



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3

BETON MARADÓ HÚZÓSZILÁRDSÁGA SZÁLKOKTÉL ALKALMAZÁSA ESETÉN

Készítette: Kerényi Ramóna

(BSc hallgató)

Konzulensek: Czoboly Olivér, doktorandusz

Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva Eszter, adjunktus

Dr. Balázs L. György, egyetemi tanár, tanszékvezető

Budapest, 2015. november 2.

TARTALOM

1. BEVEZETÉS	2
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	3
2.1. Szálerősítésű beton	3
2.2. Szálerősítésű betonok maradó hajlító-húzószilárdsága	14
2.3. CT (Computed Tomography).....	17
3. CÉLKITŰZÉSEIM	20
4. KÍSÉRLETI ANYAGOK.....	22
4.1. Alkalmazott szálak	22
4.2. Alkalmazott betonösszetétel.....	24
5. KÍSÉRLETI MÓDSZER.....	25
5.1. Próbatetek elkészítésének módja	25
5.2. Vizsgálatok.....	26
5.2.1. Testsűrűség mérés	26
5.2.2. Hajlító-húzószilárdság vizsgálat.....	27
5.2.3. Szálmennyiség a törési keresztmetszetben.....	29
5.2.4. CT (Computed Tomography) vizsgálat.....	30
6. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK	31
6.1. Hajlító-húzószilárdság.....	31
6.2. CT vizsgálati eredmények	40
7. ÖSSZEFOGLALÁS	48
8. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS.....	51
9. HIVATKOZÁSOK	52
10. MELLÉKLET	55
10.1. Teher-CMOD diagramok	55
10.2. Testsűrűség.....	59
10.3. Szálak darabszáma a törési keresztmetszetben.....	60

1. BEVEZETÉS

Szálerősítésű betonok alkalmazása egyre elterjedtebb napjainkban. A szálerősítésű beton készítése azon az elven alapszik, hogy a ridegnek tekinthető betonból igyekszünk duktilisabb anyagot létrehozni.

A szálerősítésű beton alkalmazás kezdetének 1874-et tekintjük, amikor Berand fémhulladékot tett a betonba. Az 1960-as évekig a szálerősítésű betonok alkalmazásának első periódusa volt, amelyre a szálerősítésű beton ritka használata volt jellemző. A szálerősítésű beton alkalmazása az 1960-as évek elején lendült fel, ezt nevezhetjük második periódusnak. Napjainkban egyre több kutatás kapcsolódik a különböző szálakkal erősített betonokhoz, és egyre szélesebb körben alkalmazzák a szálerősített betonokat [*Kausay, 1999*].

A betonhoz különböző méretű és anyagú szálakat adagolunk, ezzel javítva a beton különböző tulajdonságain. Kezdetben az acélszál alkalmazása volt jellemző, melyet a megszilárdult beton tulajdonságainak javítása céljából adtunk a betonhoz. Jellemző alkalmazási területe az ipari padlók, ahol nagy tömegű gépek gyakorolnak intenzív dinamikus hatást a padlóra. Az acélszálak mellett egyre elterjedtebb a műanyagszálak használata. A mikro műanyagszálak javítanak a friss beton tulajdonságain, míg a makro műanyagszálakat már esetenként az acélszálak helyettesítésének céljából is alkalmazzák. A műanyagszálak előnye az acélszálakkal szemben, hogy nem korrodálódnak.

Különböző méretű és anyagú szálak eltérőképpen javítják a beton tulajdonságait. Esetenként felmerülhet az igény, hogy egyszerre több betontulajdonság (friss beton és szilárd beton tulajdonság) javítása legyen elérhető különböző szálak egyidejű alkalmazásával.

Kutatásom témája lett ezért: különböző típusú szálak kombinálásával (szálkoktéllal) miként javítható a beton *maradó hajlító-húzószilárdsága*.

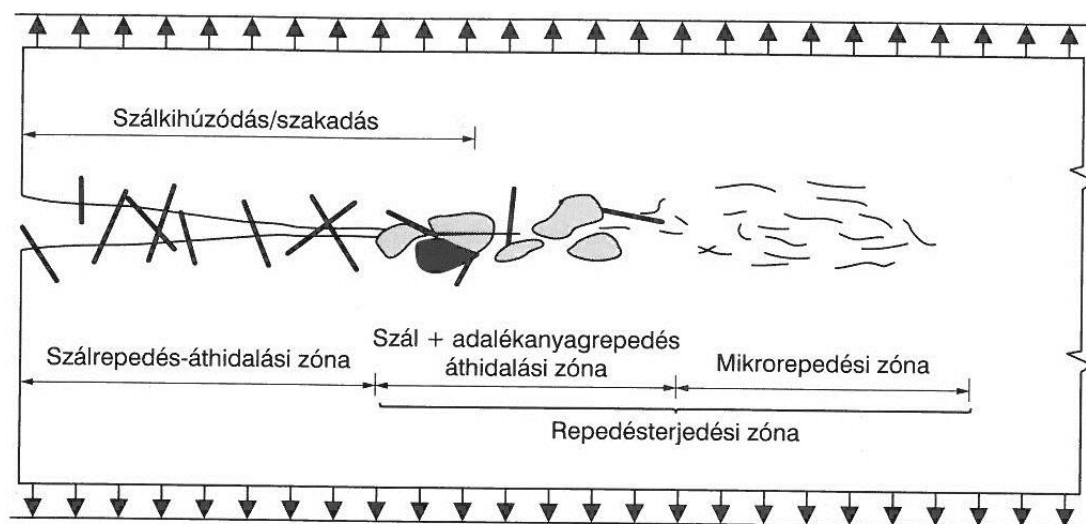
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Szálerősítésű beton

Szálerősítésű betonhoz különböző anyagú szálakat alkalmaznak: acél-, műanyag-, üveg-, aramid-, valamint természetes szálakat. 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.

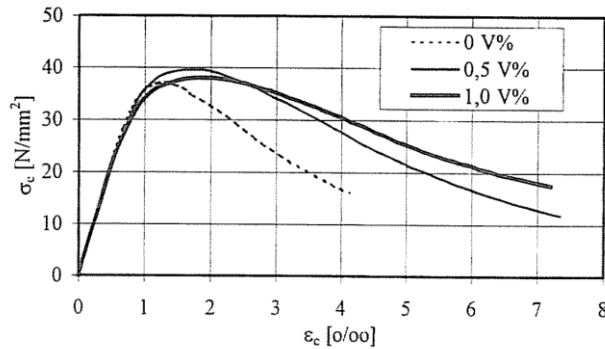
Az **acélszálak** alkalmazása nyúlik vissza legrégebbre a szálerősítésű betonok történetében, és ma is az acélszálak használata a legelterjedtebb. Kezdetben leginkább ipari padlók készítéséhez használták, ami ma már teljesen általános felhasználási módja, azonban egyre elterjedtebb lett nyírású vasalás kiváltásának céljából való alkalmazása is. Az acélszálak a betonacél részleges, illetve esetleg teljes kiváltására szolgál. A szálak a berepedés utáni állapotban felveszik a betonban keletkező maradó húzóerőket. A szálak mennyiségétől és típusától függően nő a beton repedésáthidaló képessége (2.1. ábra), törési összenyomódása (2.2. ábra), nő a beton szívóssága (energiaelnyelő képessége), nő a fáradási szilárdsága (2.3. ábra), valamint fajlagos ütőmunka bírása [*Horst, Volkner, 2004*].



2.1. ábra: Beton repedésáthidaló képessége [*Li-Maalej, 1996*]

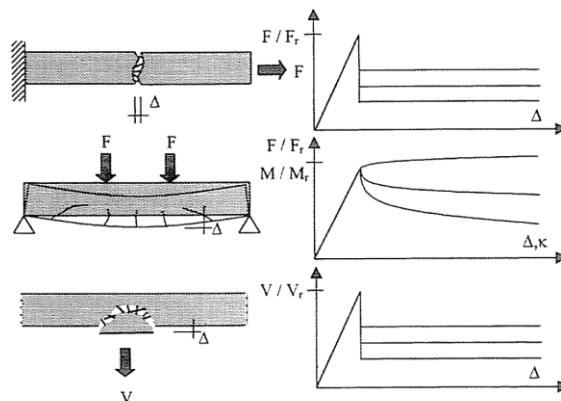
Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

A 2.2. 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.



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

A 2.3. ábra a tengelyirányú húzó, hajlító, és a tengelyirányra merőleges húzó igénybevételek esetén kapható erő-elmozdulás diagramot mutatja [Falkner, 1998]. A repedést követően a szálerősítés alkalmazása esetén a húzófeszültség visszaesik, de nem esik le zérusra, hanem a berepedés után, ugyan a törő erőnél alacsonyabb, de további teherbírásra alkalmas. Közel rugalmas-képlékeny viselkedést tanúsít a gerenda erő-lehajlás, vagy nyomaték-görbület grafikonja. A görbe kicsit alacsonyabban, vagy magasabban fut a szálak fajtájától függően. A görbe lefutása leginkább a szálak mennyiségétől függ. A maradó húzószilárdság növelésével csökkenthetők, esetenként kiküszöbölhetőek a beton kis húzószilárdságából, (és a húzószilárdság nagy szórásából) származó nehézségek [Balázs, Polgár, 1999].



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

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

Az acélszálak általánosan elterjedt felhasználási területei [Balázs, Lublós, 2006]:

- ipari padlók és kültéri betonlemezek,
- alagút elemek,
- lövellt betonok,
- csőelemek,
- vékony előregyártott elemek,
- páncélsekrények, páncéltermek falának betonja.

Acélszál erősítésű beton alkalmazására példa:

- Az 1970-es években már gyártottak SIOME csöveket Magyarországon acélszál erősítésű betonból, amiből összesen 80 km hosszú csövet készítettek. A csövek szerkezeti hossza 2400 mm volt. Acélszálakat alkalmaztak, mely a törőteher 1,5-2,7-szeres növekedését eredményezte a cső átmérőjétől függően [Balázs, 2002].
- 1989-ben készült az első hazai nagyméretű acélszál erősítésű betonpadló, a Suzuki esztergomi autógyárának szerelőcsarnokában. A betonhoz DRAMIX acélszálakat használtak [Balázs, Polgár, 1999].
- Félix Candela valenciai Oceánográfiai Múzeuma olyan héjszerkezet alkalmazott, ahol a feszített vasbetont és az acélszálak használatát kombinálták. A mindössze 60 mm vastag tartószerkezet acélszál-erősítésű lövellt betonból készült [Bergmeister, Fingerloos, Wörner, 2011] (2.4. ábra).



2.4. ábra: Acélszál-erősítésű héjszerkezet, Valencia, Spanyolország [c2.staticflickr.com]

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

- A 4-es metró Rákóczi-téri állomásán lévő szellőző alagút belső vasbeton szerkezetét acélszálerősítésű nedves lövellt betonnal készítették [swietelsky.hu] (2.5. ábra).



2.5. ábra: 4-es metró Rákóczi téri szellőző alagút [Pethő, 2013]

- A debreceni Nagyerdei Stadion előregyártott konzoltestek (2.6. ábra) nagyszilárdságú acélszálerősítésű beton felhasználásával készültek, így a konzolok mérete jelentősen kisebb lett, mint hagyományos vasalás esetén lett volna. A szálerősítésű beton képes a hasítóerők felvételére, így elhagyhatóvá vált a konstrukciós kengyelezés [Dezső, Polgár, 2013].



2.6. ábra: Debreceni Nagyerdei Stadion, előregyártott konzoltest [Dezső, Polgár, 2013]

Beton maradó húzószilárdsága szálokotél alkalmazása esetén

Manapság egyre nagyobb teret hódít a **műanyagszál** alkalmazása. Különböző szabványok eltérően osztályozzák a műanyagszálakat. A Magyarországon is érvényben lévő MSZ EN 14889-2:2007 szabvány a polimer (mint például: a poliolefin, polietilén, polipropilén, nylon, poliészter, PVA, aramidok) szálakat két fő osztályba csoportosítja:

I. osztály: mikro szálak:

- I.a osztály: mikro szálak <0,3 mm átmérőjű, mono-szálak,
- I.b osztály: mikro szálak <0,3 mm átmérőjű, fibrillált szálak.

II. osztály: makro szálak > 0,3 mm átmérőjű szálak.

Kísérleti tapasztalatok alapján a **mikro műanyagszálak** kedvező hatással vannak a friss beton tulajdonságaira. A képlékeny zsugorodásból származó repedések számának csökkentésére, illetve azok teljes kiküszöbölésére jól alkalmazhatók. A beton korai zsugorodási érzékenységére hazánkban többek között *Fenyvesi (2012)* végzett kutatásokat.

A mikro műanyagszálak ismert hatásai a következők [*Balázs, Lubláy, 2006*]:

- csökkentik a kivérzés mértékét,
- gátolják a szétosztályozódást a beton szállításánál, bedolgozásánál
- védik a vakolatot a zsugorodási repedésektől, mivel a szálak felveszik a kötési fázisban zsugorodás következtében fellépő húzó igénybevételek egy részét,
- lövellt technológia esetén csökkentik a visszahullási anyagvesztéséget,
- kevesebb repedés keletkezik a megszilárdulás során, ezért fokozzák a betonok vízzáróságát, csökkentik a vízfelvételt, ezzel növelik a fagyállóságot és az olvasztó sózással szembeni ellenállóságot, növelik a beton fáradási szilárdságát, hanggátló és hangelnyelő képességét,
- lehetővé teszik a vakolás rétegvastagságának növelését,
- növelik a beton tűzállóságát, mivel a szálak kiégése során kialakuló kapilláris rendszer segíti a betonba zárt vízpára távozását, így csökkentik a belső feszítőerőt. A mikro műanyagszálak tűzállóságra való hatására többek között hazánkban *Lubláy (2008)* végzett kutatásokat.

A mikro műanyagszálak általános felhasználási területei: [*betonopus.hu - szálerősítés*]:

- vakolatok,
- esztrichek,
- lövellt betonok,
- kis terhelésű ipari padlók.

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

Néhány példa mikro műanyagszál erősítésű beton használatára:

- Mapefibre Ns12 mikro műanyagszállal készült az IKEA iparipadlója, Valladolid, Spanyolországban (2.7. ábra) [mapei.com].



2.7. ábra: IKEA, Valladolid, Spain, Mapefibre Ns12, iparipadló [mapei.com]

- A 4-es metró Fővám-téri és a Szent Gellért-téri állomásán a beton panelek polipropilén szálerősítéssel készültek. Fibrofor Multi 127 márkajelű, 0,034 mm átmérőjű, 12,7 mm hosszúságú szálat alkalmaztak, 3 kg/m³ száladagolásban, a tűzhatás miatt [Kozák, Magyarai, 2013].

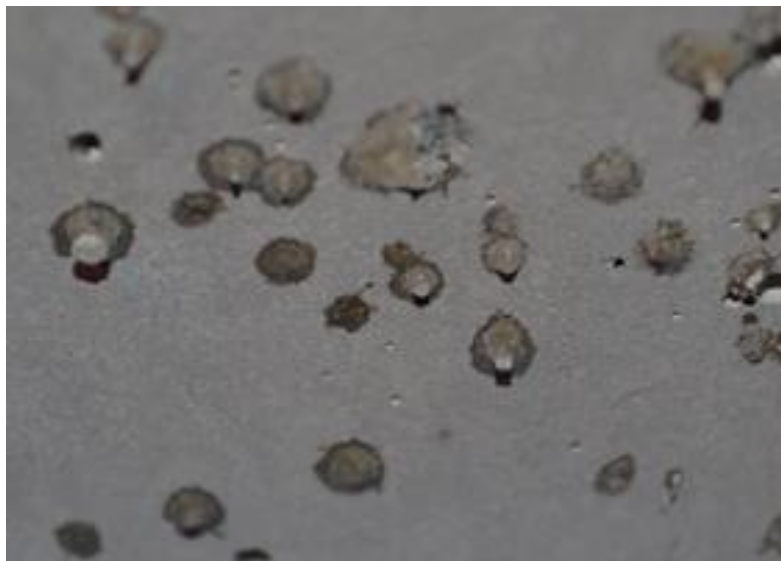


2.8. ábra: 4-es metró Fővám tér megálló beton panelek [készült: 2015.10.20.]

Beton maradó húzószilárdsága szálkottél alkalmazása esetén

Makro műanyagszálakat csupán néhány évtizede alkalmazunk, azonban korrózióállóságuk miatt típusai és felhasználási módjai folyamatosan bővülnek.

A makro műanyagszálakat repedések áthidalására, acélszálak, acélháló vagy szerkezeti acél helyettesítésére igyekeznek használni [*elastoplastic.com*]. A műanyagszálak előnye az acélszálakkal szemben, hogy nem korrodálódnak, sav és alkáli állóak, nem vezetnek az elektromos áramot és nem indukálnak mágneses teret. A makro műanyagszálak a berepedést követően kezdik el hatásukat kifejteni, növelik a beton duktilitását. Korábbi kutatásaink szerint, makro műanyagszálak ezen kívül csökkentik a betonfelület, hő hatására bekövetkező réteges leválásának veszélyét [*Kerényi, Czoboly, Lublós, Balázs, 2015*], míg acélszálak alkalmazásakor, az 500 °C és 800 °C-on végzett kísérleteink tanulsága szerint robbanásszerű tönkremenetel volt tapasztalható. Makro műanyagszálak alkalmazásakor azonban a szálak megolvadtak (2.9. ábra), majd kiégtek, és robbanásszerű tönkremenetel nem következett be [*Kerényi, 2014*].



2.9. ábra: Makro műanyagszál erősítésű beton felülete 300 °C-os hőterhelést követően
[*Kerényi, 2014*]

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

Makro műanyagszálak felhasználási területei [Juhász, 2013]:

- ipari padlók,
- villamos pálya,
- előregyártott elemek.

Makro műanyagszálak alkalmazására hazai példák:

- A debreceni Nagyerdei Stadion előregyártott feszített vasbeton tribünelemeinél (lelátóelemeinél) a nyírási vasalás kiváltására 5 kg/m^3 BarChip48 makro műanyagszálat alkalmaztak. (2.10. ábra)[Dezső, Polgár, 2013].



2.10. ábra: A Debreceni Nagyerdei Stadion [civishir.hu/sport/labdarugas]

Beton maradé húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

- A budai fonódó villamospálya pályalemeze 32 cm vastag monolit, makro műanyagszál erősítésű betonlemez, melynek vasalását Concrix típusú makro szállal, illetve a sínszálak alatti sávokban hegesztett acélhálóval váltották ki. (2.11. ábra) [avers.hu].



2.11. ábra: Budai fonódó villamospálya pályalemezének készítése [avers.hu]

- Szintetikus makro szállal (BarChip48) készült a szegedi villamospálya 18,3 km felújított, illetve 4,8 km új szakasza (2.12 ábra) [Juhász, 2013].



2.12. ábra: Szegedi villamospálya építése [fiberguru.hu]

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

- Budapesten a 6-os villamos Móricz Zsigmond körtéri ütközőelemek szintetikus makro műanyagszál erősítésű betonnal készültek (2.13. ábra) [fiberguru.hu].



2.13. ábra: Móricz Zsigmond körtér, 6-os villamos ütközőelemek [fiberguru.hu]

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

A különböző fajta szálak különbözőképpen javítják a beton tulajdonságait, ezért ma már elkezdték a **szálak vegyes alkalmazását** is. Így például a különböző méretű acélszálak, acél- és mikro műanyagszálak, valamint a mikro és makro műanyagszálak együttes használata is előfordul.

A szerkezeti acélszál erősítő szerepe még nem jelentkezik a friss betonban, mivel akkor még nem alakult ki tökéletesen a tapadás a beton és az acélszál között, a felületi állapot, a levegőbevitel és a merevség miatt. A mikro műanyagszálak épp a friss beton tulajdonságain javítanak, képesek a korai repedés meggátlására, ezért javasolt az acél és mikro műanyagszálak együttes alkalmazása [*Halvax, Lublőy, 2012*].

Mikro és makro műanyagszálak együttes alkalmazásával megszüntethető a lemez és gerenda szélek repedezése, töredezése, felületi táskásodása és kipergése [*Nagy, Köllő, Herman C., Herman A., 2014*].

Markovic, Walraven és Van Mier (2003) kísérletei szerint, a hosszú szálak kihúzóerejét növelik a rövid szálak, mivel a rövidebb szálak csökkentik a keresztirányú alakváltozást.

Ultra nagy szilárdságú betonoknál is előnyös vegyes száladagolás, például különböző méretű acélszálak alkalmazása, vagy acél- és mikro műanyagszál (PVA szál) együttes használata [*Kausay, 2009*].

Korábbi kutatások igazolják, hogy a mikro műanyagszálak és a szerkezeti acélszálak együttes alkalmazása több esetben is kedvezőnek bizonyult.

Hullámos acélszálak és monofil polipropilénszálak vegyes alkalmazása növelte a repesztő erőt, viszont csökkentette a nyomószilárdságot [*Quareshia, Sheikhb, Sultanb, 2013*].

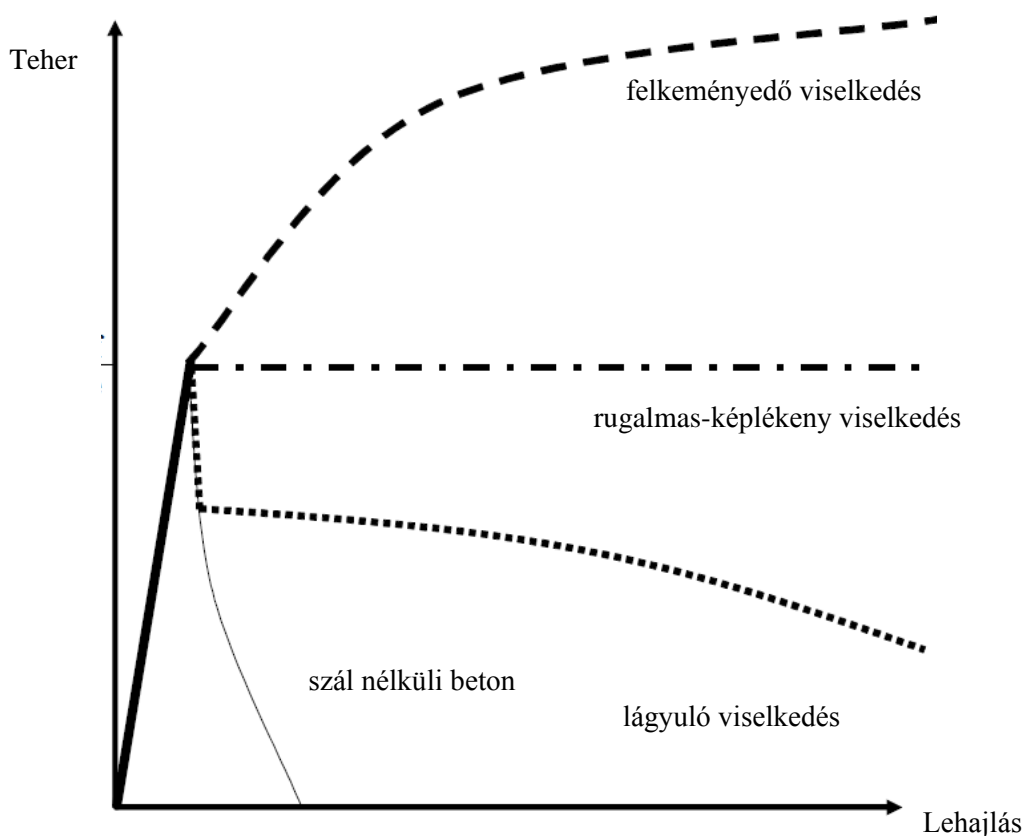
Nagyszilárdságú, és ultra nagy szilárdságú acélszál erősítésű beton hőterhelést követő maradó mechanikai tulajdonságait javították a polipropilén szálak [*Pliya, Beacour, Noumowé, 2011*].

Szálkoktél használata (polipropilén és acélszál), nagyszilárdságú öntömörödő betonnál, javítja a beton hőállóságát, és a hőterhelést követően repedés utáni viselkedését [*Ding, Azevedo, Aguiar, Jalali, 2012*].

2.2. Szálerősítésű betonok maradó hajlító-húzószilárdsága

A szakirodalom szerint a beton nyomószilárdságát a hagyományos mennyiségben történő száladagolás nem befolyásolja jelentősen. Általánosan elfogadott, hogy az acélszálak szokásos adagolása nem növeli jelentősen a beton hajlító-húzószilárdságát sem. Azonban acélszálak alkalmazása esetén a mikro repedések kialakulása után az acélszálak felveszik a húzófeszültséget.

A 2.14. ábra jól szemlélteti, hogy a törőerő elérése után, hogy alakulhat a különböző szálerősítésű, illetve szál nélküli betonok maradó hajlító-húzószilárdsága.



2.14. ábra: Terhelés-lehajlás diagram [CCANZ, 2009]

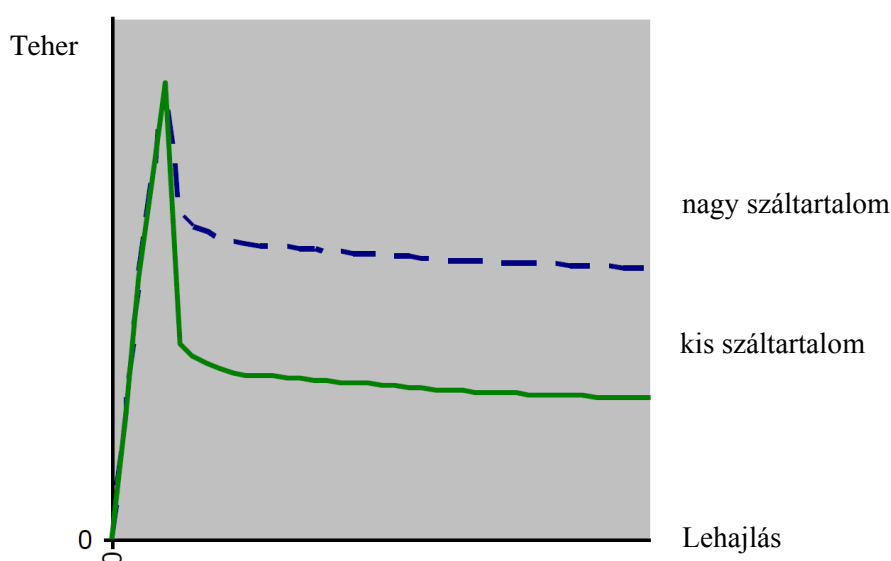
A hagyományos beton, a törés bekövetkezése után, kis alakváltozások mellett tönkremegy. *Lágylás* figyelhető meg kis száladagolás esetén, vagyis berepedés után kisebb erők felvételére képes a szálerősítésű beton, amihez általában nagy alakváltozó képesség társul. Rugalmas-képlékeny viselkedés esetén a berepedést követően a beton alakváltozása nő, miközben a teher értéke közel azonos marad a repesztő teherrel. Amikor a betonhoz a szokásos mennyiségnél nagyobb mennyiségű szálát adagolunk, akkor általában *felkeményedő*

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén

viselkedés tapasztalható, vagyis a törés után a beton alakváltozásának növekedésével, a repesztő erőnél nagyobb teher felvételére képes a szálerősítésű beton. A szálerősítésű beton szívóssága a teher-lehajlás görbe alatti területtel arányos.

A 2.15.-2.17. ábrákon megfigyelhető, hogyan alakul az acélszál erősítésű beton maradó hajlító-húzószilárdsága, különböző szálfajták, illetve száltartalmak alkalmazása esetén:

A 2.15. ábra acélszál erősítésű beton teher-lehajlás diagramja. Jól látható, hogy a maradó hajlító-húzószilárdság mértékét a száltartalom jelentősen befolyásolja.

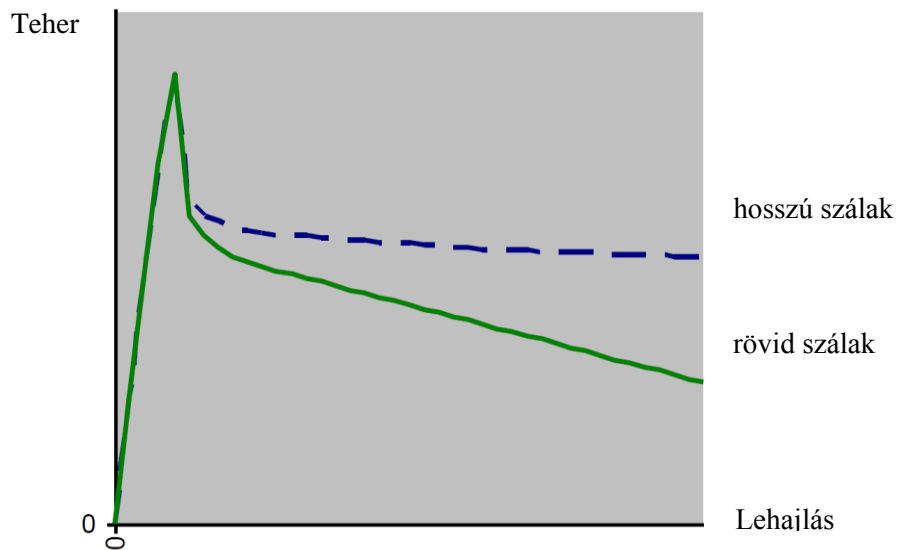


2.15. ábra: Teher-lehajlás diagram kis és nagy száltartalom esetén

[ERMCO, 2012]

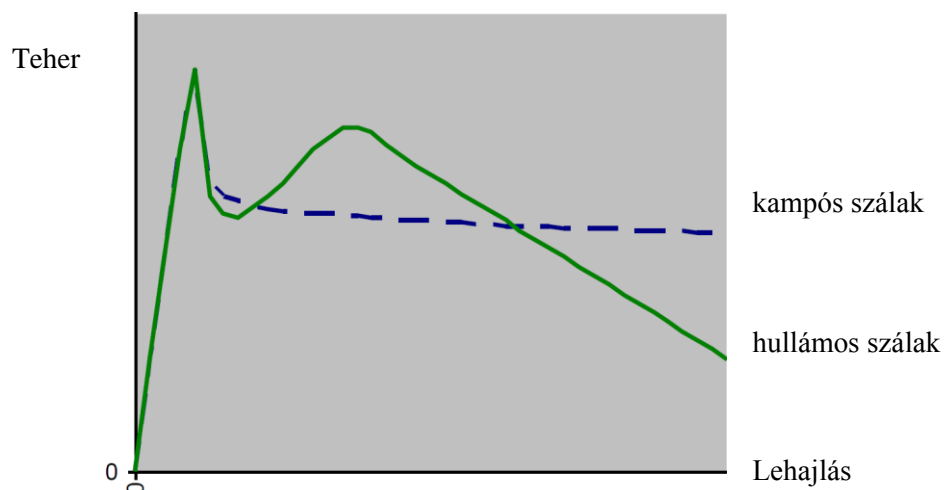
A 2.16. ábrán hosszú és rövid acélszálakkal készült beton teher-lehajlás diagramja látható. A törőteher után (*lágyló viselkedés* esetén) a hosszú szálak alkalmazása esetén a teherszint először hirtelen lecsökken, majd közel konstans marad, míg a rövid szálak alkalmazásakor a törőteher utáni hirtelen csökkenést követően a görbe folyamatos csökkenő tendenciát mutat.

Beton maradó húzószilárdsága száalkoktél alkalmazása esetén



2.16. ábra: Teher-lehajlás diagram hosszú és rövid szálak alkalmazása esetén
[ERMCO, 2012]

Különböző geometriájú szálak hatása látható a 2.17. ábrán. A kék szaggatott vonallal jelölt görbe, a végén kampós acélszál alkalmazásakor, a törőteher utáni csökkenő szakaszt követően közel konstans teher értékeket mutat. Hullámos acélszál alkalmazása esetén a csökkenő szakasz után növekedés, majd ismét csökkenés tapasztalható. Jól látszik tehát, hogy a szálak geometriai kialakítása nagyban befolyásolja a beton maradó hajlító-húzószilárdságát [ERMCO, 2012].



2.17. ábra: Teher-repedéstágasság diagram hullámos és kampós szálkialakítás
[ERMCO, 2012]

2.3. CT (Computed Tomography)

Az 1970-es években készítette *Allan M.Cormack* és *Godfrey N Hounsfield* az első működőképes CT készüléket, amiért fizikai Nobel-díjat kaptak 1979-ben. Az első klinikai alkalmazására 1972-ben került sor.

A CT (Computed Tomography, vagy más megfogalmazásokban Computer Tomography) a radiológiai diagnosztika egyik ága. A tomográfia görög eredetű szó, mely rétegfelvételt jelent. A CT felvételeken képzeletbeli szeletekre bontva látható a vizsgálat tárgya. A hagyományos röntgen átvilágítási technikának egy továbbfejlesztett változata a komputertomográfia (2.18. ábra).



2.18. ábra: CT berendezés [c-consulting.org]

Kevés roncsolásmentes eljárás van az építőanyagok részletes térbeli, belső felépítésének képkalkotásához. Mikroszkópos módszerekkel (optikai-, vagy elektromikroszkóp) csupán felületi kép készíthető. Ahhoz, hogy térbeli képet kapjunk, a minta belső szerkezetéről vékony szeletekre kell vágni, ami igen időigényes, valamint a vágás során megváltozhat a minta belső szerkezete.

A hagyományos röntgenfelvétel egy háromdimenziós szerkezet vetületi képe, amiből nem nyerhetők ki a mélységi információk. A komputertomográfias vizsgálattal azonban

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

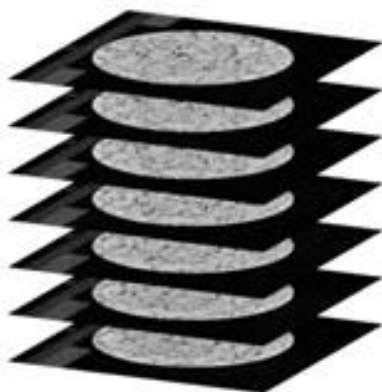
lehetőség nyílik egy háromdimenziós belső szerkezeti képalkotásra, anélkül hogy a minta előkészítésére vagy kémiai fixálására lenne szükség [Lublóy, Földes, Balázs, 2013].

A CT-készülék a vizsgált objektumokról rétegfelvételeket alakít ki (2.19. ábra), melyekből az anyagok belső szerkezetére következtethetünk. A felvételek elkészítéséhez röntgensugárzást használnak, melyet detektorok segítségével érzékelnek.

A TDK mérésekhez egy harmadik generációs CT berendezést (Siemens SOMATOM Sensation 16) alkalmaztunk, mely a vizsgálat tárgyát egy sík, legyezőszerű röntgensugárnyalábbal világítja át. A felvételek kialakításakor a sugárforrás a vizsgált objektum körül forog, míg a minta átellenes oldalán a jeleit rögzítő detektorsor követi a mozgását. Így előállítható különböző irányokból a minta abszorpciós profilja, melyekből rekonstruálható a keresztmetszeti kép. A minta mozgatásával szabályos lépésközönként kialakíthatjuk a rétegfelvételeket. A modern CT berendezések egyszerre akár több szeletet is vizsgálhatnak, ezáltal gyorsítva a felvételek rögzítését, melynek igazából mozgó objektumoknál van jelentősége (pl. dobogó szív). A vizsgálat a szükséges számításokkal együtt néhány perc alatt elvégezhető. A teljes kiértékelés további feladatokat jelent.

A mérés az anyagok eltérő sugárgyengítési tulajdonságain alapul. A μ sugárgyengítési együttható az anyagra jellemző tulajdonság, ami az anyag sűrűségétől és a röntgensugárzás spektrumától függ.

A kép minden egyes pixel pontja eltérő értékkel rendelkezik, ami az adott térfogatelem relatív lineáris sugárgyengítését mutatja.



2.19. ábra: A CT mérés során rekonstruált kép [Lublóy, Földes, Balázs, 2013]

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktél alkalmazása esetén

A szakirodalom szerint vizsgálatok folytak aszfaltpálya hézagtartalmának és eloszlásának meghatározására, melynek során megállapították, hogy a CT-vel végzett mérések sokszor pontosabb eredményt adtak, mint a laboratóriumi vizsgálatok [*Lublóy, Ambrus, Földes, 2014*].

Korábbi kísérletek alkalmasnak találták a komputer tomográfias vizsgálatot a beton roncsolásmentes diagnosztikai eszközének. A CT mérés technika segítségével kapott mérési eredmények alapján láthatóvá vált a beton inhomogenitása, kialakult repedések, valamint a beton pórus szerkezete [*Lublóy, Földes, Balázs, 2013*].

3. CÉLKITŰZÉSEIM

Az acél- és a műanyagszálak, továbbá különböző geometriájú, de azonos típusú szálak, eltérő módon befolyásolják a betontulajdonságokat. Korábbi kutatások igazolták, hogy a beton **maradó hajlító-húzószilárdságának** alakulása a szálak méretétől, anyagától és mennyiségétől függ elsősorban. A kevés rendelkezésre álló szakirodalom alapján a különböző szálkoktól akár javítani lehet egyes tulajdonságokra nézve a szálak hatékonyságát.

Felmerül a kérdés, hogy ezek a szálkeverékek (szálkoktól) milyen hatással vannak a beton maradó hajlító-húzószilárdsága, ami a beton berepedése utáni legfontosabb tulajdonsága az erőtani viselkedés szempontjából? Vajon optimalizálható-e többféle szálból álló szálkeverékekkel a beton berepedés utáni, maradó hajlító-húzószilárdsága? Vizsgálataim céljaként ennek meghatározását tűztem ki.

A kutatás során **nyolcféle betonkeveréket** vizsgáltam, amelyekből egy a szál nélküli referencia beton volt. Kísérleti paraméterek voltak: a száltípus és a szálak mennyisége, valamint az adalékszer mennyisége. A cement típus és cement mennyiség, az adalékanyag típusa és mennyisége, valamint a vízmennyiség (víz-cement tényező) azonos volt minden betonkeverék esetén.

Négytípusú szállal dolgoztam, kétféle acélszállal (egy rövid és egy hosszú acélszállal), és kétféle műanyagzállal (egy mikro és egy makro műanyagzállal). A hajlító-húzószilárdság vizsgálatot 150x150x600 mm élhosszúságú hasábon végeztem. Minden betonösszetételből 3-3 próbatestet készítettem. A hajlító-húzószilárdság vizsgálatot követően, a CT vizsgálatokat a Mix0 (szál nélküli referencia beton), illetve a Mix-H0,3 (0,3 V%, Humix50 acélszál tartalmú beton) keverékből készített C jelű próbatest felén végeztük.

Jelenleg kevés szakirodalmi adat van a különböző fajta, illetve különböző hosszúságú szálak együttes alkalmazásáról (angol terminológia szerinti elnevezés: szálkoktól). A 2.2. fejezetben rövid áttekintést nyújtottam arról, hogy az egyes száltípusoknak más-más kedvező hatásuk lehet például a tűzállóság növelésére, a zsugorodás csökkentésére, a duktilitás és maradó húzószilárdság növelésére.

A szálerősítésű betonok egyik *legfontosabb jellemzője* a berepedést követő maradó hajlító-húzószilárdság létezése. Fontos kérdés továbbá, hogy a maradó hajlító-húzószilárdság szempontjából a rövid acélszálak, vagy éppen a mikro műanyagszálak hosszú szálakhoz való adagolása lehet hatékony? A kevés rendelkezésre álló szakirodalom alapján feltételezhető,

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

hogy kedvező hatással van a berepedést követő maradó hajlító-húzószilárdságra a szálkoktélok alkalmazása.

TDK dolgozatomban ezért megvizsgáltam a szálkoktélok hatását a beton maradó hajlító-húzószilárdságára rövid és hosszú acélszálak egyidejű alkalmazása, vagy mikro és makro műanyagszálak egyidejű alkalmazása esetén.

Szálerősítésű betonoknál kérdéses, hogy a szálak egyenletesen oszlanak-e el a betonban? A betonkeverés, tömörítés során hogyan alakul a száleloszlás? Az eltérő testsűrűségből adódóan a szálak felúszhatnak (műanyag), vagy lesüllyedhetnek (acél).

A száleloszlás vizsgálatához CT vizsgálatot végeztünk. A CT vizsgálattal lehetőség van a szálak elhelyezkedésének megfigyelésére, így a száleloszlás kérdésének megválaszolására. A használt felbontás a műanyagszállal készült próbatestek kiértékelésére még nem alkalmas, ezért csak az acélszál eloszlását vizsgáltam.

4. KÍSÉRLETI ANYAGOK

Mind a nyolc keverék elkészítéséhez azonos típusú cementet, adalékanyagot, illetve adalékszer alkalmaztam:

- cement: CEM I 42,5 N típusú tiszta portlandcement (Duna-Dráva Cement Kft.),
- adalékanyag: 0/4 frakció kvarchomok, 4/16 frakció kvarckavics,
- adalékszer: Glenium C300 (BASF Hungária Kft.).

4.1. Alkalmazott szálak

Vizsgálataimhoz négy fajta szálát alkalmaztam. Kétféle műanyagszál (Mapefibre St42 makro műanyagszál, Mapefibre Ns12 mikro műanyagszál) és kétféle acélszál (Humix50 és ArcellorMittal-Wirex0,2-13) (4.1. ábra). Kutatásom során azt kívántam meghatározni, hogy a mikro és makro műanyag-, illetve 500 mm és 13 mm hosszú acélszálak kombinációja milyen hatással van a beton maradó hajlító-húzószilárdságára. A vizsgált keverékek 0,3 V%, és 0,4 V% száltartalommal készültek.

A szálak jellemzőit a gyártók által megadott adatok alapján a 4.1 táblázatban ismertetem.

4.1. táblázat: Alkalmazott szálak jellemzői

	Humix50	ArcellorMittal-Wirex 0,2x13	Mapefibre St42	Mapefibre NS12
Jelölés	A1	A2	M1	M2
Anyag	acél	acél	polifil	monofil
Alak	hidegen húzott, végeiken meghajlított	egyenes	hullámos	egyenes
Sűrűség [g/cm ³]	7,85	7,85	1,00	0,91
Hossz [mm]	50 (+/-1,5)	13 (+/- 2,0)	42	12
Szín	ezüst	arany	szürke	fehér
Sav-és lúgállóság	-	-	kitűnő	kitűnő
Húzó-/szakítószilárdság [N/mm ²]	1000-1200	3000	450	700
Rugalmassági modulus [GPa]	206,00	-	3,90	-
Átmérő [mm]	1,00	0,2 (+/- 0,05)	0,80	0,24

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén



4.1. ábra: Alkalmazott szálak [készült: 2015.10.30]

a) Humix 50 acélszál

b) ArcellorMittal-Wirex0,2x13 acélszál

c) Mapefibre St42 makro műanyagszál

d) Mapefibre Ns12 mikro műanyagszál

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

4.2. Alkalmazott betonösszetétel

Kutatásom során nyolc különböző betonösszetételt alkalmaztam (4.2 táblázat, 4.3 táblázat). A nyolcféle betonreceptúra víz, cement, adalékanyag és adalékszer tartalmának százalékos aránya megegyezett. Ezzel biztosítottam, hogy vizsgálataimmal a különböző szálak, illetve szálkombinációk hatását tudjam vizsgálni.

4.2. táblázat Betonösszetétel/I.

C35/45-16-F4						
ANYAG	FAJTA vagy FRAKCIÓ		TÖMEG			
			[kg/m ³]			
Név			Mix0	Mix-MSt0,3	Mix-MSt0,4	Mix-MSt0,3-MNs0,1
Adalékanyagok	0/4 mm frakció	45%	830	827	826	826
	4/16 mm frakció	55%	1015	1011	1009	1009
	Összesen	100%	1845	1837	1835	1835
Cement	CEM I 42,5 N		380	380	380	380
Szál	neve		-	Mapecifibre ST42	Mapecifibre ST42	Mapecifibre St42 + Mapecifibre Ns12
	V%		-	0,3	0,4	0,3 + 0,1=0,4
	mennyiség		-	2,64	3,52	2,64 + 0,88
Víz	mw/mc=	43,0%	163	163	163	163
Adalékszer cem. m%		0,70%	2,66	2,66	2,66	2,66
		0,00%	0,00	0,0	0,0	0,0
Összesen			2391	2386	2384	2384

4.3. táblázat Betonösszetétel/II.

C35/45-16-F4						
ANYAG	FAJTA vagy FRAKCIÓ		TÖMEG			
			[kg/m ³]			
Név			Mix-H0,3	Mix-H0,4	Mix-A0,3	Mix-H0,3-A0,1
Adalékanyagok	0/4 mm frakció	45%	827	826	827	826
	4/16 mm frakció	55%	1011	1009	1011	1009
	Összesen	100%	1837	1835	1837	1835
Cement	CEM I 42,5 N		380	380	380	380
Szál	neve		Humix50	Humix50	ArcelorMittal Wirex 0,2x13	Humix50 + ArcelorMittal Wirex 0,2x13
	V%		0,3	0,4	0,3	0,3 + 0,1=0,4
	mennyiség		23,4	31,2	23,4	23,4 + 7,8
Víz	mw/mc=	43,0%	163	163	163	163
Adalékszer cem. m%		0,70%	2,66	2,66	2,66	2,66
		0,00%	0,00	0,0	0,0	0,0
Összesen			2407	2412	2407	2412

5. KÍSÉRLETI MÓDSZER

5.1. Próbatetek elkészítésének módja

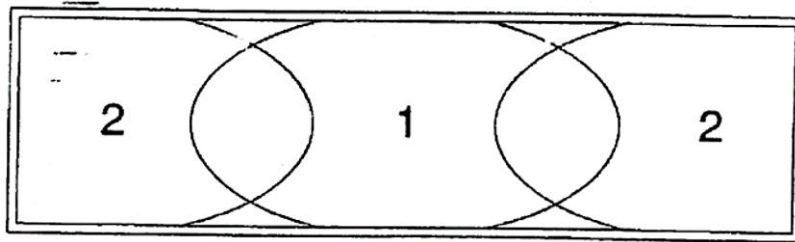
A 0/4 és 4/16 frakciójú adalékanyagot kiszárítottam, majd ezt követően fedett, helyen tároltam és légszáraz állapotban használtam fel.

A különböző betonkeverékeket ugyanúgy készítettem el. A keverődobba elsőként a 4/16-as, majd a 0/4-es frakciójú adalékanyagot tettem, ezt követte a cement, majd a víz és az adalékszer. A kész betonkeverékhez adtam hozzá a szálakat (5.1. ábra), majd további 5 percig kevertem a betont, a megfelelő elkeveredéshez (kivéve a szál nélküli referenciabeton esetében). A bedolgozás előtt terület méréssel ellenőriztem a megfelelő konzisztenciát (490-550 mm az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint). Minden esetben F4 konzisztenciájú betont dolgoztam be. Szükség esetén a konzisztenciát további folyósító adalékszer adagolásával biztosítottam.



5.1. ábra: Betonkeverék Mapefibre St42 és Mapefibre Ns12 szálakkal

A friss betont az 5.2. ábra szerint dolgoztam be a 600×150×150 mm élhosszúságú zsalukba, majd merülő vibrátor használatával tömörítettem. A tömörítés két lépcsőben történt: először félig töltöttem a zsalukat betonnal, majd merülő vibrátorral tömörítettem. Ezt követően tele töltöttem a zsalukat és ismét tömörítettem a betont, végül a felületét lesimítottam.

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

5.2. ábra: Beton zsaluba töltése [MSZ EN 14651:2005+A1]

A próbatesteket egy napos korukban zsaluztam ki, majd hét napon keresztül víz alatt tároltam (5.3. ábra). Ezt követően 21 napon keresztül labor körülmények között tároltam a próbatesteket.



5.3. ábra: Vizes tárolók

Minden keverékből 3 db 150x150x600 mm-es hasáb készült a hajlító-húzószilárdság vizsgálatok elvégzésére.

5.2. Vizsgálatok

A vizsgálatokat a próbatestek 28 napos korában végeztem.

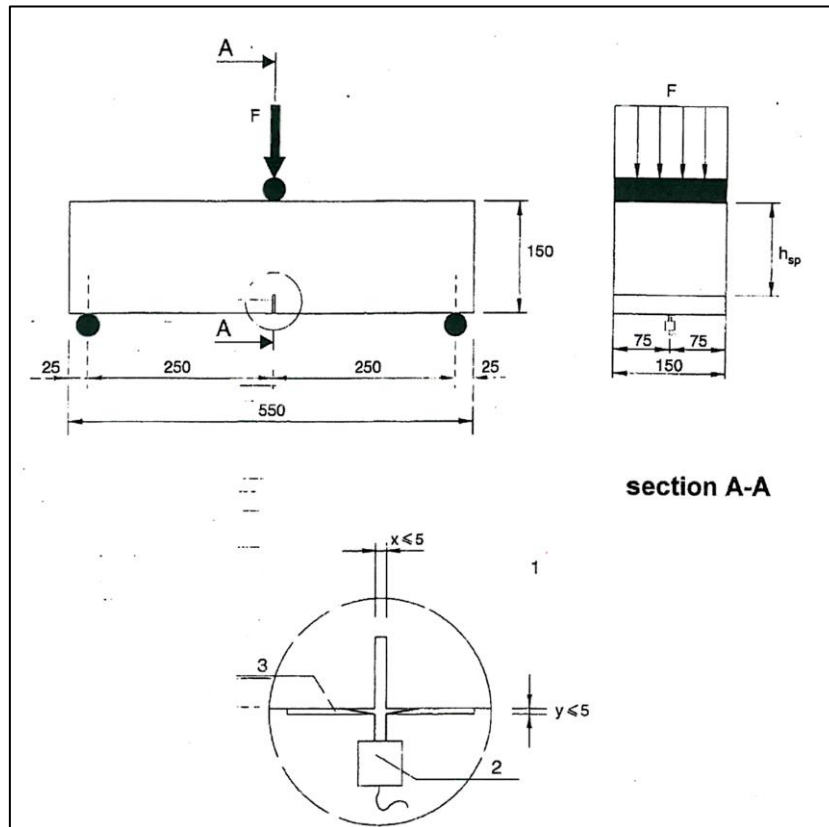
5.2.1. Testsűrűség mérés

A hajlító vizsgálat előtt lemértem a próbatestek tömegét és befoglaló méreteit. A befoglaló méretekből és a próbatest tömegéből testsűrűséget számoltam. A vizsgált próbatestek testsűrűsége közel azonos. Ezt követően bevágtam őket, majd elvégeztem a hajlító vizsgálatot. Végül lemértem a h_{sp} , tört keresztmetszet magasságokat. Az adatokat a 10.2. mellékletben ismertetem.

Beton maradé hűzőszilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

5.2.2. Hajlító-hűzőszilárdság vizsgálat

A hajlító-hűzőszilárdság vizsgálatot középpontos (5.4. ábra) CMOD (repedéstágasság vezérelt) méréssel végeztem, INSTRON 5989 típusú gépen (5.5. ábra) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék laboratóriumában.



5.4. ábra: Középpontos hajlító-hűzőszilárdság vizsgálat [MSZ EN 14651:2005+A1]

A vizsgálatokat az MSZ EN 14651:2005+A1 szabvány szerint végeztem el. A próbatestet 90°-al elfordítva, próbatestek hosszának felénél, olyan mélységű bemetszést készítettem, hogy a keresztmetszet bemetszés nélküli magassága (h_{sp}) 125 mm legyen. Az elfordítással kívánja a szabvány kiküszöbölni az esetleges szálorientáció szilárdságra gyakorolt hatását (acélszálak esetleges süllyedését, műanyagszálak esetleges felúszását). A bemetszéssel biztosítjuk, hogy a repedés ebben a keresztmetszetben alakuljon ki. Ezt követően a bemetszés két oldalára, egymástól 10 mm-re két fémet ragasztottam fel, amikhez az elmozdulás mérőt illesztettem. Végül elvégeztem a gerenda törését. A terhelést 0,5 mm/perc repedéstágasság növekedési (CMOD) sebességgel végeztem.

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén

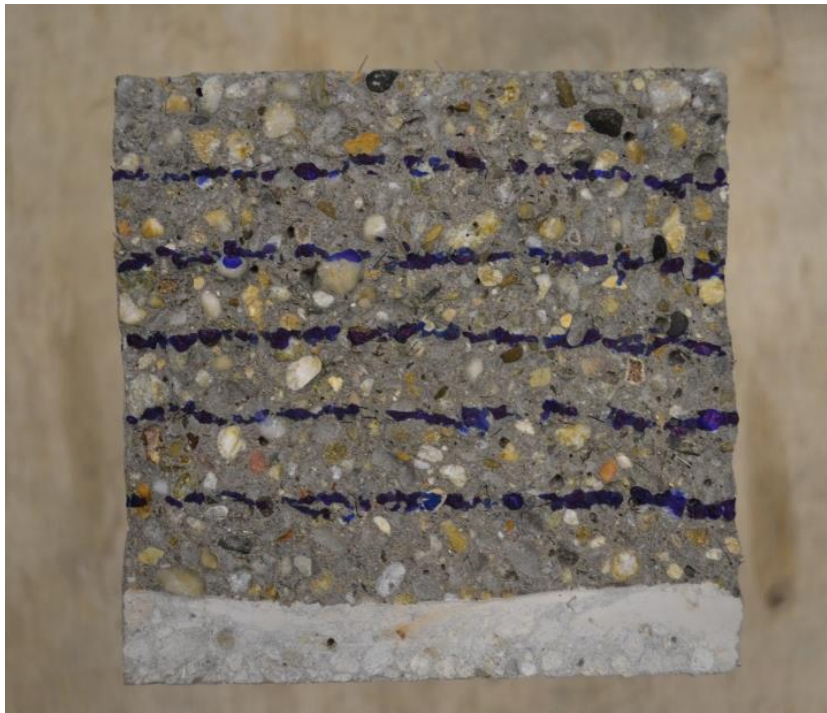


5.5. ábra: Középpontos hajlító-húzó vizsgálat INSTRON 5989 típusú törőgéppel

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén

5.2.3. Szálmennyiség a törési keresztmetszetben

A hajlító-húzószilárdság elvégzése után, a törési keresztmetszetet 6 részre osztottam (5.6. ábra), majd minden sávban megszámoltam a szálak darabszámát (kivéve: méretei miatt a Mapefibre Ns12 típusú mikro műanyagszálat). Mivel azt tapasztaltam, hogy az acélszálak nem szakadnak el, hanem kihúzódnak a betonból ezért az acélszálakat a kettétört próbatest mindkét felén megszámoltam. A műanyagszálak esetén azonban a tönkremenetel során, a szálak szakadása volt általános. Csak nagyon rövid lehorgonyzási hossz esetén húzódtott ki a makro műanyagszál, mely így kisebb hatékonysággal működött. Ezért a makro műanyagszálakat csak a törési keresztmetszet egyik oldalán számoltam meg. A szálak törési keresztmetszetben való eloszlását a 10.3. mellékletben ismertetem.

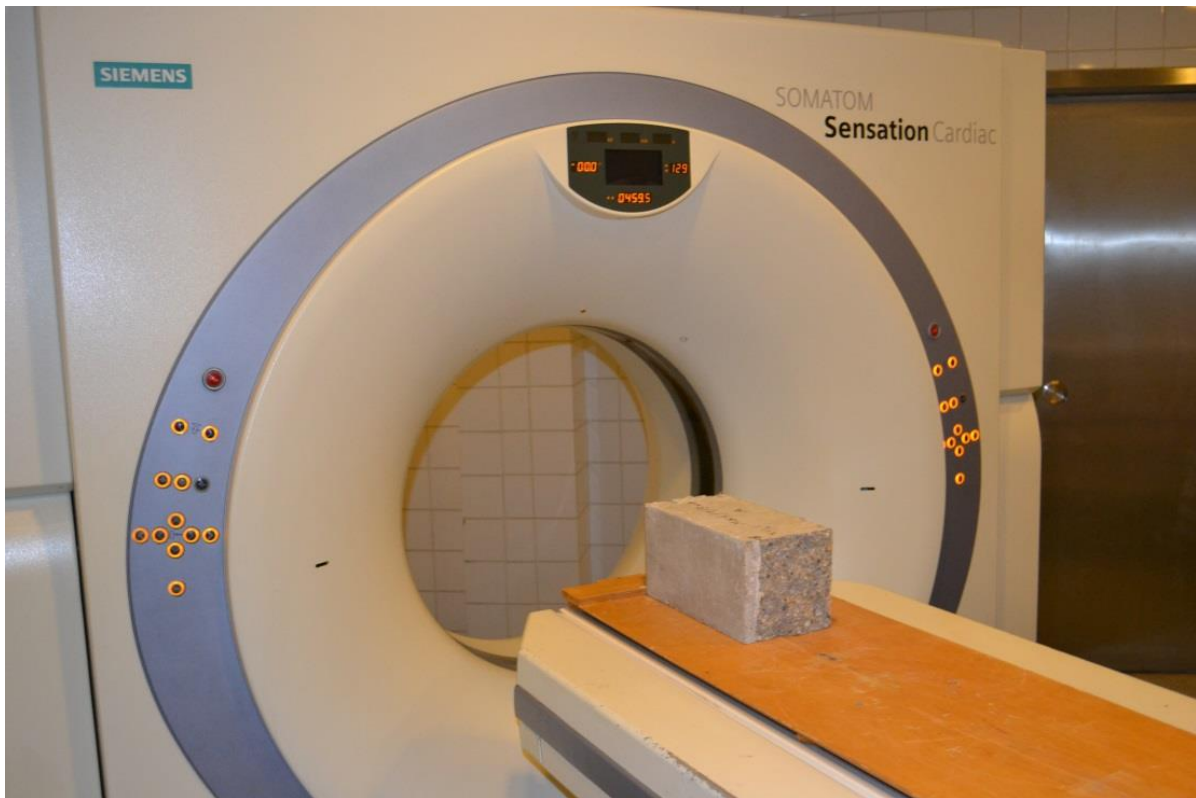


5.6. ábra: Törési keresztmetszet sávokra osztva

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén**5.2.4. CT (Computed Tomography) vizsgálat**

A CT vizsgálatokat Siemens Somatom 16 eszközzel végeztük a Kaposvári Egyetem Onkológiai Intézetében. A vizsgált szeletek vastagsága 1,2 mm volt, a pixelek távolsága pedig 0,39 mm. A mintát a berendezés 650 szeletben vizsgálta, ebből 640 szelet került feldolgozásra. A mérés időtartama 45,77 másodperc volt. A mérésekhez használt radioaktív paraméterek: 120 kV és 250 mAs voltak.

A CT síkok automatizált feldolgozása Matlab-ban történt, előre meghatározott paraméterekkel, felhasználói beavatkozás nélkül. A keresztmetszetek feldolgozásához az adalékanyagok, pórusok szegmentálása történt. A szegmentálás elkészítéséhez különböző szűrőket alkalmaztunk, hogy a nyalábkeményedést kiküszöböljük [Russ, 2011], [Buzug, 2008], [Castele, 2004].



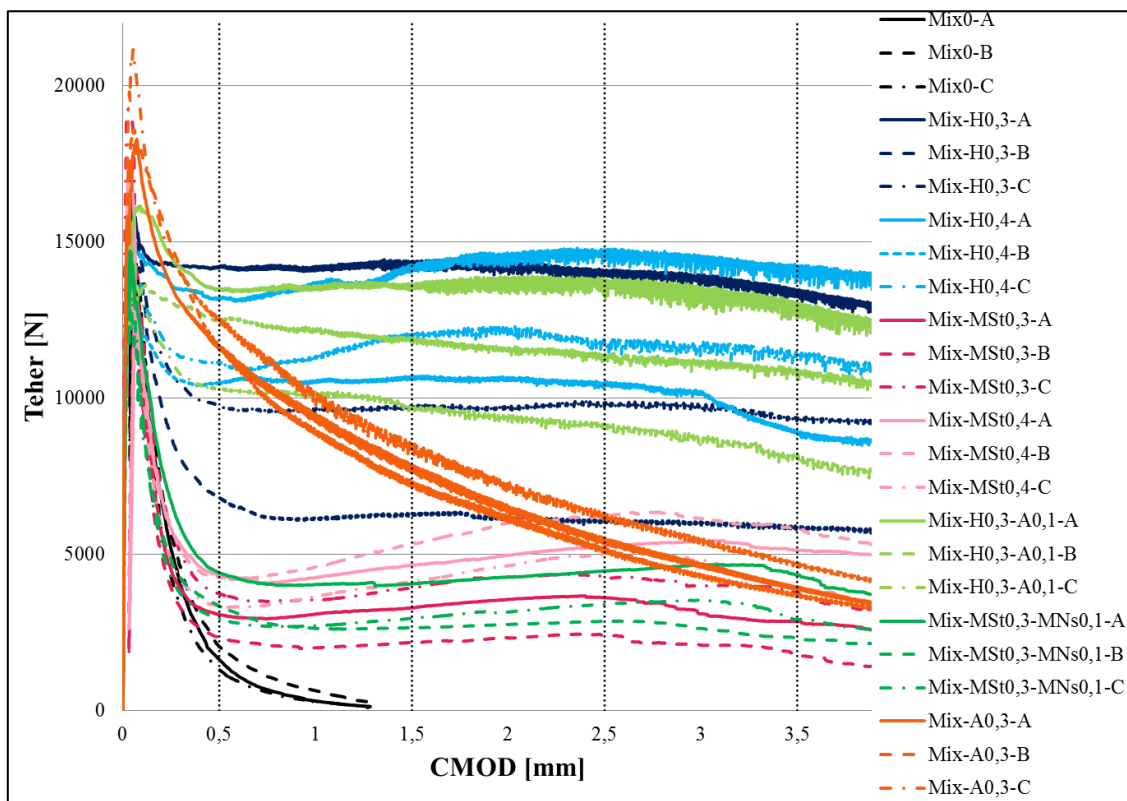
5.7. ábra: Beton próbatest CT vizsgálata

6. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

6.1. Hajlító-húzószilárdság

A hajlító-húzószilárdság vizsgálatokat (CMOD vizsgálat), 150x150x600 mm-es hasábokon végeztem.

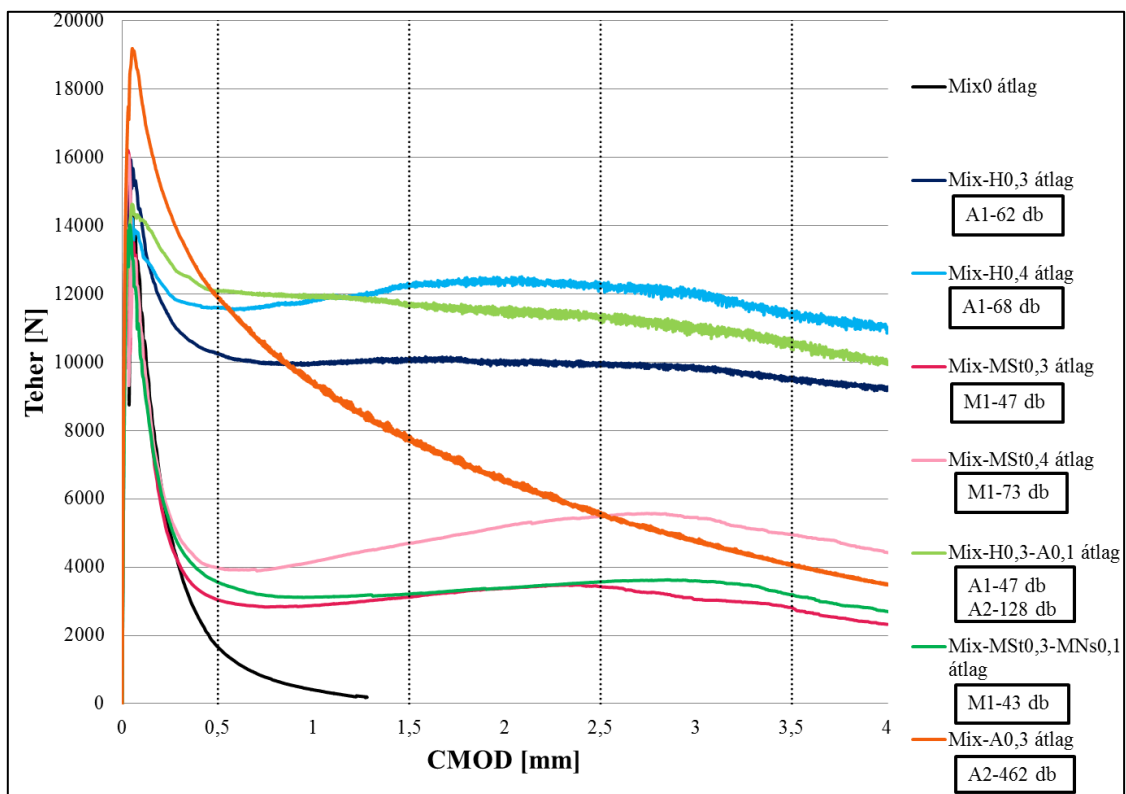
A 6.1. ábra az összes betonkeverék felhasználásával készült próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálati eredményeit mutatja teher-CMOD diagramok formájában. Jól látható, amint a szál nélküli beton (fekete görbék), a makro műanyag és acélszálak, valamint a kisméretű acél és a vegyes száfelhasználású keverékek különböző tendenciájú görbéket rajzolnak ki.



6.1. ábra: Összes keverékből készült próbatest teher-CMOD diagramjai

Beton maradó húzószilárdsága száلكoktól alkalmazása esetén

Minden keverékből 3-3 próbatesten végeztem el az 5.5 ábra szerinti hajlító vizsgálatot. A 3-3 mérési eredményt átlagoltam (6.2. ábra). A 10.1. mellékletben találhatóak a diagramok, ahol a 3-3 próbatesten végzett eredményeket és azok átlagértékét tüntettem fel. A *száلك* darabszámát a törési keresztmetszetben a jelölés alatti fekete keretben tüntettem fel. Az A1-Humix50, nagyméretű acélszál, az A2 az ArcellorMittal-Wirex0,2x13, kisméretű acélszál, az M1-Mapefibre St42 makro műanyagszál jelöl (4.1. fejezet). A rövid és hosszú acélszálakkal készült keveréknél a száلك darabszámára vonatkozó két adat a rövid és hosszú száلك mennyiségét jelenti külön-külön. A vegyes: mikro és makro műanyagszállal készült keveréknél (Mix-MSt0,3-MNs0,1) csak a makro száلك voltak megszáلكolhatóak a mikro száلك kis mérete miatt, ezért ennél a keveréknél csak egy értéket tüntettem fel.



6.2. ábra: Összes keverék átlagos teher-CMOD diagramja
(minden görbe 3-3 mérési eredmény átlaga);

Jelölés: A1: Humix50 nagyméretű acélszál,
A2: ArcellorMittal-Wirex0,2x13, kisméretű acélszál,
M1: Mapefibre St42 makro műanyagszál

Beton maradó húzószilárdsága szálkottél alkalmazása esetén

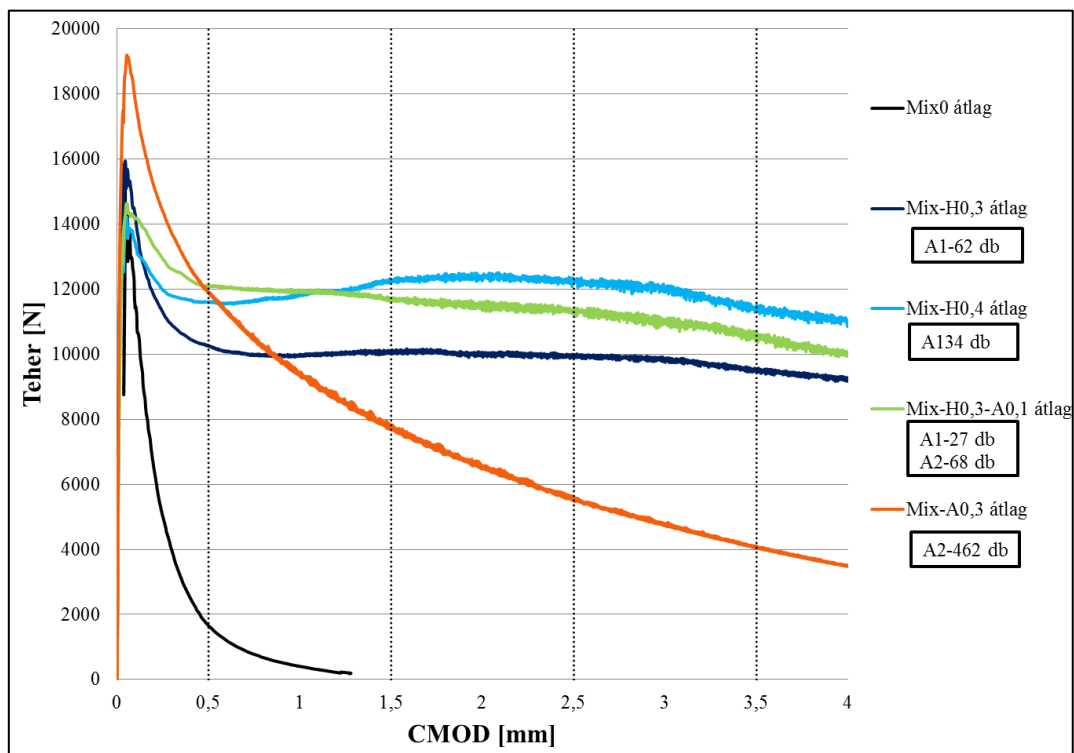
Szakirodalomból ismerjük a szálerősítésű betonok jellegzetes hajlító-húzószilárdság görbéit (lásd: szakirodalmi áttekintés).

Vizsgálataim során is jól megfigyelhető volt a szál nélküli beton repesztő teher utáni hirtelen tönkremenetele. Műanyagszálak alkalmazása esetén a repesztő teher elérését követően a maradó húzási ellenállás kis értéke volt tapasztalható, jellegzetes lágyuló görbét írnak le. Ez a jelenség megfigyelhető volt mind a makro, mind a makro és mikro műanyagszálak vegyes alkalmazásánál.

Nagyméretű (50 mm hosszú) acélszálak alkalmazása esetén a repesztő teher után lényegesen kisebb visszaesés látszik a teherfelvételben, mint műanyagszálak alkalmazásakor.

Kisméretű acélszálak (13 mm) alkalmazása esetén a repesztő erő lényegesen nagyobb volt, mint a többi esetben. A repesztő teher elérését követően, a szakirodalomnak megfelelően a teher-CMOD görbe folyamatosan csökkenő tendenciát mutat.

A 6.3. ábrán a szál nélküli referenciabeton és az acélszál erősítésű beton teher-CMOD görbéi láthatók.



6.3. ábra: Etalon és acélszál erősítésű beton átlag teher-CMOD diagram (minden görbe három-három mérési eredmény átlaga)

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

A Mix0 (szálnélküli beton) görbéje a repesztő teher elérése után meredeken esik, kis repedéstágasságnál leszakadt. A Mix-H0,3 (0,3 V% Humix 50 szállal készült beton) a repesztő teher elérése után a teherfelvétel hozzávetőlegesen 10000 N teherszintre esik vissza, majd a görbe 1,5 mm távolságig közel konstans teherértékeket vesz fel: Ezt követően csökkenő tendenciát mutat az erő-repedéstágasság görbe.

A Mix-H0,4 (0,4 V% Humix50 száltartalmú beton) esetén a törés után a görbe kisebb visszaesése, majd a teherszint növekedése tapasztalható.

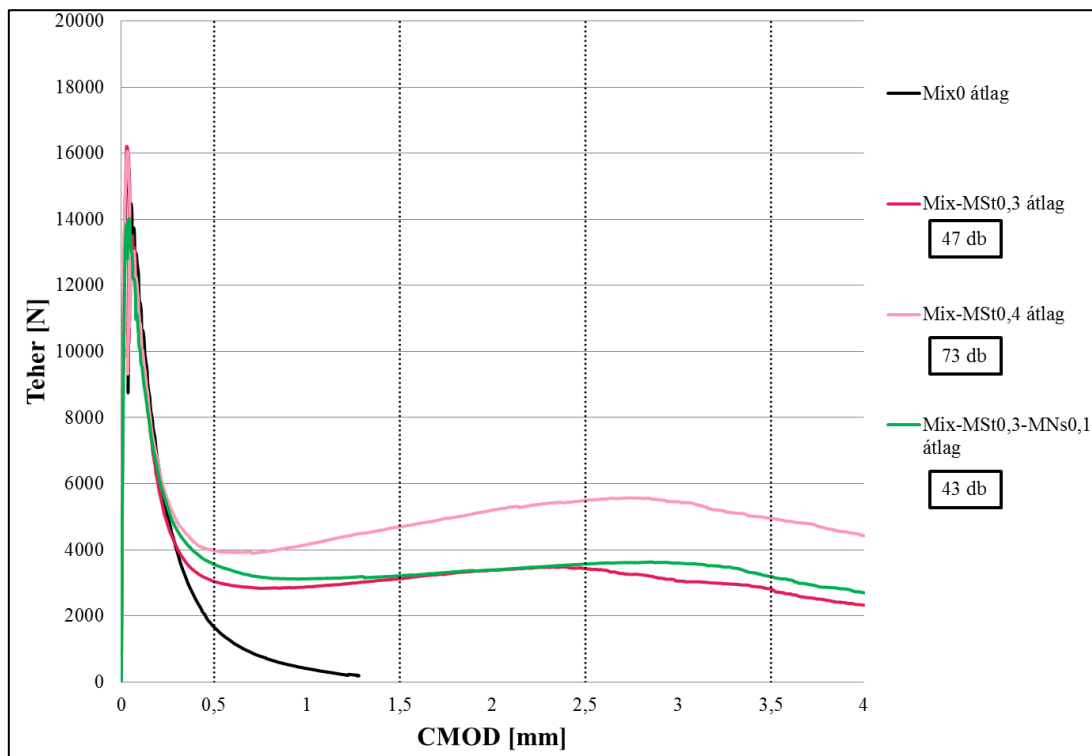
A Mix-A0,3 keverék 0,3 V% ArcellorMittal-Wirex0,2x13 típusú rövid acélszálat tartalmazott. A repesztő teher lényegesen nagyobb volt, mint az etalon és a Humix50 szálak alkalmazásakor. Ez magyarázható azzal, hogy a törési keresztmetszetben nagyságrenddel több szál volt, mint a Humix50 szál alkalmazása esetén. A berepedést követően a görbe monoton csökkenő tendenciát mutatott, 3,5 mm-es repedéstágasságnál, már csak 4000 N terhet vett fel, ami a szálak kihúzódásának tudható be.

A vegyes száلكeverék alkalmazással készült Mix-H0,3-A0,1 keverék (0,3 V% Humix50 és 0,1 V% ArcellorMittal-Wirex0,2x13 típusú acélszálat tartalmazott). A 1,0 mm repedéstágasságig nagyobb erőt vett fel a vegyes száلكeverékkel készült Mix-H0,3-A0,1 beton, mint a Mix-H0,3 és Mix-H0,4, hosszú acélszállal készült beton. A vegyes száلكeverékkel készült próbatestek átlag teher-CMOD görbéje pedig nem csökken akkora intenzitással, mint a Mix-A0,3 rövid acélszál alkalmazásakor. **Így kijelenthetjük, hogy a teherbírás szempontjából lényeges, 0,5 mm repedéstágasságnál a maradó teher esetén kedvező hatással volt, ha a hosszú acélszál egy részét rövid acélszállal helyettesítettük (0,4 V% hosszú acélszál helyett 0,3 V% hosszú acélszálat és 0,1 V% rövid acélszálat alkalmazva).**

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén

A 6.4. ábrán a műanyagszállal készült betonkeverékeket ismertetem. A repesztő teher elérését követően a műanyagszállal készült betonkeverékek azonos csökkenő tendenciát mutatnak. A Mix-MSt0,3 (0,3 V% Mapefibre St42 szálal betonkeverék) 3000 N, a Mix-MSt0,3-MNs0,1 (0,3 V% Mapefibre St42 és 0,1 V% Mapefibre Ns12 szálfoktélal készült betonkeverék) 3500 N, a Mix-MSt0,4 (0,4 V% Mapefibre St42 szál tartalmú betonkeverék) pedig 4000 N maradó teherbírásig csökkent le 0,5-1,0 mm repedéstágasságnál. Ezt követi mind a háromféle keverék esetén egy növekvő szakasz. A Mix-MSt0,3 2,5mm, a Mix-MSt0,4 2,7 mm, a Mix-MSt0,3-MNs0,1 pedig 3 mm repedéstágasság után kezd ismét csökkenni.

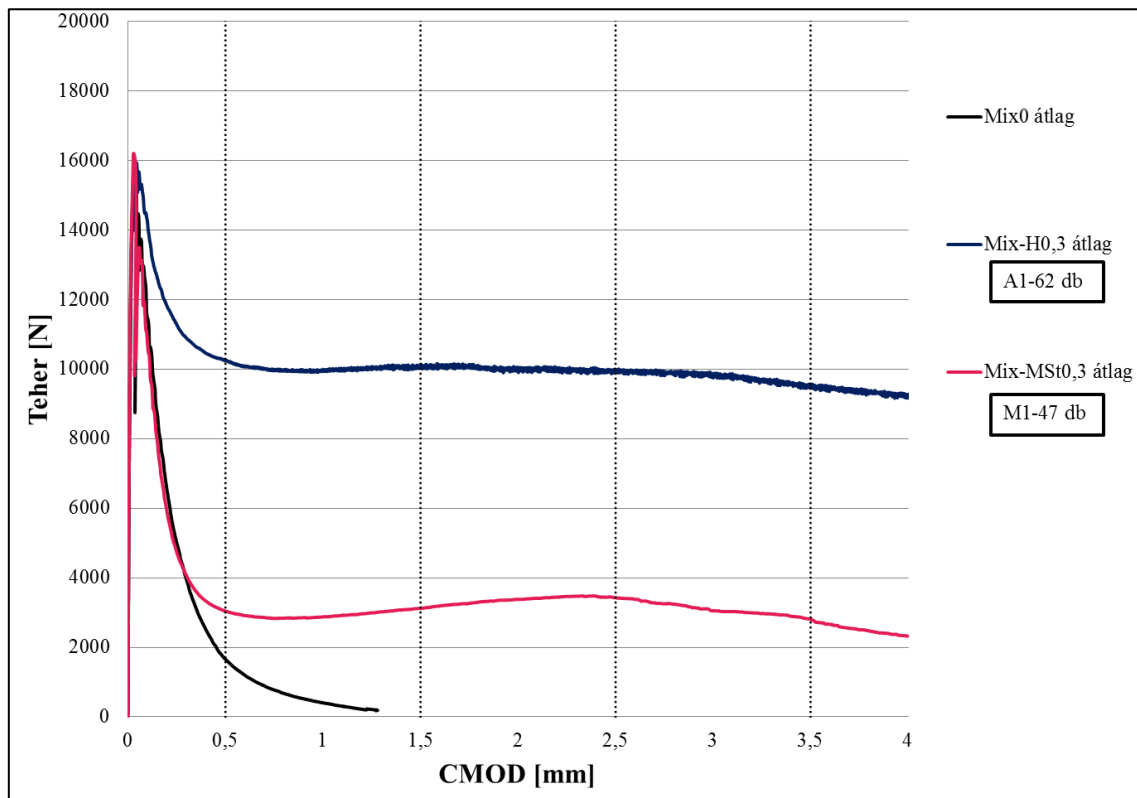
A makro műanyagszál 0,3 V% adagolása esetén és a vegyes (0,3 V% makro műanyagszál és 0,1 V% mikro műanyagszál) szálfoktélal esetén hozzávetőlegesen azonos eredményt kaptam az teher-CMOD görbénél. Nem tapasztaltam kimutatható különbséget a mikro műanyagszál adagolásakor. Tehát a mikro műanyagszálnak nem volt növelő hatása a beton maradó teherbíráására.



6.4. ábra: Etalon és műanyagszálak átlag teher-CMOD diagramja (minden görbe három-három mérési eredmény átlaga)

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktól alkalmazása esetén

A 6.5. ábrán a 0,3 V% száltartalmú (acélszál és makro műanyagszál alkalmazásával) próbatestek teher-CMOD diagramjai láthatók. Az acélszál erősítésű beton a törőteher elérését követően csökkenő tendenciát mutat 10000 N-ig, míg a műanyagszállal készült beton 3500 N-ig.



6.5. ábra: 0,3 V% acél-és műanyagszál tartalmú betonok teher-CMOD diagramja (minden görbe három-három mérési eredmény átlaga)

Az acél- és makro műanyagszál erősítésű betonok eltérő maradó teherbírása és teher-CMOD görbéjének eltérő tendenciája a szálanyagok eltérő tulajdonságaival (eltérő húzószilárdság, rugalmassági modulus, tönkremeneteli mód) magyarázhatók. Az általam alkalmazott makro műanyagszál húzószilárdsága a gyártói adatok alapján 450 N/mm^2 , az acélszál húzószilárdsága pedig $1000\text{-}1200 \text{ N/mm}^2$. A műanyagszál rugalmassági modulusa $3,9 \text{ GPa}$, míg az acélszál rugalmassági modulusa ennek több mint 50-szerese, $206,0 \text{ GPa}$. Az acélszálak kihúzódnak a törési keresztmetszetben, a műanyagszálak elszakadnak.

Acélszál alkalmazásakor a repesztő teher elérését követően a teherfelvétel csökken, majd közel konstans terheket vesz fel. Makro műanyagszál alkalmazásakor a repesztő teher

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

elérése után intenzívebb tendenciával csökken, majd a minimumpont elérése után felkeményedő szakasz következik. 2,5 mm repedéstágasságot követően ismét csökkenni kezd.

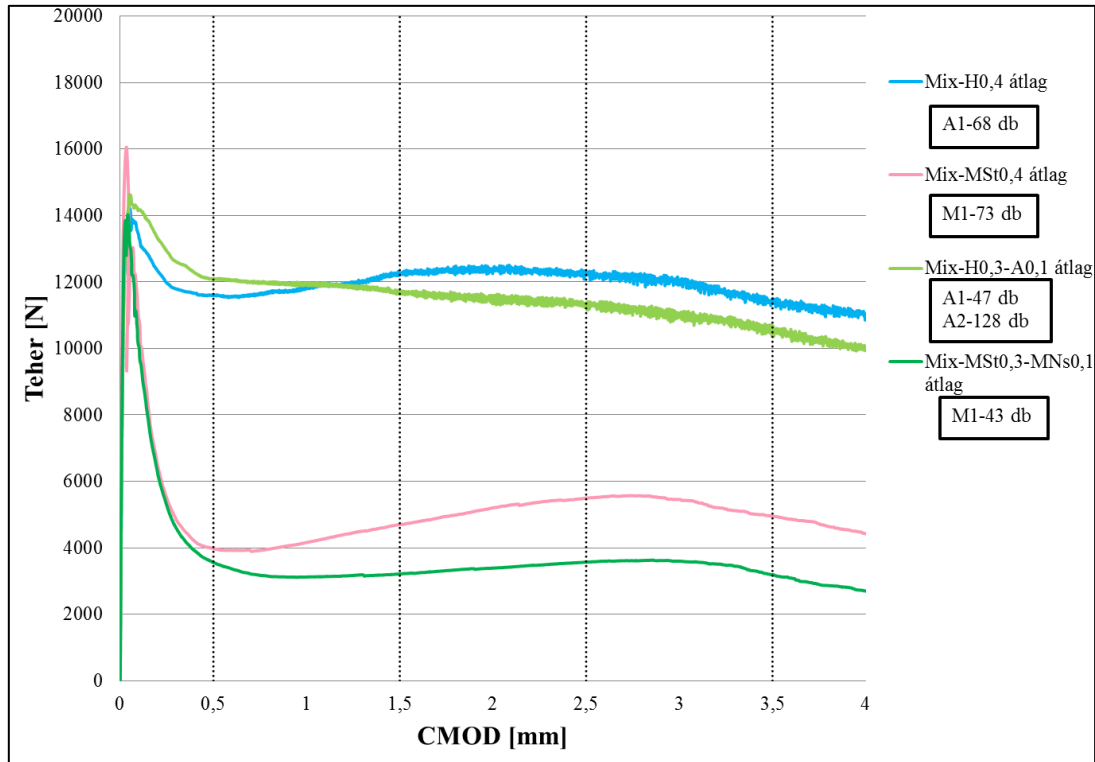
Az acél- és műanyagszálak mennyisége V% szerint megegyezett, ez azonban azt jelenti, hogy az acélszál m%-os aránya közel 8-szorosa volt a műanyagszál alkalmazott mennyiségéhez képest.

Fontos azonban megjegyezni, hogy az általam alkalmazott betonösszetétel a szabványos [MSZ EN 14845-1:2008] szálerősítésű beton vizsgálatához alkalmazott betonösszetételnél nagyobb teherbírású, így repesztő ereje nagyobb. Szabványos betonösszetétel alkalmazásakor a műanyagszál teher-CMOD görbéje kisebb mértékű csökkenést mutat. A szabvány a maximális cementtartalmat határozza meg, mely vizsgálataim esetén nagyobb volt a szabvány szerint előírtnál.

Bár az acélszál erősítésű beton maradó hajlító-húzószilárdsága kedvezőbben alakul, lényegesen nagyobb a műanyagszál erősítésű beton hajlító-húzószilárdságánál, a korrózióérzékenységet műanyagszál alkalmazásával ki tudjuk küszöbölni, míg a spalling veszélyét műanyagszál használatával csökkenteni tudjuk.

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

A 6.6. ábrán látható keverékek 0,4 V% száltartalmú betonkeverékek teher-CMOD görbéi.



6.6. ábra: Szálkeverékekkel készült acél- és műanyagszál tartalmú betonok teher-CMOD diagramja (minden görbe három-három mérési eredmény átlaga)

Mix-H0,3-A0,1, beton szálösszetétele 0,3 V% 50 mm hosszú acélszál és 0,1 V% 13 mm hosszú acélszál volt. A repesztő terhet 14500 N körül éri el, ez nagyobb, mint a 0,4 V% Humix50 száltartalmú betonnál, tehát a kisméretű acélszálak növelték a repesztő terhet. A repesztő teher elérését követően kis és nagyméretű acélszálak együttes alkalmazásakor a teherfelvétel nem csökken hirtelen vissza, az eddigi tapasztalatoktól eltérően a grafikon kevésbé meredek, folyamatos csökkenő tendenciát mutat. Ez a viselkedés a rövid szálak kihúzódásának tudható be. A kezdeti maradó hajlító-húzószilárdság a nagyobb, mint a Mix-H0,4 keveréknek, pedig a szálak összterfogat százaléka megegyezik a két betonkeverékben. **Tehát a kis- és nagyméretű acélszálak vegyes használata növeli a repesztő teher értékét, és kedvező hatással van a kezdeti maradó hajlító-húzószilárdságra.**

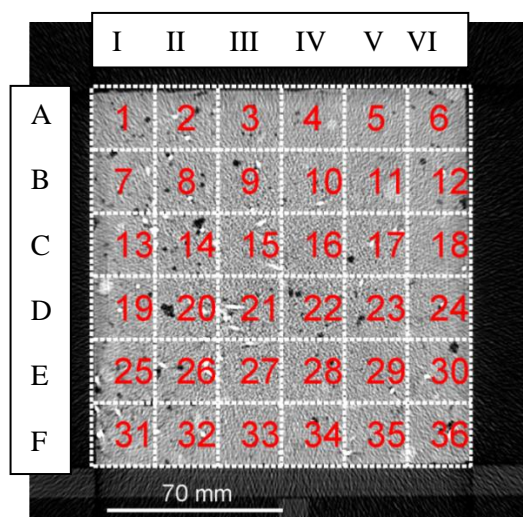
A vegyesen alkalmazott mikro- és makro műanyagszállal készült próbatestnél (Mix-MSt0,3-MNs0,1) a repesztő teher 14000 N. A repesztő teher elérése után a görbe intenzíven

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

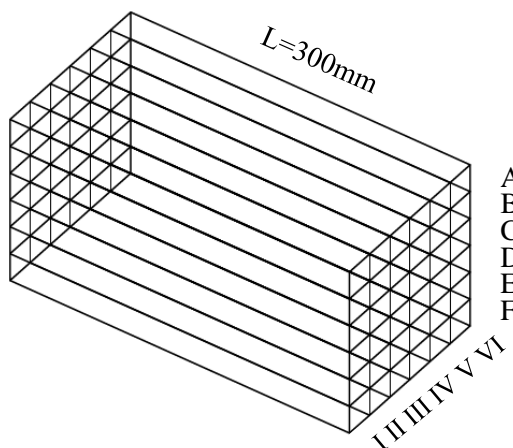
csökkenő szakasza 3000 N-ig tart. Ezután növekszik a görbe 3500 N teherfelvételig, majd ismét csökkenő tendenciát mutat. A szálkeverékkel készült betonkeverék teherfelvétele minden pontban kisebb, mint a Mix-MSt0,4, 0,4 V% MapefibreSt42 szállal készült betoné, tehát **a mikro műanyagszálak nem befolyásolják kedvezően a beton maradó hajlító-húzószilárdságát.**

6.2. CT vizsgálati eredmények

Komputertomográfias vizsgálatot a Mix0, szál nélküli referencia beton, és a Mix-H0,3, 0,3 V% Humix50 szálerősítéses beton, C jelű próbatestén végeztük el. A próbatestet a CT felvétel készítéséhez a beton bedolgozásának megfelelően helyeztük fel. Tehát a CT felvételen a felső oldal a próbatest bedolgozási oldala. A CT vizsgálat során a száleloszlást 6x6-os raszterben értékeltük ki (6.8. ábra). A raszter oszlopait római számokkal (I, II, III, IV, V, VI), míg a raszter sorait betűkkel (A, B, C, D, E, F) jelöltem. A raszter kiosztásra és a hasábok elhelyezkedésének szemléltetésére axonometrikus ábrát is készítettem (6.8. ábra). Az egyes mezőkön belül száleloszlás, illetve pórustartalom vizsgálatát végeztük el.



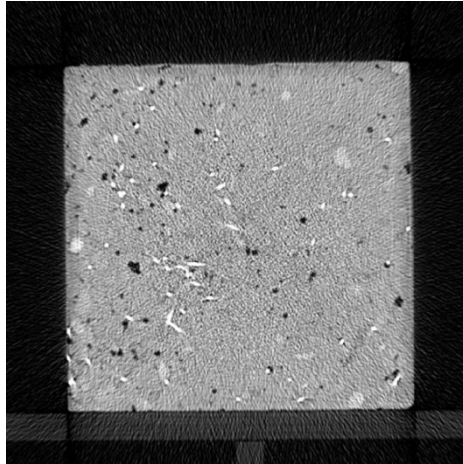
6.7. ábra: Raszter kiosztás



6.8. ábra: A kiértékeléshez definiált hasábok értelmezése a próbatestben

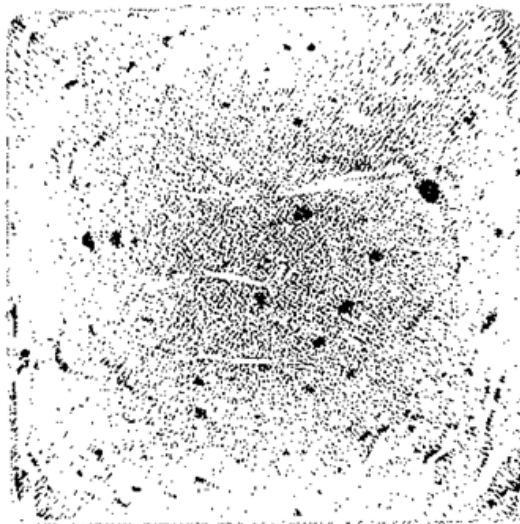
Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

A 6.9. ábrán a próbatest egy szeletről készült CT felvétele látható. A CT berendezés során a berendezés a próbatest hossza mentén haladva szeletenként végzi a vizsgálatot. Egy szelet vastagsága esetünkben 1,2 mm volt. A CT felvételek elemzése után minden egyes szeletre elkészítettük a pórus, illetve száleloszlás meghatározását.



6.9. ábra: Eredeti CT felvétel

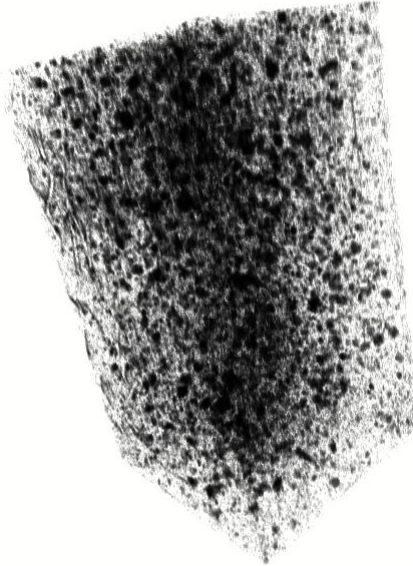
A 6.10. ábra, a 6.9 ábrán látható szelet pórustartalmát ábrázolja. Megfigyelhető, hogy a próbatest közepén, illetve a sarkai felé több a pórus. A képen a nagyobb pórusok jobban láthatók. A nagyon kicsi pórusokat a CT felvételen nem lehet kimutatni.



6.10. ábra: Beton pórustartamának megjelenítése

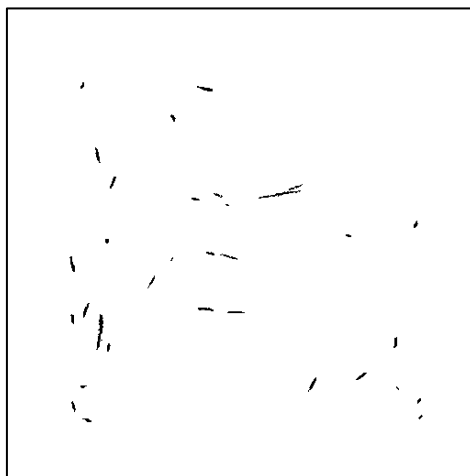
Beton maradó húzószilárdsága szálokotél alkalmazása esetén

A szeletek pórustartalomról készült képeinek egymás után rakásával megkaptuk a próbatest 3D pórustartalom ábráját (6.11. ábra). Az ábrán jól láthatóak a sötétebb, nagyobb pórusok.



6.11. ábra: Beton pórustartalma 3D felvétel képe

A 6.12. ábrán a 6.9. ábrán lévő keresztmetszet száltartalma látható. Némelyik szál pontként jelenik meg, ami azt jelenti, hogy a szál a próbatest hosszirányában helyezkedik el. A szálak akár több szeletben is megjelenhetnek (mivel 1 szelet 1,2 mm, a Humix50 acélszál, pedig 50 mm). A vonalként megjelenő szálak a hosszirányban ferdén elhelyezkedő szálak vagy a merőleges helyzetű szálak jelzik.



6.12. ábra: Beton száltartalma egy vizsgált szeletben

Beton maradó húzószilárdsága szálokotél alkalmazása esetén

Az egymást követő szeletek száltartalmáról készült felvételekből kaptuk a beton száltartalmának 3D felvételét (6.13. ábra). Jól látható, hogy a szálak a próbatest közepe felé orientálódnak, és a nagyrésze tengelyirányban helyezkedik el.



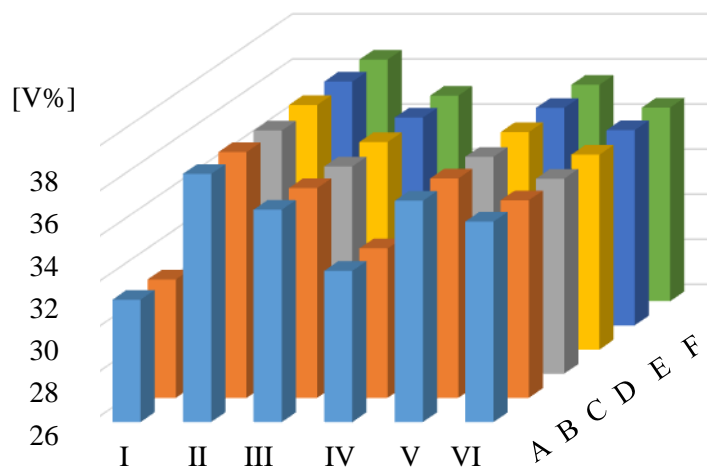
6.13. ábra: Beton száltartalma 3D reprezentációban

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

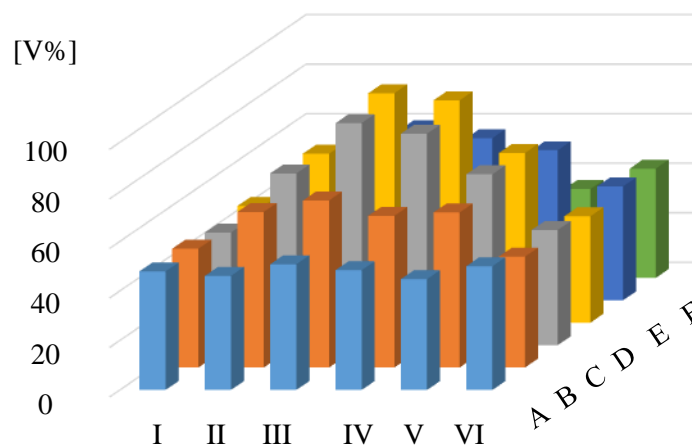
A 6.14. és 6.15. ábrákon a hasábokban összesített pórustartalom, százalékos megoszlása látható. A hasábok a 6.8. ábra szerint L hosszúságúak ($L=300$ mm).

A CT felvételen nem látszanak a kisebb pórusok, így a valós pórustartalom valamivel nagyobb, mint amit a CT vizsgálat kiértékelése során kaptunk. A szál nélküli beton összesített pórustartalma az I és IV oszlopban kisebb. Az oszlopok pórustartalma egyenletesen alakult.

Acélszál alkalmazása esetén a pórustartalom lényegesen nagyobb volt, mint a szál nélküli beton esetén. A pórusok a próbatest közepén jelentkeznek nagyobb számban, amit a betonhoz kevert szálak magyaráznak, amik megnehezítik a beton tömöríthetőségét.



6.14. ábra: Szál nélküli referenciabeton (Mix 0) pórustartalma



6.15. ábra: Humix50 0,3V% szálas beton (Mix-H0,3) pórustartalma

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

A Mix0, szál nélküli beton próbatest egy szeletében lévő hasábok pórusai általánosan 1-2 %-át, de maximum 4 %-át teszik ki (6.1. táblázat). Acélszál alkalmazása esetén egy hasábban lévő pórusok száma gyakran eléri a 4-5 %-ot, de van, hogy meghaladja akár a 8 %-ot is (6.2. táblázat). Mivel a komputer tomográfias vizsgálat során a kisebb pórusok nem értelmezhetőek, a táblázatban megadott pórustartalom a valós pórustartalomnál valamivel kisebb.

Az a feltételezés, miszerint a száladagolással többlet levegőt viszünk a betonba, amely hatására több pórus marad, valósnak bizonyult.

6.1. táblázat: Szál nélküli beton pórustartalma (E sor)

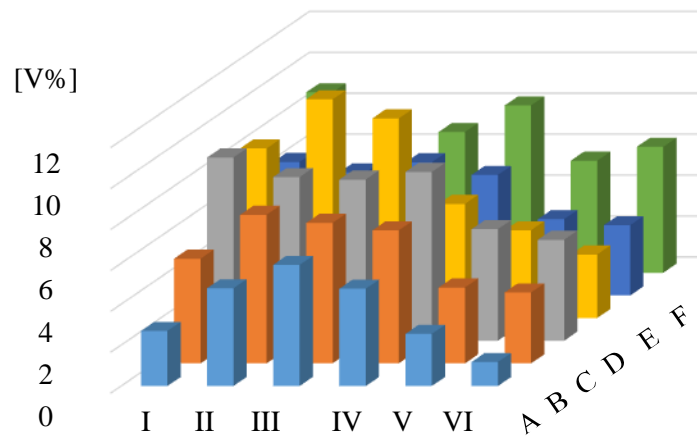
	25. hasáb	26. hasáb	27. hasáb	28. hasáb	29. hasáb	30. hasáb
Átlag	0,117	0,170	0,217	0,209	0,157	0,114
Medián	0,112	0,166	0,213	0,208	0,153	0,111
Minimum	0,074	0,107	0,154	0,122	0,113	0,072
Maximum	0,201	0,312	0,328	0,375	0,305	0,190
Szórás	0,026	0,032	0,033	0,029	0,026	0,022

6.2. táblázat: Humix50 acélszál erősítésű beton pórustartalma (E sor)

	25. hasáb	26. hasáb	27. hasáb	28. hasáb	29. hasáb	30. hasáb
Átlag	0,206	0,278	0,301	0,285	0,263	0,200
Medián	0,204	0,272	0,292	0,276	0,257	0,196
Minimum	0,093	0,126	0,217	0,214	0,151	0,088
Maximum	0,343	0,413	0,525	0,505	0,488	0,327
Szórás	0,049	0,056	0,046	0,046	0,057	0,050
Üres szele	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

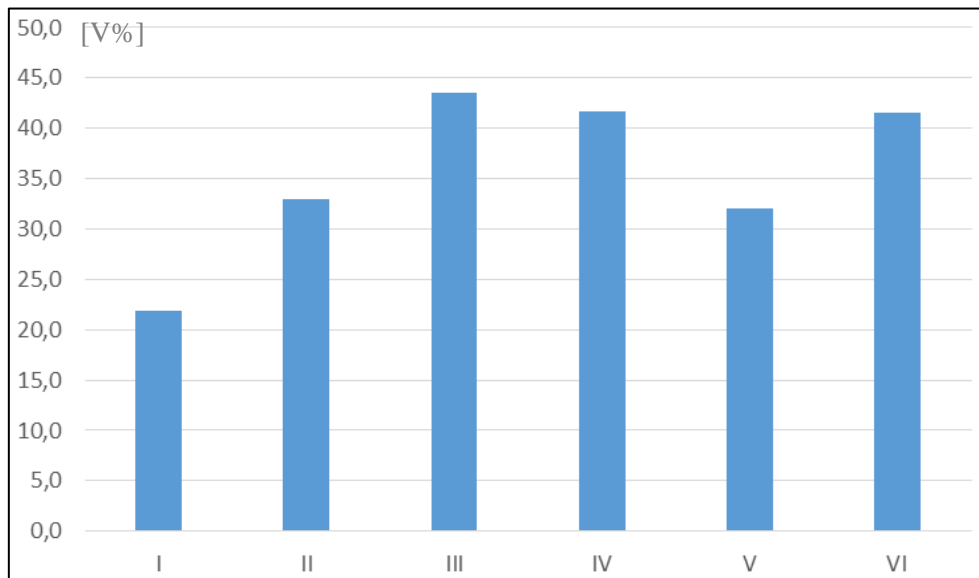
A 6.16. ábra a beton összesített száltartalmát mutatja a hasábok szerint (6.12. ábra). Az első és második oszlopban a legtöbb szál a közepén helyezkedik el. A „C”, „D”, „E” sorban a legtöbb szál a I-IV. oszlopban található.

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

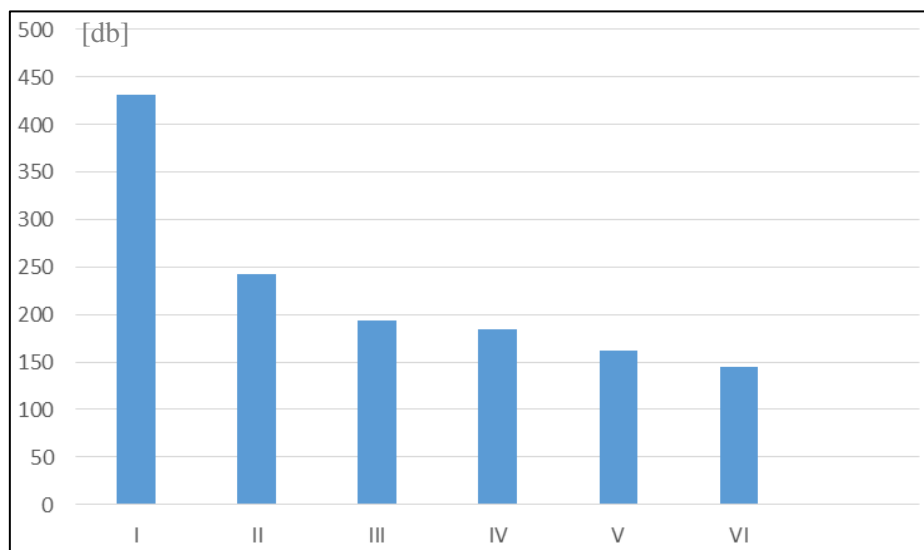


6.16. ábra: Humix50 0,3V% szál tartalmú beton (Mix-H0,3) próbatest száltartalma

A 6.17. ábrán jól látható, hogy a szálak a próbatest közepén, illetve a VI-os, szélső oszlopban nagyobb számban fordulnak elő. A 6.18. ábra azokat a hasábszeleteket mutatja, melynek keresztmetszeteiben nem fordul elő szál. **Az I. oszlopban a legtöbb, a szálakat nem tartalmazó cellák száma, amelyek az oszlopokban folyamatosan csökkennek. Ez a tapasztalat az acélszálak és a beton eltérő térfogatsúlyából adódó szálsüllyedéssel magyarázható.**



6.17. ábra: Humix50 0,3V% acélszál erősítésű beton száltartalma

Beton maradó húzószilárdsága száloktél alkalmazása esetén

6.18. ábra: Humix50 0,3V% acélszál erősítésű beton szál nélküli cellák száma

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban egyre szélesebb körben használunk szálerősítésű betont különböző mérnöki létesítmények építéséhez. A szakirodalom szerint az egyes száltípusoknak más-más kedvező hatásuk lehet, mint például a tűzállóság növelése, a zsugorodás csökkentése, valamint a duktilitás és maradó húzószilárdság növelése a betonra. Jelenleg kevés szakirodalom van a különböző fajta, illetve különböző hosszúságú szálak szálkoktólként történő alkalmazására. A szálerősítésű betonok egyik legfontosabb jellemzője a berepedést követő maradó hajlító-húzószilárdsága. A szakirodalom alapján feltételezhető, hogy kedvező hatással van a berepedést követő maradó hajlító-húzószilárdságra a szálkoktól alkalmazása.

Szálerősítésű betonok készítésénél fontos feladat, hogy a szálak egyenletesen oszoljanak el a betonban. A betonkeverés, tömörítés során hogyan alakul a száeloszlás? Az eltérő testsűrűségből adódóan a szálak felúszhatnak (műanyag), vagy lesüllyedhetnek (acél).

Vizsgálataim céljai a következők voltak:

1. A szálkoktól hatásának kísérleti meghatározása a beton maradó hajlító-húzószilárdságára vonatkozóan.
2. A pórustartalom, illetve póruseloszlás kísérleti elemzése.
3. Szálorientáció kísérleti jellemzése.

A kísérleteim során nyolcféle keveréket készítettem, melyek közül az egyik szál nélküli referencia beton volt.

A kísérleteimnél

állandó paraméterek voltak:

- cement típus és mennyiség,
- víz mennyiség,
- adalékanyag típus és mennyiség,
- illetve az adalékszer típusa;

változó paraméterek voltak:

- száltípus,
- száltartalom,
- adalékszer mennyisége.

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktél alkalmazása esetén

Az elvégzett vizsgálatokkal meg kívántam határozni, hogy szálkoktélok alkalmazásakor kedvezőbb-e a beton maradó hajlító-húzószilárdsága? Továbbá választ kívántam találni arra, hogy acélszál alkalmazásakor milyen mértékben növekszik meg a beton pórustartalma, és hogyan helyezkednek el a szálak a próbatestben.

Vizsgálati eredményeim alapján levonható megállapítások:

- 1.a. **a maradó ellenállásra kis repedéstágasságnál (1,0 mm-ig) kedvező hatással volt, ha a hosszú acélszál egy részét rövid acélszállal helyettesítettük (0,4 V% hosszú acélszál helyett 0,3 V% hosszú acélszálat és 0,1 V% rövid acélszálat alkalmazva),**
- 1.b. **az általam vizsgált acélszálakkal készült szálkoktél növelte a repesztő teher értékét a kizárólag hosszú acélszál alkalmazásához képest,**
- 1.c. a makro műanyagszálak 0,3 V% adagolása esetén és a vegyes (0,3 V% makro műanyagszál és 0,1 V% mikro műanyagszál) szálhasználat esetén nem tapasztaltam kimutatható különbséget, tehát **a mikro műanyagszálnak nem volt számottevő hatása a beton maradó teherbírására,**
- 1.d. az acélszálás beton maradó teherbírása lényegesen nagyobb volt a makro műanyagszál erősítésű betonéhoz képest,
- 1.e. az általam vizsgált próbatestek közül a Mix-A0,3 (ArcellorMittal-Wirex0,2x13 típusú, 0,3 V% rövid acélszál felhasználásával készült) beton próbatestnek volt a legnagyobb a repesztő ereje,
- 2.a. CT vizsgálatokkal igazoltam, hogy **az acélszál adagolással többlet levegő maradhat a betonban,** amit többek között a betonhoz kevert szálak miatti nehezebb tömöríthetőség magyarázhat,
- 2.b. CT vizsgálatok alapján **mind a szálnélküli, mind az acélszál erősítésű betonok esetén a pórusok a próbatest közepén jelentkeznek nagyobb számban,**
- 3.a. CT vizsgálatok alapján **az acélszálak eltérő térfogatsúlyából adódóan szálsüllyedés következhet be,**
- 3.b. a szálak a próbatest közepe felé orientálódnak, és a szálak nagyrésze tengelyirányban helyezkedik el.

Beton maradó húzószilárdsága száلكoktél alkalmazása esetén

Kutatásom alapján tehát az acélszál koktél növeli a repesztő erőt, illetve kis alakváltozások esetén nagyobb a maradó teherbírása a hosszú acélszál felhasználású betonéhoz képest. Acélszálak alkalmazásával többletlevegőt viszünk a betonba, így növeljük annak pórustartalmát. Az acélszál és a beton eltérő térfogatsúlya miatt szálsüllyedés következhet be.

8. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani azoknak, akik segítettek és támogatták munkámat.

Külön köszönöm

- konzulenseimnek: Czoboly Olivér Attila doktorandusznak, Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva Eszter adjunktusnak, Dr. Balázs L. György tanszékvezető, egyetemi tanárnak TDK dolgozatom elkészítésében nyújtott szakmai és gyakorlati segítségüket, útmutató tanácsaikat,
- Dr. Salem G. Nehme egyetemi docensnek a vizsgálati anyagok beszerzésében nyújtott segítségét, és a betonreceptúra összeállítását,
- Kapitány Kristófnak, a CT vizsgálatok kiértékelésében való segítségét,
- a Kaposvári Egyetem, CT vizsgálatok elvégzésében való segítségét,
- NTP-TDK-14-0029 számú pályázat pénzügyi támogatását,
- az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék minden munkatársának segítségét, tanácsait.

Végül szeretném megköszönni családom és barátaim támogatását és segítségüket a tanulmány ellenőrzésében.

9. HIVATKOZÁSOK

avers.hu (2015): „<http://avers.hu/referencia>” (letöltve: 2015.09.20.)

Balázs L. Gy., Erdélyi L. (1996): „A beton szívósságának növelése acélszálakkal”,
Tanulmány, BME Vasbetonszerkezetek Tanszék

Balázs L. Gy., Polgár L. (1999): „A szálerősítésű betonok múltja, jelene és jövője”,
VASBETONÉPÍTÉS, 99/1, pp. 3-10

Balázs L. Gy. (2002): „Szálerősítésű betonok - Terminológia és anyagjellemzők”,
Terminológia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Magyar nyelvű
szakelőadások 2001-2002-es tanévben, Kolozsvári Műszaki Egyetem Építő- és
építészmérnöki Kar, pp. 3-21

Balázs L. Gy. (2004): „Szálerősítésű betonok - Kutatástól az alkalmazásig”,
VASBETONÉPÍTÉS, 2004/4, pp. 98-99.

Balázs L. Gy., Lublós É. (2006): „Műanyagszál adagolású betonok alkalmazási lehetőségei,
különös tekintettel a tűzállóságra”, *VASBETONÉPÍTÉS* 2006/2, pp. 57-63

Balázs Gy., Balázs L.Gy. (2013): „Szálak szerepe a beton-és vasbetonépítésben”,
KÜLÖNLEGES BETONOK ÉS BETONTECHNOLÓGIÁK V., Akadémiai Kiadó,
2013, pp. 299-335

Balázs L. Gy., Lublós É., Czoboly O. (2014): *fib* „Effectiveness of fibres for structural
elements” FRC2014, Joint ACI- *fib* Int. Workshop: Fibre Reinforced Concrete: from
Design to Structural Applications pp. 357-366

Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.D. (2011), Betonkalender 2011, Kraftwerke, pp
116-134.

betonopus.hu (2014): „<http://betonopus.hu/szakmernoki/172-szalerositesu-beton.pdf>”,
(letöltve: 2014.10.01.)

Cement & Concrete Assotiation of New Zeland (2009): Information Bulletin: IB39, Fibre
Reinforced Concrete, 2009, December, pp. 1-39

civilhir.hu (2014): „<http://civilhir.hu/sport/labdarugas>”, (letöltve: 2014. 10. 11.)

c2.staticflickr.com (2015): „https://c2.staticflickr.com/4/3032/2786977683_f314ab6763.jpg”,
(letöltve:2015.10.30.)

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

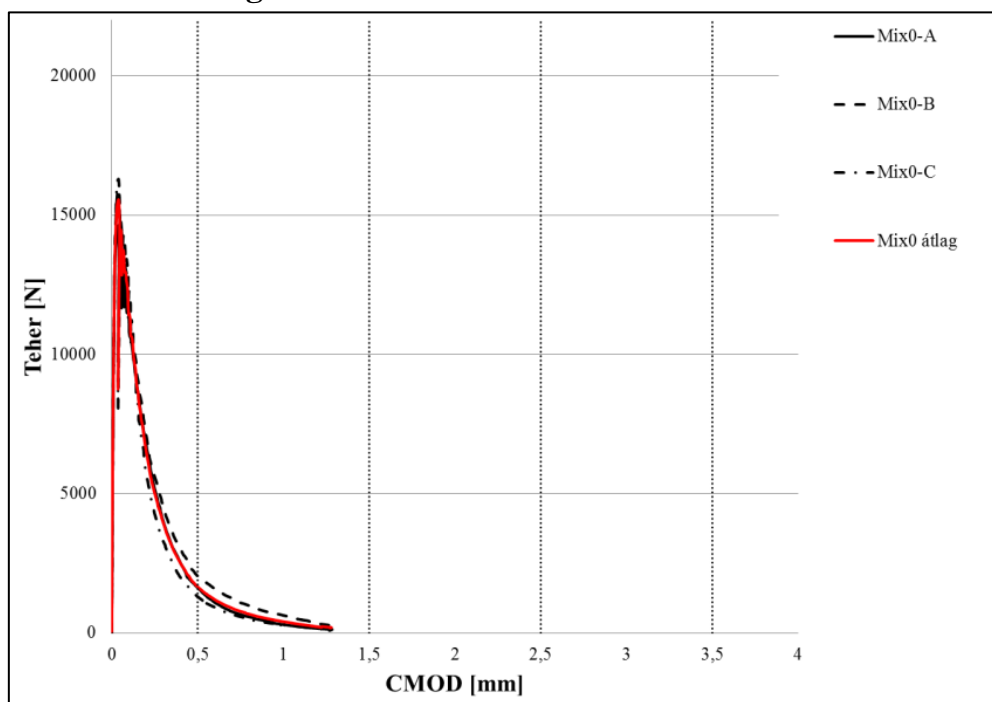
- c-consulting.org (2015): „http://c-consulting.org/tl_files/c-consulting/content/systeme/Philips%20Healthcare/NUK:PET/Philips%20Gemini%20TF%20BigBore%20PET%20CT.jpg”, (letöltve: 2015.10.20)
- Dezső, Zs., Polgár I., (2013): „A debreceni Nagyerdei Stadion igényes és újszerű tartószerkezeti megoldásai”, *VASBETONÉPÍTÉS* 2013/2, pp. 47-52
- European Ready Mixed Concrete Organization (2012): „Guidance to fibre concrete”, *Properties Spetification and Practice in Europe*, 2012, September pp. 1-39
- elastoplastic.com (letöltve: 2014. 03. 31.): „<http://elastoplastic.com/index.php/downloads>”
- Falkner, H. (1998): „Innovatives Bauen”, *Betonwerk-Vertigteil-Technik* Nr. 4/1998, pp. 42-51
- Falkner H., Volkner Henke. (2004), „Acélszál erősítésű beton, a kutatástól a szabványosításig” *VASBETONÉPÍTÉS* 2004/4, pp. 100-107
- Fenyvesi O. (2012): „Betonkorai zsugorodási repedésérzékenysége”, PhD értekezés, BME, p. 103
- fiberguru.hu (2015): <http://fiberguru.hu/referenciak/>, (letöltve: 2015.09.20.)
- Halvax K., Lublós É. (2012): „Szálerősítésű betonok alkalmazási területe”, *BETON*, 2012/22/11-12, pp. 3-8.
- Juhász K. P. (2013): „Szintetikus makro szálerősítésű betonok”, Diplomamunka, BME, p.49
- Kaussay T. (1999): „Szálerősítésű betonok szabványosított vizsgálatai és néhány tulajdonsága” Konferencia Kiadvány „*Szálerősítésű betonok - Kutatástól az alkalmazásig*” (Szerk: Balázs L. Gy.), 1999. március 4.-5., Budapest
- Kaussay T. (2009): „Ultra nagy szilárdságú beton”, *BETON*, 2009/november-december, XVII. évf. 11-12. szám, pp. 14-17
- Kerényi R. (2014): „Makro szálak hatása a beton hőterhelését követő jellemzőire”, TDK dolgozat, BME (Konzulensek: Czoboly O., Lublós É. Balázs L. Gy.)
- Kerényi R., Czoboly O., Lublós É., Balázs L. Gy. (2015): „Makro műanyagszálak hatása a beton hőterhelését követő maradó tulajdonságaira”, *ÉPKO 2015, XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Csíksomlyó, 2015. június 4-7., pp. 101-104
- Kozák J., Magyar B. (2013): „A budapesti 4-es metróvonal építése, 4. FRC burkolatok a 4-es metro három állomásán Budapesten”, *VASBETONÉPÍTÉS*, 2013/2, pp. 53-56
- Li V. C., Maalej M. (1996): „Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 18/44, pp. 239-249

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén

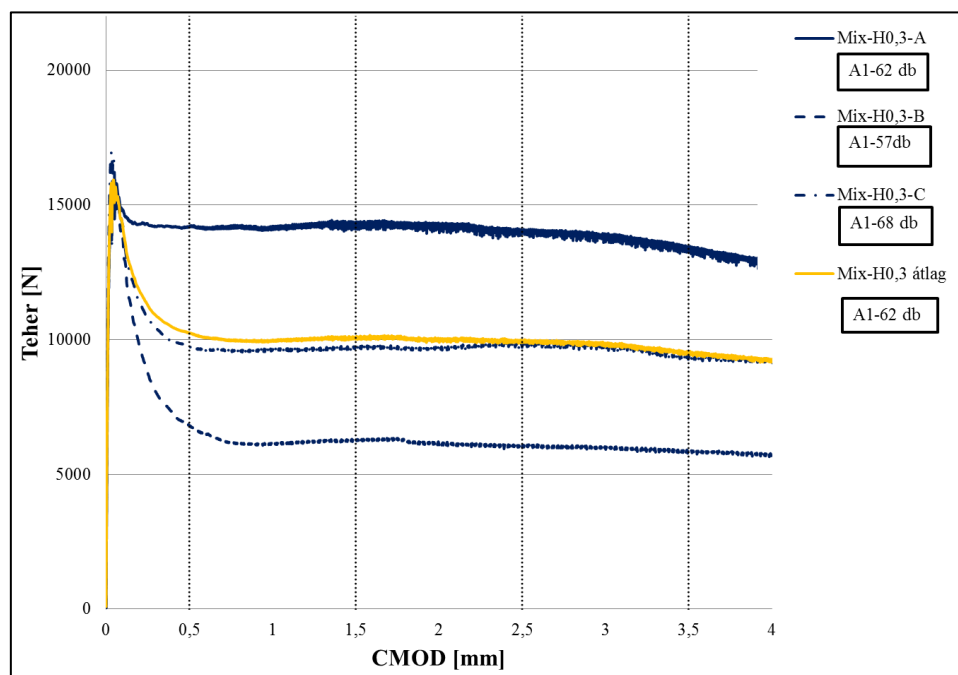
- Liaqat A. Qureshia, M. Ilyas Sheikhb, Tahir Sultanb (2013): „Effect of Mixing Fiber Cocktail on Flexural Strength of Concrete” pp. 711-719 www.elsevier.com/locate/procedia
- Lublóy É. (2008): „Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira”, PhD értekezés, BME, p. 100
- Lublóy É., Földes T., Balázs L. Gy. (2013): „ A CT (computed tomography) bevezetése a beton roncsolásmentes vizsgálataihoz”, *VASBETONÉPÍTÉS* 2013/1, pp. 2-6
- Lublóy É., Ambrus D., Földes T., (2014): „Hézagtralom mérése aszfalt próbatesteken CT-vel”, *MAGYR ÉPÍTŐIPAR*, 2014/4, pp. 161-165
- mapei.com (2015): „<http://www.mapei.com/HU-HU/references.asp>”, (letöltve: 2015.09.20.)
- Markovic, I., Walraven, J.C., Van Mier J.G.M. (2013): „Experimental evaluation of fibre reinforced concrete”, Proc. 4th International RILEM workshop on High Performance Hybrid Fibre Concrete (Eds: Naaman A.E., Reinhardt H.W.), 2013, Bagnaux, pp. 419-436
- MSZ EN 14845-1 (2008): Betonban lévő szálak vizsgálati módszerei 1. rész- Referencia betonok, p. 1+9
- MSZ EN 14889-2 (2007): Magyar szabvány, szálak betonhoz, második rész: polimer szálak, meghatározások, előírások és megfelelés, p. 27
- MSZ EN 14651:2005+A1: Magyar szabvány, fémszálal beton vizsgálati módszere, a hajlító-húzószilárdság mérése [arányossági határ (LOP), maradó hajlító-húzószilárdság), p. 16
- Nagy J., Köllő G., Herman C., Herman A. (2014): „ A szegedi 1-3 sz. villamos pályájának tervezési tapasztalatai”, *MŰSZAKI SZEMLE*, 2014/64, pp. 36-40
- P. Pliya, A-L. Beaucour, A. Noumowé. (2011): „ Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature” pp. 1926-1934 www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- Yining Ding, Cecília Azevedo, J.B. Aguiar, Said Jalali, (2012): „Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature”, pp. 21-31 www.elsevier.com/locate/conbuildmat

10. MELLÉKLET

10.1. Teher-CMOD diagramok

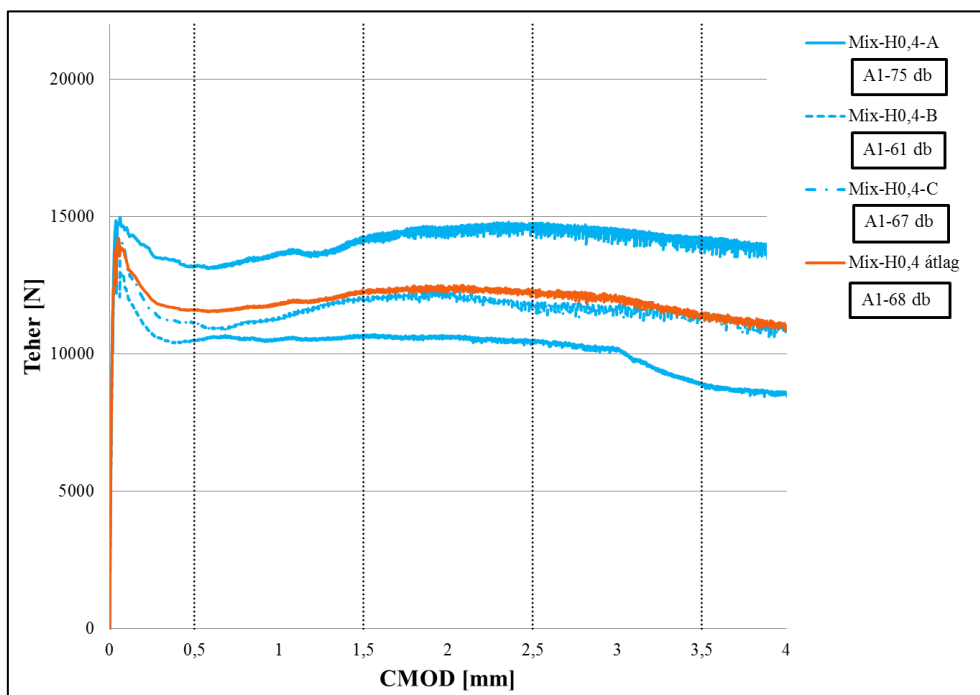


10.1. ábra: Szál nélküli beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

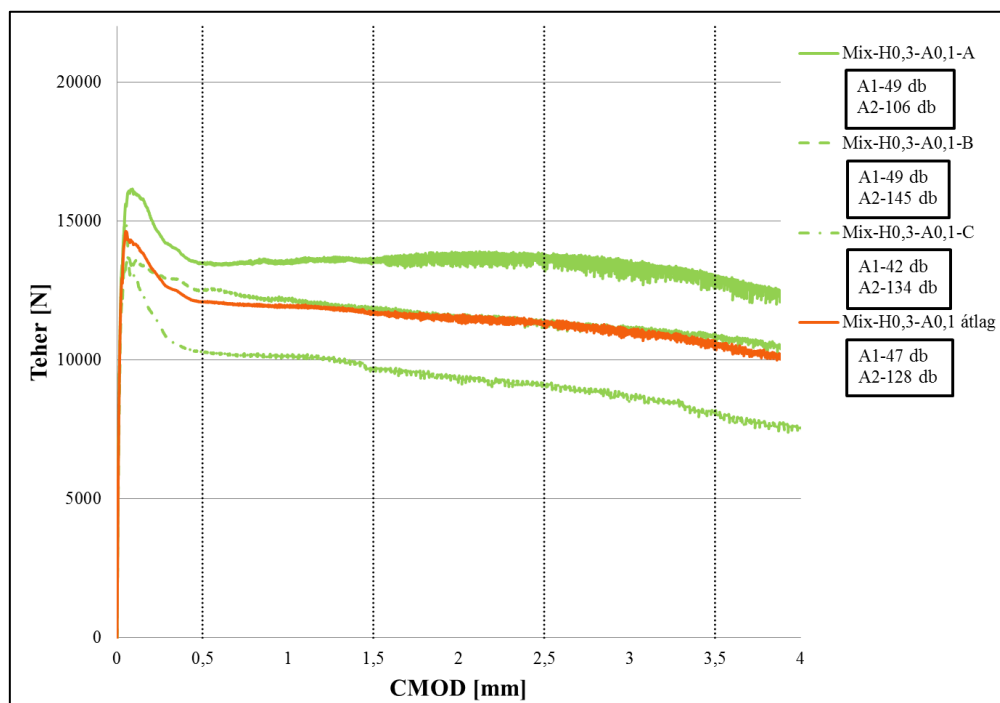


10.2. ábra: Humix50 0,3V% acélszál erősítésű beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

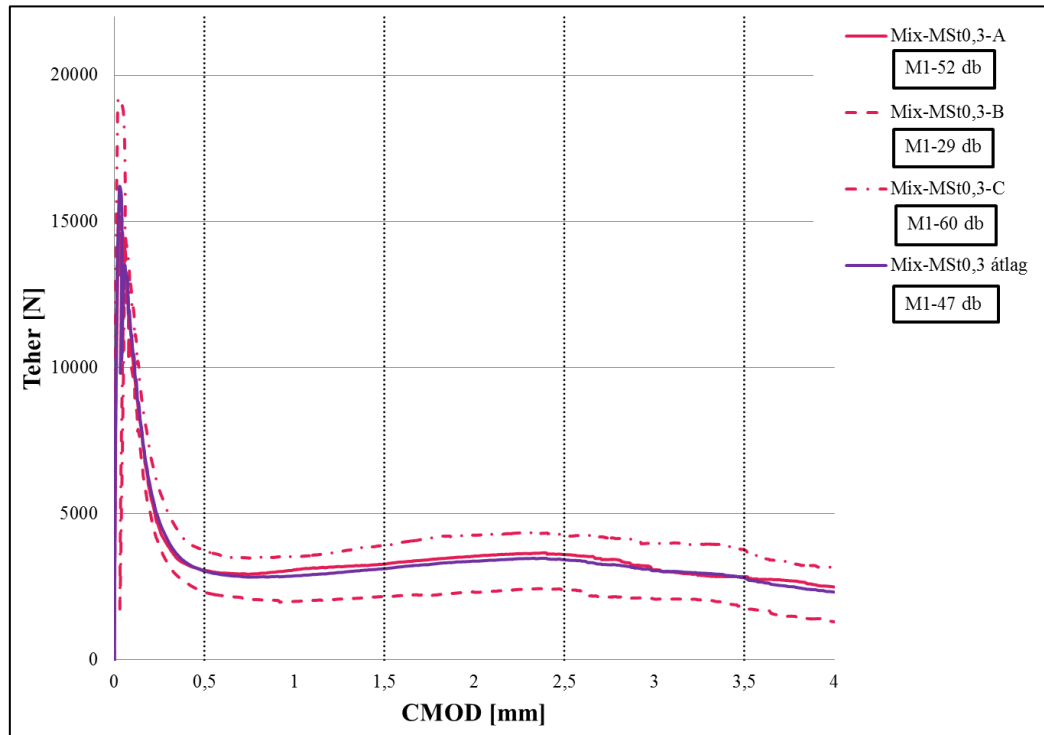


10.3. ábra: Humix50 0,4V% acélszál erősítésű beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

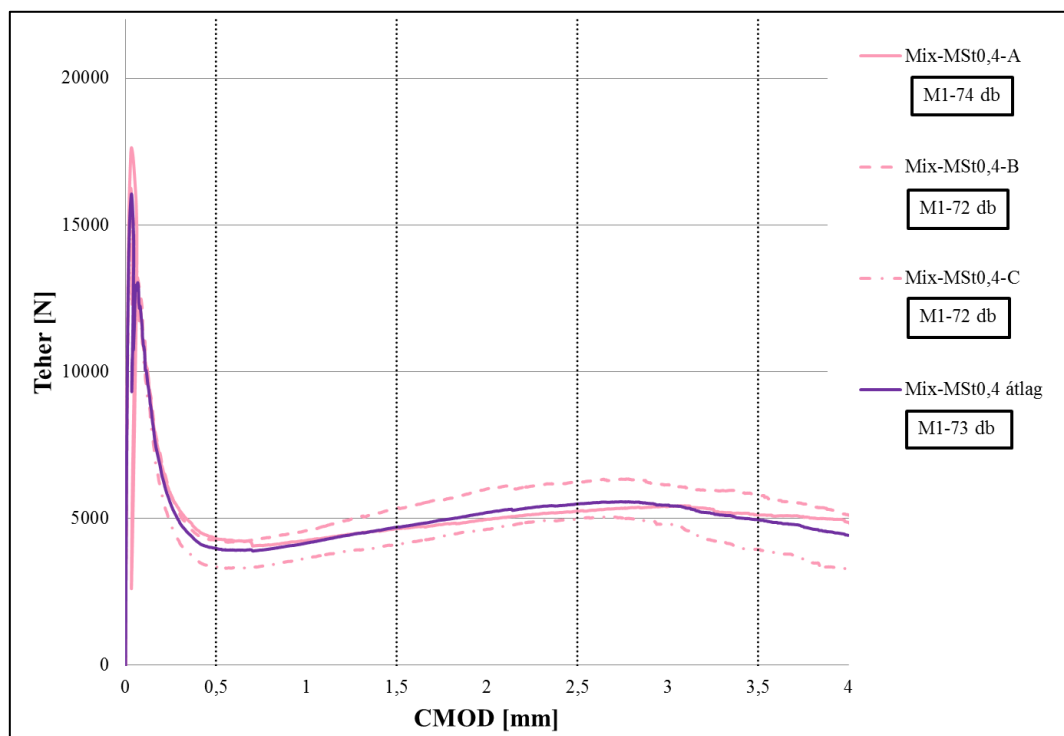


10.4. ábra: Humix50 és ArcelorMittal-Wirex0,2x13 acélszál keverékes beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktól alkalmazása esetén

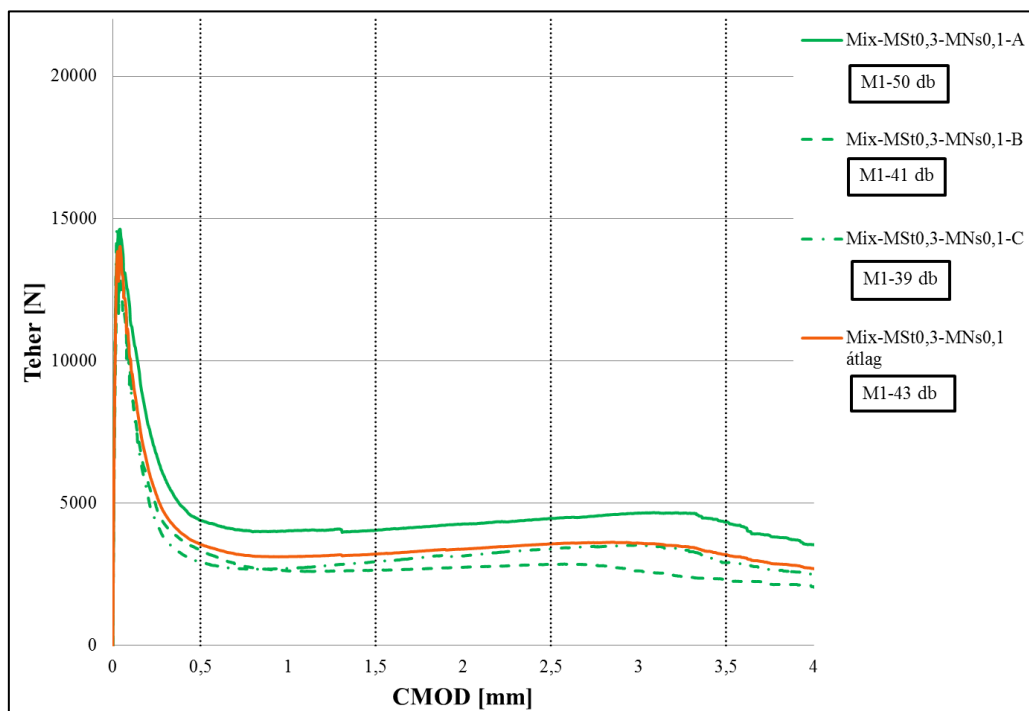


10.5. ábra: Mapecfibre St42 0,3 V% műanyagszál erősítésű beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

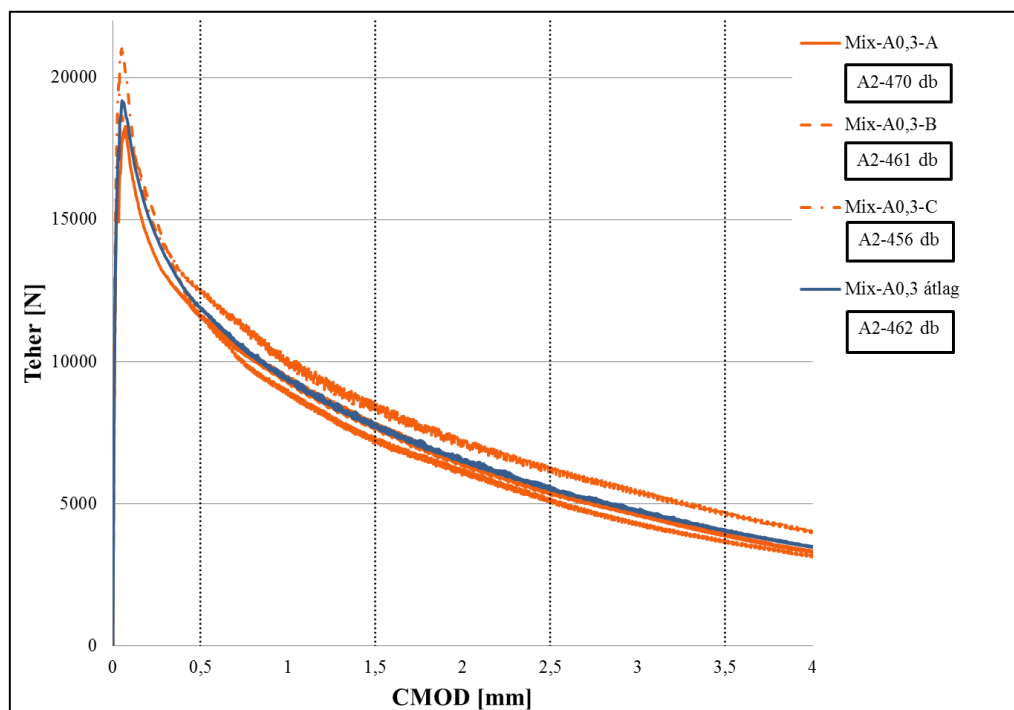


10.6. ábra: Mapecfibre St42 0,4 V% műanyagszál erősítésű beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén



10.7. ábra: Mapefibre St42 és Mapefibre Ns12 műanyagszálkeverékes beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)



10.8. ábra: ArcelorMittal-Wirex0,2x13 0,3V% acélszál erősítésű beton teher-CMOD diagram (egyedi mérések + átlag)

Beton maradó húzószilárdsága szálkóktól alkalmazása esetén

10.2. Testsűrűség

10.1. táblázat: Beton próbatestek geometriai méretei és testsűrűsége

Próbatest jele	Gerenda mérete [mm]			h_{sp} [mm]	Tömeg [kg]	Testsűrűség [kg/m ³]	
	a	b	h				
Mix0	A	150,09	153,20	597	124,45	32,458	2364,49
	B	150,06	151,51	603	126,90	32,909	2400,44
	C	150,17	151,36	601	126,00	32,538	2381,89
Mix-MSt0,3	A	149,52	151,31	603	123,78	32,609	2390,30
	B	147,34	151,90	597	127,23	32,449	2428,56
	C	148,65	152,60	602	135,76	32,530	2382,14
Mix-MSt0,4	A	151,06	152,30	599	126,85	32,423	2352,76
	B	149,71	151,50	599	123,41	32,403	2385,04
	C	150,06	151,98	599	124,52	32,482	2377,74
Mix-MSt0,3- MNs0,1	A	149,94	150,97	595	122,60	31,944	2371,72
	B	149,64	151,05	600	119,35	32,025	2361,40
	C	149,38	150,01	599	122,48	31,875	2374,71
Mix-H0,3	A	150,21	150,85	600	124,39	32,012	2354,60
	B	149,85	150,15	599	129,35	31,966	2371,81
	C	150,11	153,07	599	130,11	32,359	2351,09
Mix-H0,4	A	149,53	153,66	599	120,21	31,935	2320,34
	B	149,84	151,10	598	119,27	31,654	2337,95
	C	149,89	151,43	598	123,69	31,769	2340,55
Mix-A0,3	A	150,92	152,93	599	129,80	32,919	2381,11
	B	149,91	151,51	600	128,20	32,423	2379,20
	C	149,42	152,91	599	126,03	32,737	2392,03
Mix-H0,3- A0,1	A	149,65	150,50	605	122,32	32,177	2361,44
	B	149,79	150,51	602	119,95	31,809	2343,72
	C	149,73	148,37	600	123,53	31,546	2366,67

Beton maradó húzószilárdsága szálkoktól alkalmazása esetén

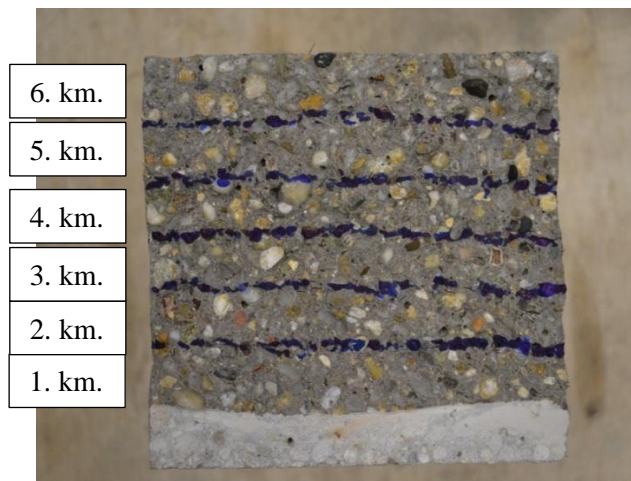
10.3. Szálak darabszáma a törési keresztmetszetben

Az acélszálakat a kettétört próbatest mindkét felén megszámláltam, mivel azt tapasztaltam, hogy az acélszálak nem szakadnak el, hanem kihúzódnak a betonból, ezért látható a 10.2. táblázatban minden acélszál erősítésű próbatestnél két sor (A1, A2, B1, B2, C1, C2) a szálak darabszámánál. A tönkremenetel során, a műanyagszálak szakadása volt tapasztalható, ezért a műanyagszálakat a törési keresztmetszet egyik oldalán számláltam.

10.2. táblázat: Szálak darabszáma törési keresztmetszetben

Próbatest jele	Szál	Szálak darabszáma a bemetszéstől 2 cm-es szakaszokban							Átlag			
		1 km.	2 km.	3 km.	4 km.	5 km.	6 km.	Σ				
Mix-MSt0,3	Mapefibre St42	A	8	9	10	9	7	9	52	47		
		B	8	4	4	4	5	4	29			
		C	11	3	17	11	11	7	60			
Mix-MSt0,4	Mapefibre St42	A	9	5	19	20	8	13	74	73		
		B	16	5	11	19	16	5	72			
		C	11	13	17	11	10	10	72			
Mix-MSt0,3 MNs0,1	Mapefibre St42	A	11	7	5	9	7	11	50	43		
		B	8	2	4	9	9	9	41			
		C	5	7	7	7	9	4	39			
Mix-H0,3	Humix	A1	3	5	1	4	1	1	15	62	62	
		A2	6	7	9	14	6	5	47			
		B1	1	3	8	6	4	3	25	57		
		B2	8	3	4	7	4	6	32			
		C1	2	6	13	11	1	2	35	68		
		C2	3	2	7	6	13	2	33			
Mix-H0,4	Humix	A1	4	6	6	7	7	5	35	75	68	
		A2	6	5	6	4	6	13	40			
		B1	3	2	11	5	5	7	33	61		
		B2	8	2	2	6	7	3	28			
		C1	5	4	6	6	6	6	33	67		
		C2	6	4	8	3	4	9	34			
Mix-H0,3- A0,1	Humix	A1	5	6	2	4	6	5	28	49	47	
		A2	3	4	2	4	4	4	21			
		B1	2	1	5	3	3	3	17	49		
		B2	6	11	6	4	2	3	32			
		C1	0	6	0	4	2	3	15	42		
		C2	4	6	5	4	4	4	27			
	Arcelor Mittal	Arcelor Mittal	A1	9	11	6	5	6	16	53	106	128
			A2	9	11	5	10	10	8	53		
			B1	7	12	16	9	7	12	63	145	
			B2	12	21	12	10	9	18	82		
			C1	11	10	9	11	13	12	66	134	
			C2	11	12	12	11	10	12	68		
Mix-A0,3	Arcelor Mittal	A	88	72	76	74	80	80	470	459		
		B	58	84	82	70	66	102	462			
		C	70	72	78	62	82	82	446			

Beton maradó húzószilárdsága szálfoktél alkalmazása esetén



10.9. ábra: Törési keresztmetszet sávokra osztva a szálak darabszámának meghatározásához