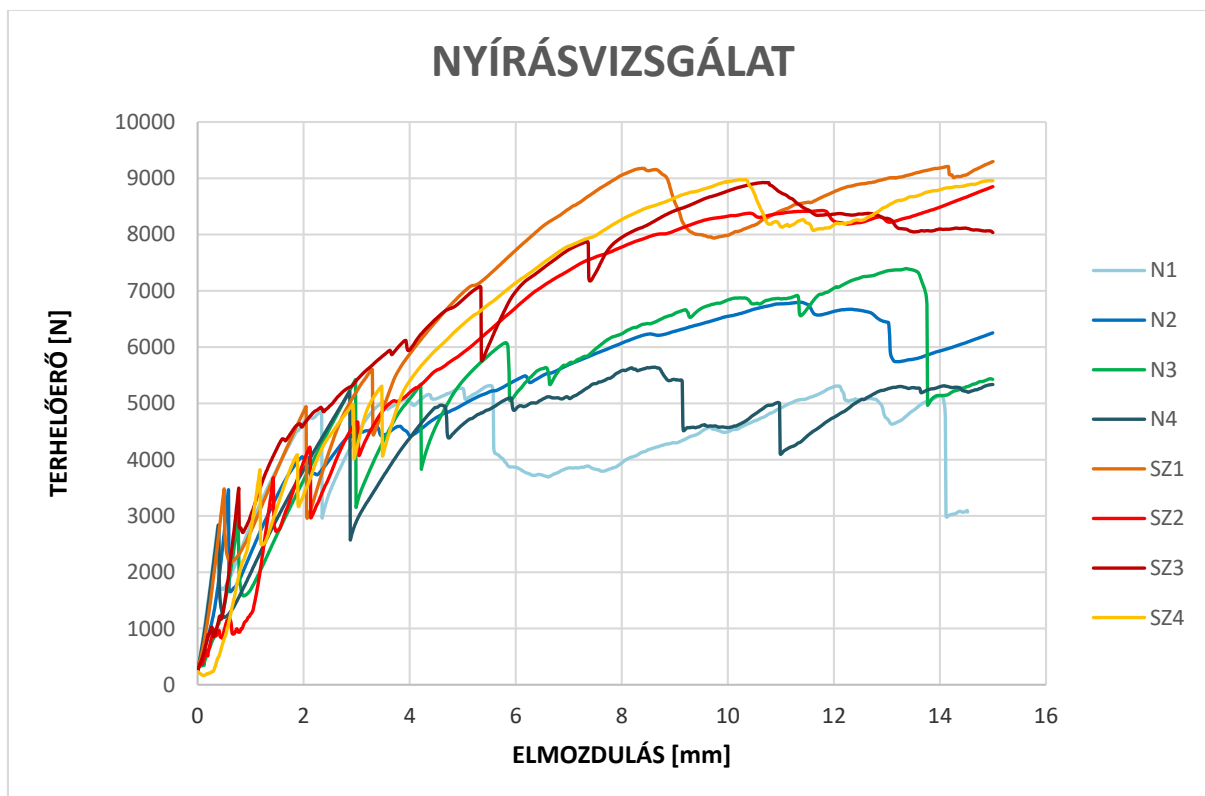
A hajlításvizsgálat és a számítások eredményeit a 3. táblázatban foglaltam össze.

GER. JELE	SZÁLAD. [kg/m ³]	MAX. TÖRŐTEHER [N]	MARADÓ TEHERSZINT [N]	MARADÓ HÚZÓSZIL. [N/mm ²]	TÖRÉSI ENERGIA	TÖRÉSI ENERGIA NÖVEKEDÉS [%]
P0	0	3107,65	0	0	104 000	100
P25	25	2740,13	454,91	0,395	1 242 581	1195
P50	50	2919,25	1441,78	1,252	3 261 485	3136
P75	75	2499,48	1560,89	1,355	3 531 675	3396

3. táblázat - Hajlításvizsgálat és számítások eredményei

5.3. NYÍRÁSVIZSGÁLAT

Ezután nyolc darab újabb gerendát készítettünk, négyet szálerősítéssel és négyet anélkül, hosszirányú erősítésként 8 mm átmérőjű FRP betétet alkalmazva. A gerendák mérete szintén 60 * 120 * 800 mm volt. A szálerősített daraboknál az előzetesen kiválasztott optimális szálmennyiséget (50 kg/m³) alkalmaztuk. Ismét hárompontos hajlításvizsgálatnak vetettük alá ezeket a próbadarabokat, majd a szálerősített és a szálak nélküli gerendák vizsgálat során mért erő- elmozdulás kapcsolatát [17. ábra] összehasonlítottuk, így megfigyelhető a szálak hatása a nyírószilárdságra és a beton duktilitására, valamint a tönkremeneteli mód változására.

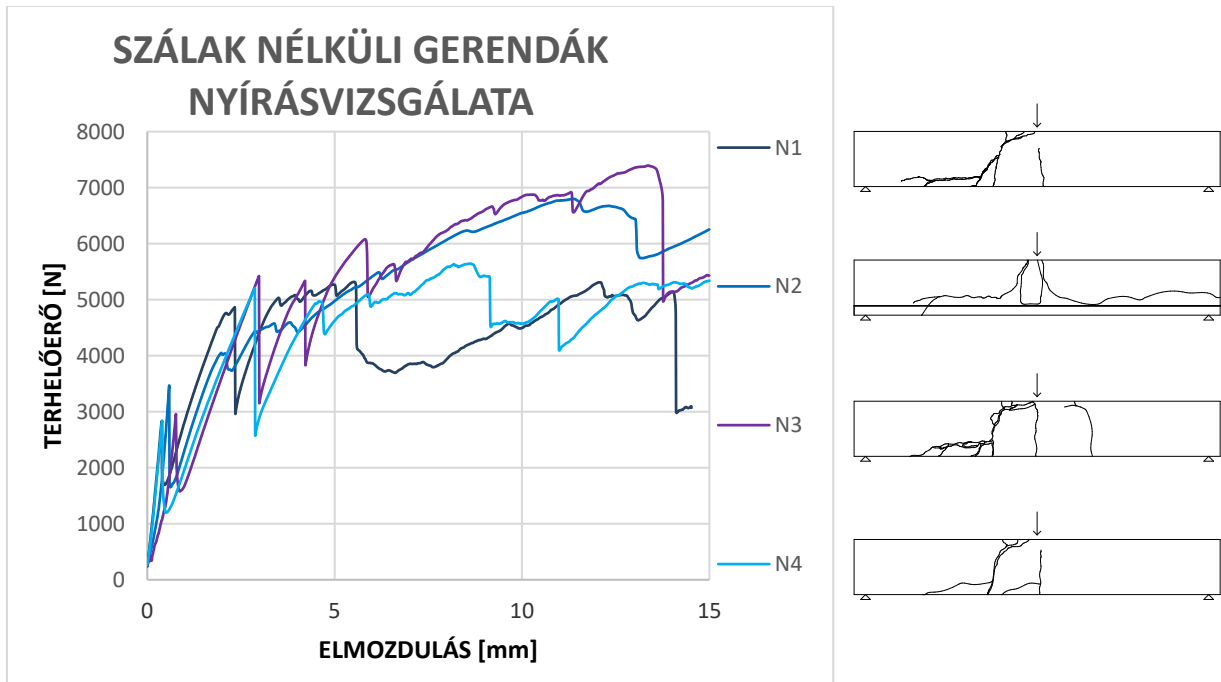


17. ábra - Nyírásvizsgálat során használt szálerősített és anélküli gerendák erő-elmozdulás diagramjai

A kísérleteket különböző elmozdulás értékekig végeztük, de az eredményeket egyöntetűen 15 mm lehajlásig vizsgáljuk, az egyszerűbb összehasonlítás érdekében. A diagramból is jól látható, hogy a szálerősítés nélküli (N1-N4; kék és zöld görbék) és a szálerősítésű (SZ1-SZ4; piros és narancs görbék) darabok vizsgálata során más tendenciájú görbék rajzolódtak ki.

Az alkalmazott hosszbetétek megnövelték a hajlítási teherbírást, így a gerendák nyírásra mentek tönkre. A gerendák törőterhe a nyírási teherbírásnak felel meg. A görbékből is látható, hogy a teherbírás látványosan megnőtt a szálak hozzáadásakor.

A kengyelek és szálak nélküli normál beton gerendák (N1, N2, N3, N4) törése jellegzetes volt, azaz egyetlen átlós repedés alakult ki a gerincnél, majd terjedt tovább a gerenda tetejéig. Az erőbevezetés környezetében a nyomott betonzóna összemorzsolódott. Az első repedés megjelenése után a hosszirányú vasalás segítő hatása miatt a gerenda tovább bírta a terhelőerő növekedését, a gerenda nem szakadt le. A tönkremenetelt a hosszanti vasalás megcsúszása jelentette.



18. ábra - Szálak nélküli gerendák erő-elmozdulás görbéi, és a hozzájuk tartozó repedéseképek



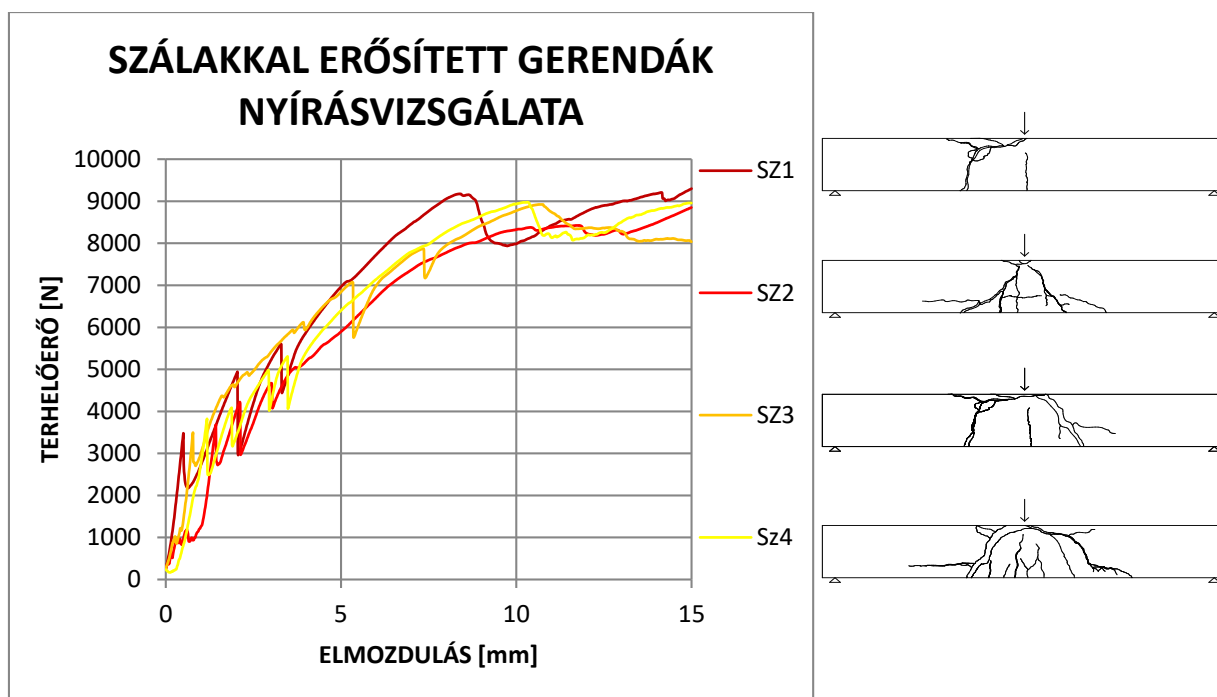
19. ábra – Szálak nélkül, hosszanti vasalással rendelkező gerendák törésképei; bal felső: N1, jobb felső: N2, bal alsó: N3, jobb alsó: N4 [saját képek]

A szálerősített gerendák (SZ1, SZ2, SZ3, SZ4) szintén nyírásra mentek tönkre, de a szálak nélküli betonnál kb. 40%-al nagyobb terhelőerőnél. A szálak pozitív hatását bizonyítja, hogy több átlós repedés jött létre a nyírási síkon, az első repedés kialakulása után még számos kisebb keletkezett. A nyírási repedések mellett megjelentek az FRP betétek megcsúszásából adódó alsó oldali hosszanti repedések is.

A nyírási vasaláshoz hasonlóan a szálak áthidalják a repedéseket, gátolva azok megnyílását. A szálak azonban mindezt kisebb területegységen teszik, a gerenda minden keresztmetszetében, így biztosítva globális nyírási vasalást.

A tönkremenetel akkor következett be, amikor a szálak már nem tudták áthidalni a nagy mértékben megnyílt repedéseket.

A görbékből is jól látszik, hogy a szálerősítésű gerendák szórása sokkal kisebb, mint a szálak nélkülié, továbbá, hogy a szálak hatása miatt megnőtt a próbatestek törés utáni alakváltozása.

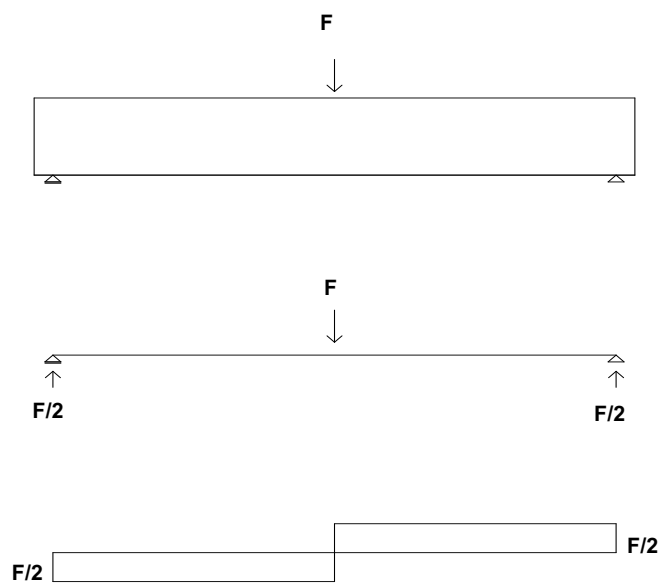


20. ábra - Szálerősített gerendák erő-elmozdulás görbéi, és a hozzájuk tartozó repedésképek

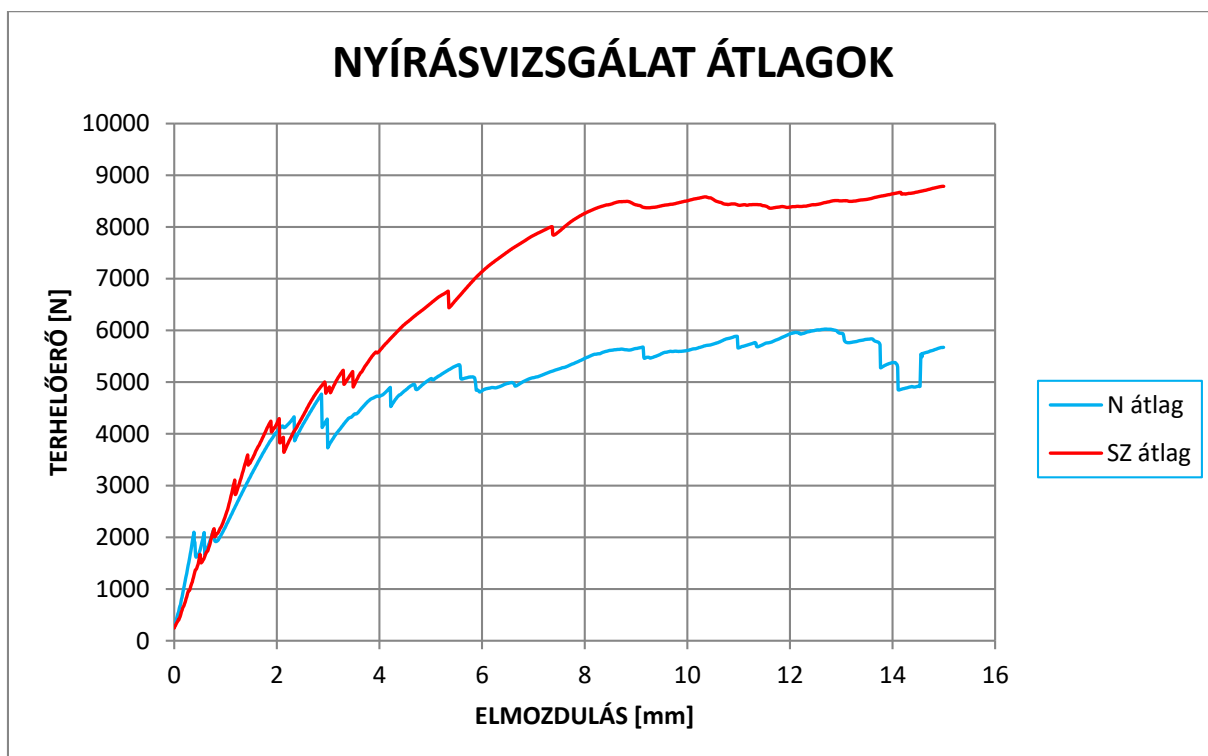


21. ábra - Szálerősítésű, hosszanti vasalással rendelkező gerendák törésképei; bal felső: SZ1, jobb felső: SZ2, bal alsó: SZ3, jobb alsó: SZ4 [saját képek]

A kísérleti eredményeket átlagoltam, az így kapott görbéket [23. ábra] és számadatokat használtam a tapasztalati egyenletekkel való összevetés alapjaként. A mért terhelőerő és az ebből számított nyírási teherbírás értékeit a 4. táblázat foglalja össze.



22. ábra - Kéttámaszú gerendanyírási igénybevétele koncentrált teher esetén



23. ábra - Nyírásvizsgálati eredmények átlagértékei görbéken ábrázolva

GERENDA JELE	MAX. TÖRŐTEHER: F_{max} [N]	NYÍRÁSI TEHERBÍRÁS: V_{Rd} [N]	ARÁNY [%]
N1	5316,68	2658,34	
N2	6796,50	3398,25	
N3	7393,89	3696,95	
N4	5642,98	2821,49	
átlag	6287,51	3143,76	100,00%

SZ1	9298,48	4649,24	
SZ2	8852,16	4426,08	
SZ3	8924,18	4462,09	
SZ4	8974,95	4487,48	
átlag	9012,44	4506,22	

4. táblázat - Kísérleti eredmények számszerűen, azok átlagértékei

6. VERIFIKÁCIÓ: ÖSSZEVETÉS TAPASZTALATI EGYENLETEKKEL

KIINDULÁSI ADATOK

$b := 60\text{mm}$	gerenda szélessége
$h := 120\text{mm}$	gerenda magassága
$a := 750\text{mm}$	meztámasztási pontok közötti távolság
$f_{ck} := 20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	hengersizilárdság karakterisztikus értéke C20/25 beton esetén
$f_{ck.cube} := 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	kockaszilárdság karakterisztikus értéke C20/25 beton esetén
$L := 13\text{mm}$	szálak hossza
$D := 0.3\text{mm}$	szálak átmérője
$\rho_f := 0.007349\%$	szálak térfogatszázaléka
$d_f := 0.5$	szálak alakjától függő érték
$\phi := 8\text{mm}$	hosszanti vasalás (FRP) átmérője
$A_s := \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \cdot \pi = 50.27 \cdot \text{mm}^2$	hosszanti vasalás keresztmetszete
$c_{nom} := 20\text{mm}$	betontakarás
$d := h - c_{nom} - \frac{\phi}{2} = 96 \cdot \text{mm}$	gerenda dolgozó magassága
$\frac{a}{d} = 7.81$	gerendára jellemző arányszám

6.1. NARAYANAN & DARWISH (1987)

Az egyenlet szerint a szálerősített gerenda nyírási ellenállása a következő:

$$V = V_a + V_b + V_c + V_d$$

ahol V_a : a nyírósúrlódás függőleges komponense, melyet elhanyagolhatunk (biztonság javára közelítünk vele);

V_b : a szálak repedés menti kihúzóerő függőleges komponense;

V_c : beton nyírási teherbírása a nyomott betonzónában;

V_d : hosszanti vasalás teherbírása, mely figyelembe veszi a csaphatást.

SZÁLAK HATÁSA

$$v_b = 0.41 \cdot \tau_{bf} \cdot F$$

ahol $\tau_{bf} := 4.15 \frac{N}{mm^2}$ szálak határfelületi feszültsége

$$F := \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \rho_f \cdot d_f = 0.00159228$$
 szálfaktor

$$v_b := 0.41 \cdot \tau_{bf} \cdot F = 0.00270927 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

BETON NYÍRÁSI TEHERBÍRÁSA

$$v_c = e \cdot A' \cdot f_{spfc}$$

ahol $e := 1.0$

dimenzió nélküli tényező, amely figyelembe veszi az ívhatást ($e=1.0$, ha $a/d > 2.8$; és $e=2.8 \cdot d/a$, ha $a/d < 2.8$)

$$A' := 0.24$$

dimenzió nélküli konstans

$$f_{spfc} := \frac{f_{ck.cube}}{(20 - \sqrt{F})} + 0.7 \frac{N}{mm^2} + 1 \frac{N}{mm^2} \cdot \sqrt{F} = 1.99 \cdot \frac{N}{mm^2}$$
 szálerősített beton hengerszilárdsága

$$v_c := e \cdot A' \cdot f_{spfc} = 0.4782 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

HOSSZANTI VASALÁS TEHERBÍRÁSA

$$v_d = e \cdot B' \cdot \rho \cdot \frac{d}{a}$$

ahol $e := 1.0$

$$B' := 80 \frac{N}{mm^2}$$

$$\rho := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.87\%$$

dimenzió nélküli tényező, amely figyelembe veszi az ívhatást ($e=1.0$, ha $a/d > 2.8$; és $e=2.8 \cdot d/a$, ha $a/d < 2.8$)

dimenzióval rendelkező konstans

húzott vashányad

$$v_d := e \cdot B' \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} = 0.0894 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

KERESZTMETSZET NYÍRÁSI TEHERBÍRÁSA

$$v_{u.Narayanan} := v_b + v_c + v_d = 0.5702 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

nyírófeszültség

$$V_{Narayanan} := v_{u.Narayanan} \cdot b \cdot h = 4105.78 \text{ N}$$

nyírási teherbírás

6.2. ASHOUR ET. AL (1992)

$$v_{u.Ashour} := \left(0.7 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 7 \cdot F \right) \cdot \frac{d}{a} + 17.2 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} = 0.42 \frac{N}{mm^2}$$

nyírófeszültség

$$V_{Ashour} := v_{u.Ashour} \cdot b \cdot h = 3744.00 \text{ N}$$

nyírási teherbírás

6.3. ZSUTTY'S ET. AL (1992)

$$v_{u.Zsutty} := \left(2.11 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}} + 7 \cdot F \right) \cdot \left(\rho \cdot \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.60 \frac{N}{mm^2}$$

nyírófeszültség

$$V_{Zsutty} := v_{u.Zsutty} \cdot b \cdot h = 4320.00 \text{ N}$$

nyírási teherbírás

6.4. RILEM TC 162-TDF (2003)

E szerint a tervezési módszer szerint a nyírási teherbírás 3 különböző összetevőből áll. Az Eurocode 2 egyenleteit használták fel a nyírásra, a szálak hatását egy további additív taggal vették figyelembe.

ahol $V = V_c + V_w + V_f$

V_c : beton nyírási teherbírása;

V_w : nyírási vasalás által felvett nyíróerő (esetünkben nincs);

V_f : szálak által felvett nyíróerő.

SZÁLAK HATÁSA

$$V_f = 0.7 \cdot k_f \cdot k \cdot \tau_{df} \cdot b \cdot d$$

ahol $k_f := 1$

$$k := 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} = 2.44$$

$$f_{R50} := 1.252 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{df} := 0.12 \cdot f_{R50} = 0.15 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_f := 0.7 \cdot k_f \cdot k \cdot \tau_{df} \cdot b \cdot d = 1480.12 \text{ N}$$

tényező, ami figyelembe veszi a peremek hozzájárulását T szelvények esetén (téglalap keresztmetszetnél ez az érték 1)

gerenda magasságát figyelembe vevő tényező

maradó húzószilárdság 50 kg/m³-es száladagolásnál

szálak nyírószilárdsága

BETON NYÍRÁSI TEHERBÍRÁSA

$$V_c = \left[\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b \cdot d$$

ahol $\gamma_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

$$\sigma_{cp} := 2.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

beton térfogsúlya

C20/25 beton húzószilárdsága

$$V_c := \left[\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b \cdot d = 2704.56 \text{ N}$$

KERESZTMETSZET NYÍRÁSI TEHERBÍRÁSA

$$V_{u,RILEM} := V_f + V_c = 4040.87 \text{ N}$$

	TAPASZTALATI EGYENLET EREDMÉNYE [N]	NYÍRÁSVIZSGÁLAT ÁTLAGEREDMÉNY [N]	EREDMÉNYEK EGYEZÉSE [%]
6. 1.	4105,78	4506,22	91,11
6. 2.	3744,00		83,09
6. 3.	4320,00		95,87
6. 4.	4295,51		95,32

5. táblázat - Egyenletek és vizsgálatok eredményei

Láthatjuk, hogy az egyenletek a biztonság javára közelítve megfelelő eredményt adnak. Az egyenletekből kapott nyíróerő értékek közül a *Narayanan & Darwish (1987) (6.1.)*, és a *RILEM TC 162-TDF (2003) (6.4.)* ajánlások a kísérleti eredményhez közeli értéket adnak. A legpontosabb eredményt a *Zsutty's et. al (1992) (6.3.)* képlet adta, mely az *Ashour et. al (1992) (6.2.)* képletet dolgozza fel, ami pedig a legkevésbé pontos eredményt adta. A felsorolt, 90%-nál nagyobb egyezést mutató egyenletek használhatók arra, hogy az acélszál erősített gerendáknál a valóságnak közel megfelelő nyíróerő értékeket kapjunk.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett laborkísérletek során azt vizsgáltuk, hogy a véletlenszerű elhelyezkedésű, de egyenletesen elkevert szálak hogyan változtatják az ágyazó anyagunk, vagyis a beton mechanikai tulajdonságait. Azt teszteltük, hogy az alkalmazott rövid acél szál hatással van-e a betongerendák hajlítási teherbírására, duktilitására, valamint nyírási teherbírására. Kutatásunkban arra a kérdésre kerestük a választ, hogy megfelelő adagolású rövid acél szállal helyettesíthető-e a gerenda nyírási vasalása - a kengyelezés.

Jelen dolgozat további célja volt a szálerősítésű betonok nyírószilárdságára vonatkozó tapasztalati egyenletek alkalmazhatóságának vizsgálata.

A tesztekhez használt kisméretű gerendák tönkremeneteli módját hárompontos (másnéven felezőpontos) hajlítóvizsgálattal végeztük, ahol a gerendák hajlításra vagy nyírásra mehetnek tönkre.

Első körben erősítés nélküli beton és három különféle száladagolású, hosszanti vasalás nélküli próbagerendák hárompontos hajlításvizsgálatát végeztük, hogy megvizsgáljuk a szálak hatását, kiválasszuk a megfelelő adagolást. A hajlításvizsgálat azt mutatta, hogy az acélszálak nem növelik a betongerenda teherbírását, azonban jelentősen megnövekedett a gerendák duktilitása a száltartalom függvényében, melyet a törési energia jellemez. A nyírásvizsgálatoknál alkalmazott 50 kg/m^3 száladagolás esetén a duktilitás a sima beton gerendáéhoz képest harmincegyszer nagyobb értéket mutatott.

Az eredményül kapott erő-elmozdulás görbékből visszszámoltuk a szálerősítésű betonanyag húzószilárdságát, mely az irodalomban található elméleti összefüggések alapadata.

Ezután újabb gerendákat készítettünk szálerősítéssel és anélkül is, hosszirányú erősítésként FRP betétet alkalmazva. A szálerősített daraboknál az előzetesen kiválasztott optimális szálmennyiséget alkalmaztuk. Szintén hárompontos hajlításvizsgálatnak vetettük alá ezeket a próbadarabokat, majd a szálerősített és a szálak nélküli gerendák vizsgálat során kapott erő-elmozdulás görbéit összehasonlítottuk. Az alkalmazott hosszbetétek megnövelték a hajlítási teherbírást, így a gerendák nyírásra mentek tönkre. A szálak pozitív hatását bizonyította, hogy több átlós repedés jött létre a nyírási síkon, az fő nyírási repedés kialakulása után még számos kisebb keletkezett, valamint hogy megnőtt a próbatestek törési alakváltozása.

A gerendák törőterhe a nyírási teherbírásnak felel meg, ami látványosan megnőtt a szálak hozzáadásakor. Eredményül azt kaptuk, hogy az acélszálak 43%-kal növelik meg átlagosan a

nyírási teherbírást. A kísérleti eredményeket összevetettük az irodalomban található nyírószilárdságra vonatkozó tapasztalati egyenletekkel, vizsgálva azok alkalmazhatóságát.

Az egyenletekből kapott nyíróerő értékek közül a Narayanan & Darwish (1987) , és a RILEM TC 162-TDF (2003) ajánlások a kísérleti eredményhez közeli értéket adnak. A legpontosabb eredményt a Zsutty's et. al (1992) képlet adta. A felsorolt egyenletek 90%-nál nagyobb egyezést mutatnak a kísérleti eredményekkel, így ezek használhatók arra, hogy az acélszál erősített gerendáknál a valóságnak megfelelő nyíróerő értékeket kapjunk.

Az elvégzett kísérletek tanulsága alapján a vizsgált acél szálak jól használhatók a beton tulajdonságainak javítására, megnövelik a duktilitást és a nyírási teherbírást, alkalmazhatók a betongerendákban nyíróerő felvételére – akár méretezett nyírási vasalás nélkül, akár azt kiegészítve.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a dolgozat elkészítésében való rengeteg segítségért, hasznos tanácsért és támogatásért konzulenseimnek Pluzsik Anikónak és Juhász Károly Péternek.

Továbbá köszönöm a Czakó Adolf Laboratórium munkatársainak, elsősorban Óvári Vilmos betontechnológus és Sebestyén Ottó technikus Uraknak a próbatestek elkészítésében nyújtott nélkülözhetetlen segítséget.

A keverőgépet a Fiberguru Kft., a cementet a Duna-Dráva Cement Kft., az adalékanyagokat a York bánya biztosította. A kísérletben használt rövid acél szálakat az ARMCORP Innotech Kft., a mérésekhez használt ZWICK ROELL Z150 univerzális törőgépet a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosította.

9. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1.] Massányi – Dulácska: Statikusok könyve (Műszaki Kiadó, 1989.)
- [2.] Kollár László: Vasbetonszerkezetek I. (Műegyetemi Kiadó, 1998.)
- [3.] Dr. Balázs L. György és Polgár László: A szálerősítésű betonok múltja, jelene és jövője (VASBETONÉPÍTÉS 1999/1; www.fib.bme.hu/)
- [4.] Dr. Kausay Tibor: Szálerősítésű betonok szabványosított vizsgálatai és néhány tulajdonsága (1999)
- [5.] Juhász Károly Péter: Szintetikus makro szálerősítésű betonok (Diplomamunka feladat, 2014)
- [6.] Juhász Károly Péter: Mikro és makro szintetikus szálakkal készített beton próbatestek vizsgálata (2014)
- [7.] Czoboly Olivér és Balázs L. György: Szálak lehetséges károsodása betonban való keverés során (VASBETONÉPÍTÉS 2014/4; www.fib.bme.hu/)
- [8.] Halvax Katalin: Szálerősítésű betonok szilárdsági jellemzőinek meghatározása (AGY – Anyagvizsgálat a gyakorlatban szakmai szeminárium 2012)
- [9.] Kiss Lilla, Varga Ákos: Acélszál erősítésű vasbeton gerendák repedezettségi állapota (Debreceni Műszaki Közlemények 2011/2 KÜLÖNSZÁM)
- [10.] Sólyom Sándor – Dr. Balázs L. György: Szálerősített polimer (FRP) betétek (VASBETONÉPÍTÉS 2015/1; www.fib.bme.hu/)
- [11.] Daniel de Lima Araújo, Fernanda Gabrielle Tibúrcio Nunes, Romildo Dias Toledo Filho and Moacir Alexandre Souza de Andrade: Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams (Acta Scientiarum, Technology. www.uem.br/acta , Maringá, v. 36, n. 3, p. 389-397, July-Sept., 2014)
- [12.] Eleonora Mondo: Shear Capacity of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams without Conventional Shear Reinforcement (Master of Science Thesis – Stockholm, Sweden 2011)
- [13.] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete (Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 35, November 2002, pp 579-582)