

PhD tézisek
(nyilvános vitára)

Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége

Fenyvesi Olivér
okl. építőmérnök

Tudományos vezető:
Dr. Józsa Zsuzsanna
PhD, egyetemi docens

Budapest, 2012

1. A KUTATÁSI FELADAT RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI

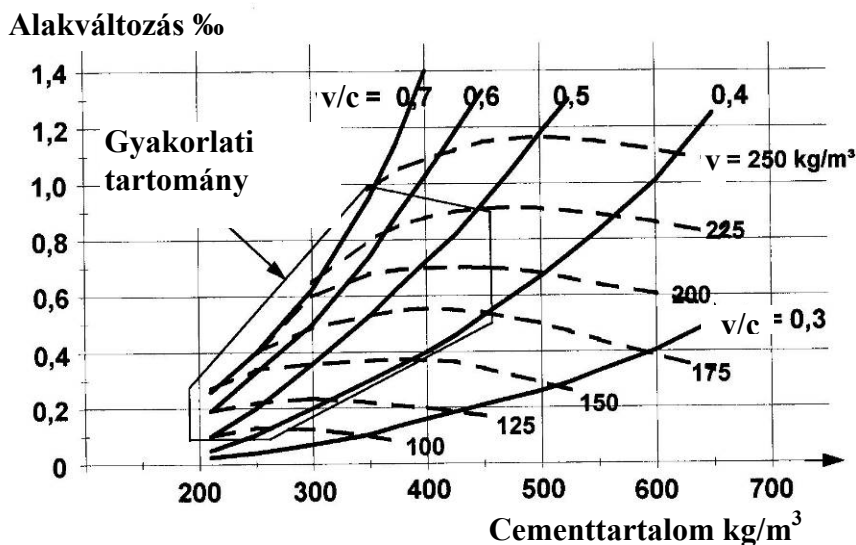
A cementkötésű anyagok, így a beton, a habarcs és a cementpép esetében, alakváltozások lépnek fel már az alapanyagok összekeverésétől kezdve. Kezdetben ez lehet duzzadás vagy zsugorodás is, később azonban a **zsugorodás** lesz a jellemző alakváltozási forma, amit elsősorban a víz mozgása okoz a porózus, szilárduló, illetve megszilárdult anyagban. Az anyag kötése előtt (az első 2-8 órában) játszódik le a **képlékeny zsugorodás**, amikor a cementpép, mint bármilyen más finomszemcsés szuszpenzió, először a szabad felület felé szivárogyva veszi el a víztartalom egy részét. A szemcsék süllyedése és tömörödése után a víz a felületi feszültség hatására a kapillárisokból a külső felület felé szivárog, és onnan elpárolog (ezért nevezik ezt a zsugorodási formát kapilláris zsugorodásnak is). A külső réteg térfogatcsökkenését a belső, nem zsugorodó rész gátolja, ez a felületen térképszerű és nagy vastagságú repedéseket eredményezhet, (ugyanúgy, ahogyan a finom szemmegoszlású iszap is száradás után hálósan összeropedezik) [Lägel et al.]. A cementpép hidratációja folyamán is lejátszódik térfogatváltozás (autogén zsugorodás), ennek oka, hogy a hidratációs termékek (a cementkő) térfogata kisebb, mint a kiindulási anyagoké (cement + keverővíz). Ez a folyamat lelassul, mielőtt az anyag megköt és ridegebb lesz [Neville, 1995]. Az autogén zsugorodáson kívül a kémiai kötésben részt nem vevő keverővíz távozása is okoz zsugorodást, amit száradási zsugorodásnak nevezünk. Ennek egy része irreverzibilis folyamat, míg a maradék rész reverzibilis, és az utókezeléstől függően, nedvességfelvétel hatására visszaduzzad az anyag [Neville 1995, Grube 2003]. A képlékeny, autogén és száradási zsugorodást együtt korai zsugorodásnak nevezzük.

A korai zsugorodás mértékét a betonösszetétel igen sok eleme befolyásolja:

- a pép cementtartalma
- a cement őrlési finomsága
- a keverék finomrész tartalma (a szemhalmaz 0,125 mm alatti része)
- a finomrész fajlagos felülete
- víz-cement tényező
- a keverék összes adalékanyag tartalma
- az adalékanyag fajtája
- az adalékanyag vízfelvétele/víztartalma
- adalékszerek
- bedolgozás/porozitás
- egyéb kiegészítő anyagok, például szálak.

A száradási zsugorodás összefüggését a betonösszetétel leglényegesebb paramétereivel [Grube, 2003] részletesen kutatta (1. ábra), szerinte a legnagyobb mértékben a cementtartalom és a cement fajtája, illetve a víztartalom befolyásolja a korai zsugorodás mértékét.

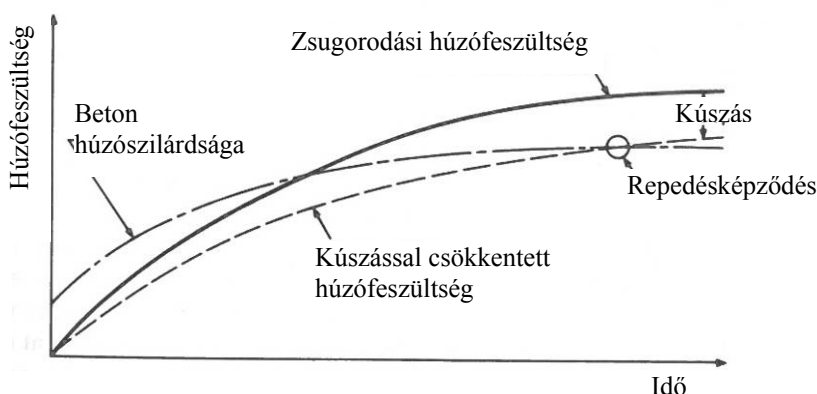
A felsorolt tényezőkön kívül a zsugorodás függ minden olyan külső tényezőtől is, amely befolyásolja a beton nedvességháztartását (hőmérséklet, relatív páratartalom, szélesség, utókezelés) [Neville 1995].



1. ábra A száradási zsugorodás a cementtartalom és a v/c függvényében Grube szerint [Grube 2003]

A korai zsugorodási repedések sokszor okoznak gondot a vasbetonszerkezetek építésénél, nem egyszer követeljük meg a repedésmentességet ezeknél a szerkezeteknél, gondoljunk csak egy látszóbeton felületre vagy vízepítési műtárgyakra, de a legtöbb esetben elmondható, hogy a tartósság szempontjából hátrányos a beton repedezése.

A cementkötésű anyagok korai zsugorodási repedéseinek kialakulása két ellentétes hatású folyamat eredménye. Egyrészt az anyag korával nő a zsugorodás mértéke, amely alakváltozás feszültségeket ébreszt a próbatest vagy a szerkezet alakjától függően. Másrészt az idővel és a hidratáció előrehaladtával nő a beton húzószilárdsága is. Ha ennek nagyságát meghaladja a zsugorodás miatt fellépő feszültség, repedés keletkezik az anyagban (2. ábra).



2. ábra A húzószilárdság és a beton zsugorodása következtében fellépő feszültség kapcsolata Neville szerint [Neville 1995]

2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

A különböző betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége vonatkozóan viszonylag kevés adat áll rendelkezésünkre, különösen igaz ez a **könnyűbetonok** esetén. Napjainkban egyre több könnyű adalékanyag válik elérhetővé hazánk területén is, amelyek repedésérzékenységre gyakorolt hatását alig ismerjük, gyakran felmerül a betonösszetétel tervezésekor ez a kérdés. **Szálerősítésű betonok** esetén is elmondhatjuk, hogy új és új alapanyagokból, illetve technológiai eljárásokkal készülnek szálak betonokhoz. Mivel a műanyag és üvegszálakat közvetlenül a repedések megelőzése miatt keverjük a betonba, fontos hogy hatásukkal (és mellékhatásaikkal is) tisztában legyünk (értekezésemben nem térek ki az acélszálak témakörére). Ezekon kívül gyakran felmerül az a kérdés is, hogy a repedésmentes beton készítéséhez milyen **cementet** kell és lehet alkalmazni, illetve milyen paramétereknek kell megfelelnie a kis repedésérzékenyséű betonba keverendő cementeknek.

Az értekezés céljai a következők:

- a **könnyűbeton** korai zsugorodási repedésérzékenységének meghatározása az alkalmazott könnyű adalékanyagok vízfelvételének függvényében;
- a **szálerősítésű** normál betonok korai zsugorodási repedésérzékenységének meghatározása az alkalmazott műanyag, illetve üvegszálak fajtájának, és adagolásának függvényében;
- a **normál** (más néven közönséges illetve hagyományos) betonok (a továbbiakban normál betonok) korai zsugorodási repedésérzékenységének meghatározása az alkalmazott cement fajtájának függvényében.

A könnyűbetonok esetén igen fontos tényező az ún. **belső utókezelő hatás**, ami csökkenti a beton száradásának ütemét, ezáltal befolyással van a száradási zsugorodás volumenére, és csökken az elszívott víz miatt a v/c tényező is, ami növeli a cementkő szilárdságát. Ez a hatás nagyban függ a könnyű adalékanyag vízfelvételétől, azaz a víz által átjárható nyitott pórusrendszerétől. Értekezésemben arra is keresem a választ, hogy ez az utókezelő hatás milyen módon és milyen mértékben képes csökkenteni a könnyűbetonok repedésérzékenységét.

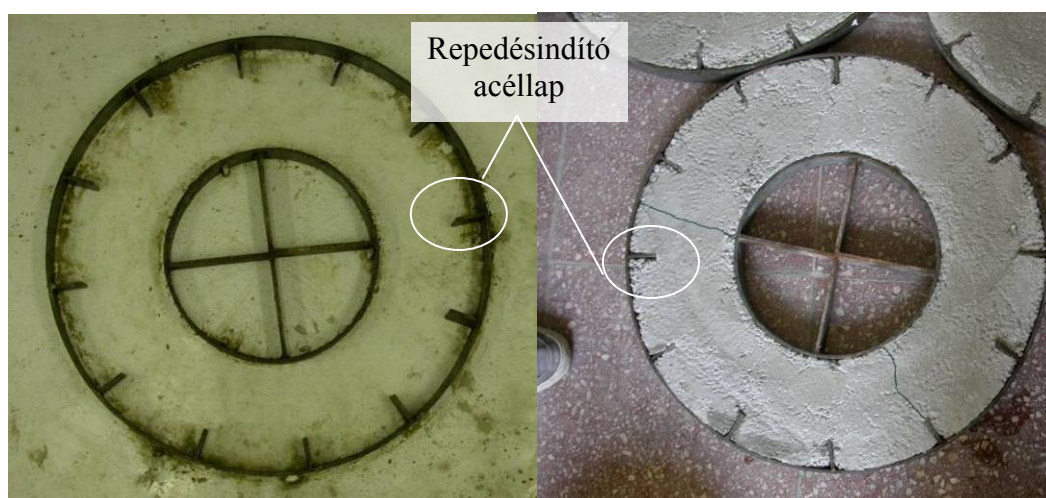
A szálerősítésű betonok esetén a legfontosabb betontechnológiai paraméter a **szálfajta** kiválasztása és **adagolása**. Kutatásaim során több fajta, betonokhoz gyártott, vékony és rövid szálegeometriával rendelkező, üveg, illetve műanyag szálat vizsgáltam, nem foglalkoztam azonban az acél szálerősítések hatásával. A különböző szálfajták összehasonlításának eredményei segítséget nyújtanak a száltípus, illetve a száladagolás helyes megválasztásában.

A repedésérzékenység számos beton esetén kiemelkedő fontosságú szempont a tervezéskor (látszóbetonok, víztározók, víztornyok, folyadék, ill. gáztározók, vízzáró betonok, egyéb vízepítési műtárgyak, zárófödémek stb. esetén). Ezeknél a betonoknál meghatározó kérdés a **cement** helyes megválasztása a betontechnológia tervezésekor, amihez segítséget nyújtanak a kutatás eredményei.

3. A KUTATÁS MÓDSZERE

A repedésérzékenységi kísérletekhez olyan betonkeverékeket állítottam össze, amelyek zsugorodása jelentős a szilárdulás korai (3 napos) szakaszában, így pontosabban össze lehet hasonlítani a vizsgált paraméterek hatását. Kiindulásnak egy osztrák műszaki irányelvben [Richtlinie Faserbeton 2002 és 2008] javasolt betonösszetételt tekintettem. Azonos víz-cement tényező esetén a tiszta portlandcement köt leggyorsabban, így várhatóan az ilyen cementtel készült beton zsugorodik a leggyorsabban [Balázs et al. 1979], ezért CEM I 42,5 N jelű cementet használtam (kivéve, amikor a cementfajtákat hasonlítottam össze). A cementadagolás minden keverék esetén 360 kg/m^3 volt, az irányelvben megadott 500 kg/m^3 –es finomrész tartalmat (cementtel együtt) mészköliszt hozzáadásával értem el. A víz-cement tényező 0,61, így a víztartalom 220 l/m^3 volt.

A zsugorodási repedésérzékenységet a [Richtlinie Faserbeton 2002] szerint mértem, keverékenként négy darab, gyűrű alakú próbatesten (3. ábra). A próbatestek alakja nagymértékben elősegíti a repedések kialakulását, de ezen felül még a gyűrűk külső peremének belső oldalára felhegesztett 12 darab $40 \times 40 \text{ mm}$ -es kis acéллеmez is, ami tovább gyengíti a próbatest repedésekkel szembeni ellenállását. A méréseket állandó 20 °C -os hőmérséklet és 65%-os relatív páratartalom biztosítása mellett végeztem, klimatizált szobában. A beton korai zsugorodási repedésérzékenységén a gyűrű alakú próbatesten kialakuló repedések összegzett hosszát, illetve a repedéshosszak \times repedés tágasság értékeinek összegét értem. Kutatásaim során összesen 124 betonkeverék és további 42 cementpép keverék repedésérzékenységét vizsgáltam, ez megközelítőleg 700 db gyűrű és hozzá 1200 db más típusú próbatest készítését és vizsgálatát foglalja magában. Minden betongyűrűn megmértem a kialakult repedések hosszát (a legtöbb sorozat esetén a repedéstágasságot is) a próbatestek mindkét oldalán.



3. ábra Repedésindító acéllappal ellátott sablon és (bepedert) próbatest repedésvizsgálathoz

Mivel azt tapasztaltam, hogy az osztrák műszaki irányelvben előírt 5 órás szélsatornás vizsgálat nem szárította ki teljes keresztmetszetükben a próbatesteket, ezért 1 napos korban további szárításnak vettem alá a gyűrűket szárítoszekrényben, 60 °C-on, további 48 órán keresztül. Fontos különbség volt a szélsatornához képest, hogy itt már a próbatest mindkét szabad oldalán távozhatott a nedvesség és magasabb volt a hőmérséklet, ennek köszönhetően a száradás is intenzívebb volt így újabb repedések keletkeztek a próbatesteken. Az egyes keverékek esetén elvégzett legfontosabb vizsgálatokat az 1. táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat A kutatás során elvégzett lényegesebb vizsgálatok keverékenként

Mért jellemző	Próbatest típusa	Időtartam/kor	Mennyiség/keverék	Módszer
Fajlagos felület	Cementpor	-	3×5-10 g	Blaine-féle légáteresztő-képesség
Nyomószilárdság	Cementhabarc hasáb, 40×40×160 mm	28 naposan	3 db próbatest	Nyomóvizsgálat
Nyomószilárdság	Cementkő hasáb, 40×40×160 mm	2; 7; 28 és 90 naposan	3 db próbatest	Nyomóvizsgálat
Zsugorodás	Cementkő hasáb, 40×40×160 mm	1-180 napig	3 db próbatest	Graf-Kaufmann készülék
Vízfelvétel	Adalékanyag szemhalmaz	0,5 és 24 órásan	0,5 liter	Tömegmérés
Szemcse-testsűrűség	Adalékanyag szemhalmaz	-	0,5 liter	Tömegmérés
Frissbeton testsűrűség	Beton kocka, 150×150×150 mm	15 percesen	3 db próbatest	Tömeg- és térfogatmérés
Konzisztencia	Frissbeton	10 percesen	-	Terülmérés
Nyomószilárdság	Beton kocka, 150×150×150 mm	28 naposan	3 db próbatest	Nyomóvizsgálat
Hajlító-húzószilárdság	Beton hasáb, 70×70×250 mm	1 és 3 naposan	3 db próbatest	Hajlító vizsgálat
Repedésérzékenység	Beton gyűrű, ø600/300×40 mm	5 órán át	4 db próbatest	Szélsatornás vizsgálat
Repedésérzékenység	Beton gyűrű, ø600/300×40 mm	2 napig	4 db próbatest	Száritás 60 °C-on
Repedésérzékenység	Cementpép gyűrű, ø240/160×40 mm	Repedés keletkezéséig	3 db próbatest	Repedési idő mérése

A cementfajták repedésérzékenység vizsgálatánál a változó paraméter a cement típusa volt. 13 cementtípust vizsgáltam, D1-4-el jelöltem a tiszta portlandcementeket, a D5-11-el a CEM II heterogén cementeket, D 12-13-al pedig CEM III heterogén cementeket. A repedésérzékenység mellett a betonok nyomószilárdságát az MSZ 4798-1 szabvány szerint határoztam meg, a hajlító-húzószilárdság vizsgálatához 0,45 és 0,55-ös v/c tényezővel készítettem és vizsgáltam betonhasábokat. Azonos cementekkel készített habarc, illetve cementpép keverékeken (0,34 és 0,44 v/c tényezővel) a nyomószilárdságot 2, 7, illetve 28 napos korban vizsgáltam az MSZ EN 196-1:2005 szabvány szerint. A cementpépeken meghatároztam 2 napos korban a korai zsugorodás mértékét is.

A betongyűrűk vizsgálata után a cementpépek repedésérzékenységét a zsugorodásvizsgálatokhoz használt hasábok keresztmetszetével azonos, 40×40 mm-es keresztmetszetű, 240 mm külső és 160 mm-es belső átmérőjű, gyűrű alakú próbatesteken mértem. A mérés lényege, hogy a cementpéphez képest nagyságrendekkel merevebb acélmag köré dolgozzuk be a friss cementpépet, ami a kötési és a száradási folyamatok hatására lejátszódó zsugorodás miatt ráfeszül a belső magra. Amennyiben a keletkező húzófeszültségek meghaladják a cementkő pillanatnyi húzószilárdságát, a próbatest jellemzően egy ponton elreped. A repedésérzékenységet a víz hozzáadása és a repedés megjelenése között eltelt idővel jellemeztem. Így a cementtípusok repedésérzékenységét két fajta mérési módszerrel is vizsgáltam.

Kutatásaim során több gyártótól származó, különböző könnyű adalékanyag típust vizsgáltam, és hasonlítottam össze vízfelvétel, szemcse-testsűrűség, illetve halmazsűrűség alapján (2. táblázat). Az adalékanyag jellemzőket az MSZ EN 13055-1:2003 alapján határoztam meg. A változó paraméter a durva adalékanyag (4/8-as frakció) típusa volt, a 0/4-es adalékanyag frakció minden keverék esetén kvarchomok volt.

2. táblázat A könnyűbetonos kísérletek során alkalmazott adalékanyagok főbb műszaki paraméterei

Adalékanyag	Szemcse-testsűrűség [kg/m ³]	Vízfelvétel [m%]	
		0,5 órás	24 órás
Kvarckavics	2670	0	0
Üveghabkavics 1	1320	1,4	1,8
Üveghabkavics 2	290	12	23
Üveghabkavics 3	949	6,1	8,2
Duzzasztott agyagkavics	1247	8	13
Zúzott tégl	1682	17	19
Duzzasztott perlit	220	~200	~200
Polisztirol	96	0	0

A szálerősítésű betonok esetén a szálakat szárazon adagoltam a keverékhez, majd egy perces keverés után adtam hozzá a vizet. A változó paraméter a vizsgált szálak mennyisége, valamint típusa volt. A kísérletek során vékony (9÷20 µm átmérőjű) és rövid (5÷35 mm hosszú) műanyag, illetve üveg alapanyagból készített szálakat hasonlítottam össze. A szálak húzószilárdsága a fiatal betonhoz képest nagy, ezért képesek felvenni a zsugorodás által okozott húzófeszültségeket. A szálak rugalmassági modulusa is széles tartományban mozog, az üvegszálaké 70 000 N/mm², míg a műanyag szálaké jóval kisebb: 1000 vagy 7000 N/mm².

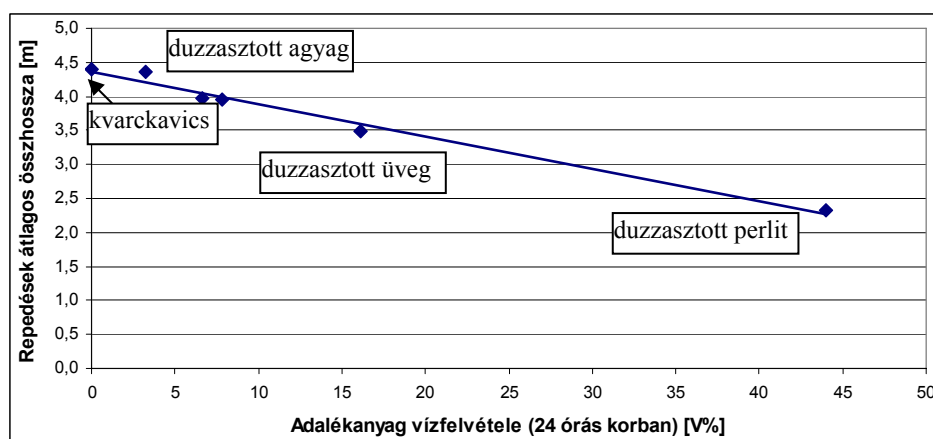
4. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új tudományos megállapításokat, a nem vastagon szedetttek azok bevezetését, illetve értelmezését adják.

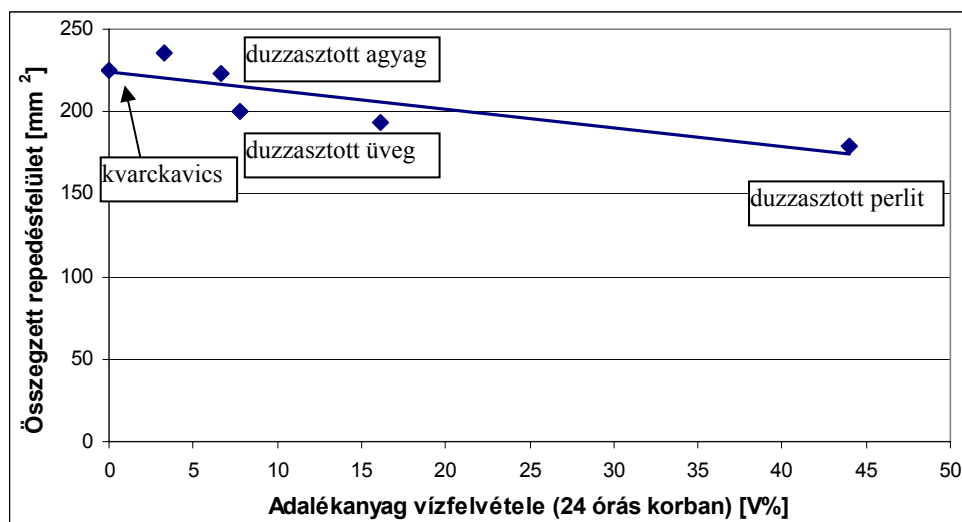
1. tézis: Könnyűbetonok repedésérzékenysége [1, 3, 6]

A könnyűbetonok száradási zsugorodása az alkalmazott könnyű adalékanyag vízfelvételeinek növekedtével arányosan csökken a belső utókezelő hatás miatt. A pép tényleges v/c tényezője pedig kisebb az adalékanyag vízfelvétele miatt.

Kísérletileg igazoltam, hogy duzzasztott üveg, duzzasztott agyag, duzzasztott perlit és kvarckavics adalékanyagok 24 órás, térfogatszázalékban megadott vízfelvétele és a belőlük készített könnyűbetonok korai zsugorodási repedésérzékenysége közti összefüggés lineárisnak tekinthető. Az adalékanyagok vízfelvételeinek növekedtével a betonkeverék repedésérzékenysége csökken (T1-T2. ábra).



T1. ábra Könnyű adalékanyagok 24 órás vízfelvétele és a könnyűbetonok korai zsugorodási repedéseinek összegzett hossza közti összefüggés a szélsatornás és a szárítószekrényes vizsgálat után (minden pont 4 mérési eredmény átlaga)

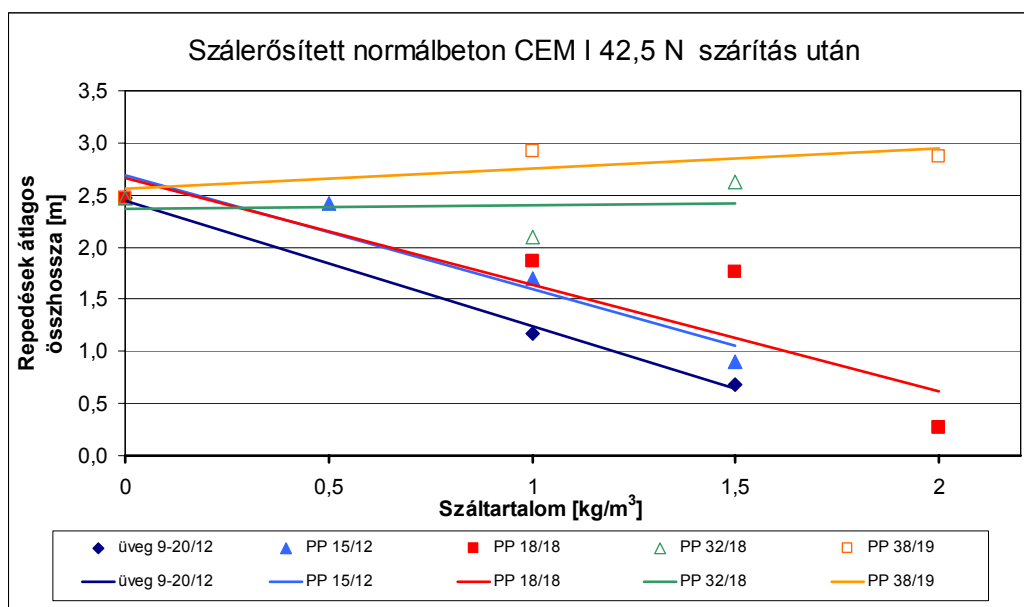


T2. ábra Könnyű adalékanyagok 24 órás vízfelvétele és a könnyűbetonok korai zsugorodási repedéseinek hossza × tágassága = összegzett repedésfelület közti összefüggés a szélsatornás és a szárítószekrényes vizsgálat után (minden pont 4 mérési eredmény átlaga)

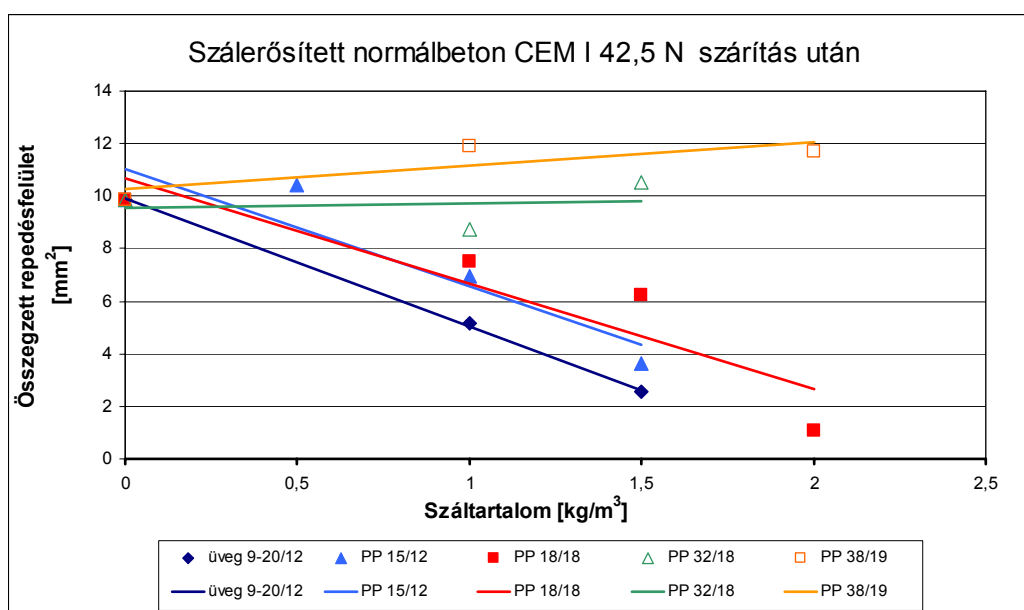
2. téziscsoport: Szálerősítésű betonok repedésérzékenysége

2.1. tézis [2, 5, 9, 15]

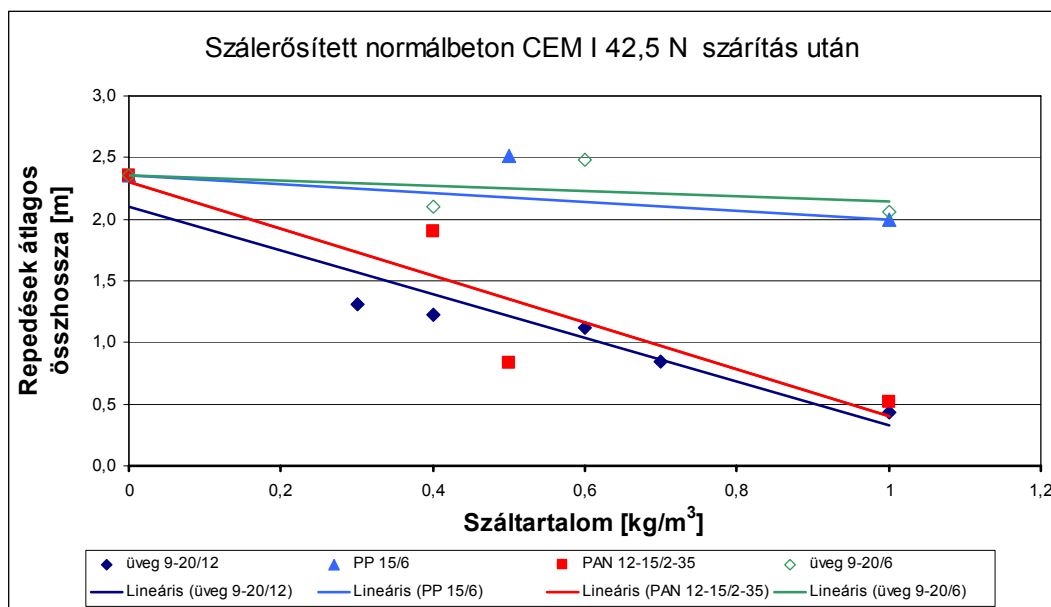
A kis átmérőjű és rövid műanyag, illetve üveg szálak hatékonyan képesek csökkenteni a beton korai zsugorodási repedésérzékenységét, köszönhetően a szilárduló betonhoz viszonyított nagy húzószilárdságuknak és a nagy fajlagos tapadási felületnek. **Kísérletileg igazoltam, hogy a szálerősítésű betonok száltartalma (0÷1,5 kg/m³ között) és a korai zsugorodási repedésérzékenysége közti összefüggés lineárisnak tekinthető kis átmérőjű (9÷20 µm) és rövid (5÷35 mm hosszú) műanyag, illetve üveg szálak esetén (T3-5. ábra).**



T3. ábra Szálerősítésű betonok száltartalma és korai zsugorodási repedésérzékenysége (összegzett repedéshossz, minden pont 4 mérési eredmény átlaga) közti összefüggés



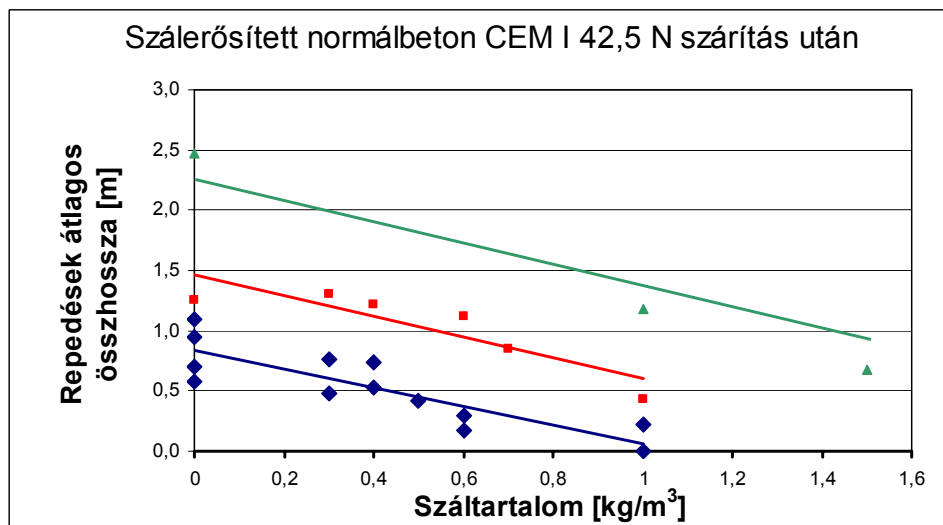
T4. ábra Szálerősítésű betonok száltartalma és korai zsugorodási repedésérzékenysége (repedéshossz × tágasság, minden pont 4 mérési eredmény átlaga) közti összefüggés



T5. ábra Szálerősítésű betonok száltartalma és korai zsugorodási repedésérzékenysége közötti összefüggés (minden pont 4 mérési eredmény átlaga)

2.2. tézis [2, 5, 9, 15]

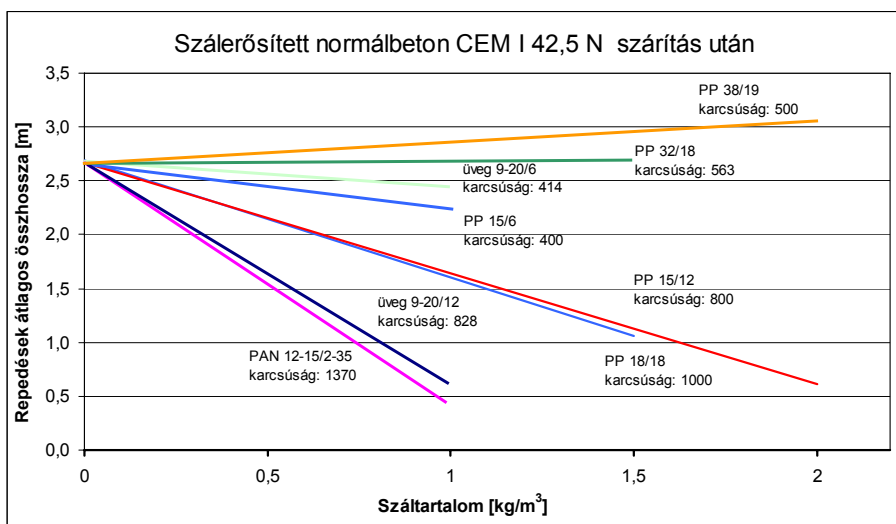
Kísérletileg igazoltam, hogy különböző etalon keverékkel vizsgálva egy adott száltípus esetén a beton korai zsugorodási repedésérzékenysége és száltartalma közti összefüggést a függvény linearitása és meredeksége nem, pusztán a kiindulópontja változik. A száltípusok hatékonyságát az egyenes meredeksége (iránytangense vagy deriváltja) jellemzi (T6. ábra). Ennek oka, hogy megváltoztatva a mérési sorozat etalon keverékét (cementadagolás, finomrésztartalom, adalékanyag szemmegoszlása, cementfajta (örlési finomsága, összetétele, stb.)) megváltozik a sorozatban minden betonkeverék repedésérzékenysége. Ezért nem lehet egy korábbi vizsgálat eredményeivel összehasonlítani egy új, azonos típusú vizsgálat számszerű eredményeit, azonban egy sorozat (több száladagolás) vizsgálatokor már lehetőség nyílik erre.



T6. ábra Üvegszál erősítésű betonok száltartalma és korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) közötti összefüggés különböző repedésérzékenységű etalon (szál nélküli) keverékek esetén

2.3. tézis [2]

Kísérletileg igazoltam, hogy különböző száltípusok korai zsugorodási repedésérzékenységszökkentő hatása függ a száلكarcsúságtól (l/ϕ ; szálhossz [mm] / szálatmérő [μm]). A 800 mm/ μm feletti karcsúságú szálak hatékonyan tudják csökkenteni a beton zsugorodási repedésérzékenységet, míg a 600 mm/ μm alatti karcsúságú szálak nem (T7. ábra, T1. táblázat). A túl rövid, 6 mm-es szálak csak kis hatékonysággal csökkentik a repedések mennyiségét, mert nem képesek felvenni a kialakuló húzófeszültségeket a kis tapadási (lehorgonyzási) hossz miatt. A túl vastag szálak pedig teherbírásuk nagy részét nem képesek kifejteni, mivel a tapadás hamarabb kimerül a beton és a szálak közt, mielőtt a kialakuló húzófeszültségek elérnék a szál húzószilárdságát. A vastag szálak esetén repedésérzékenység növekedést tapasztaltam az adagolás növelésével, amit a beton porozitásának növekedése okozott.



T7. ábra Szálerősítésű betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége alapján számított száthatékonyság és a száلكarcsúság közötti összefüggés

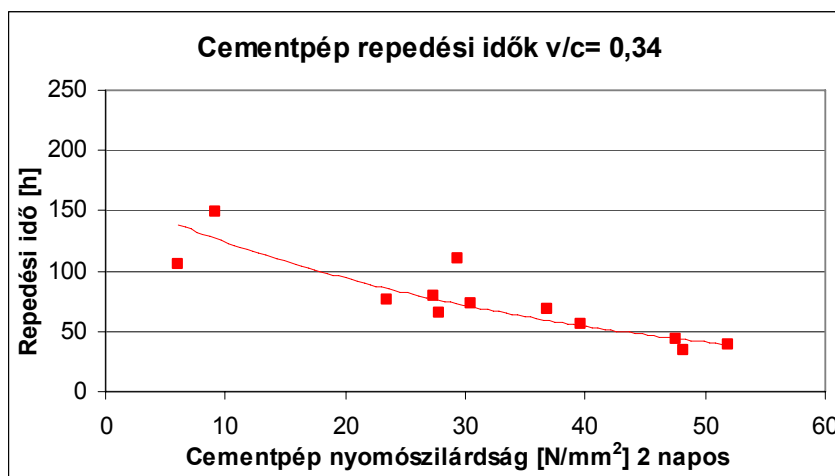
T1. táblázat A kísérletek során alkalmazott szálak főbb műszaki paramétereit és repedés-csökkentő hatását a száلكarcsúság szerint sorba rendezve

Szál típusa	Anyag	Átmérő [μm]	Hossz [mm]	Száلكarcsúság l/ϕ [mm/ μm]	Rugalmassági modulus [N/mm ²]	Húzó- szilárdság [N/mm ²]	Repedéshossz változás a száltartalom növekedésével [m/kg/m ³]
Üveg 9-20/6	E-üveg	9÷20	6	414	70 000	2000	-0,21
PP 15/6	PP	15	6	400	1000	200	-0,36
PP 38/19	PP	38	19	500	1000	400	0,20
PP 32/18	PP	32	18	563	1000	300	0,03
PP 15/12	PP	15	12	800	1000	200	-1,09
Üveg 9-20/12	E-üveg	9÷20	12	828	70 000	2000	-1,77
PP18/18	PP	18	18	1000	1000	200	-1,02
PAN 12-15/2-35	PAN	12÷15	2÷35	1370	7000	400	-1,91

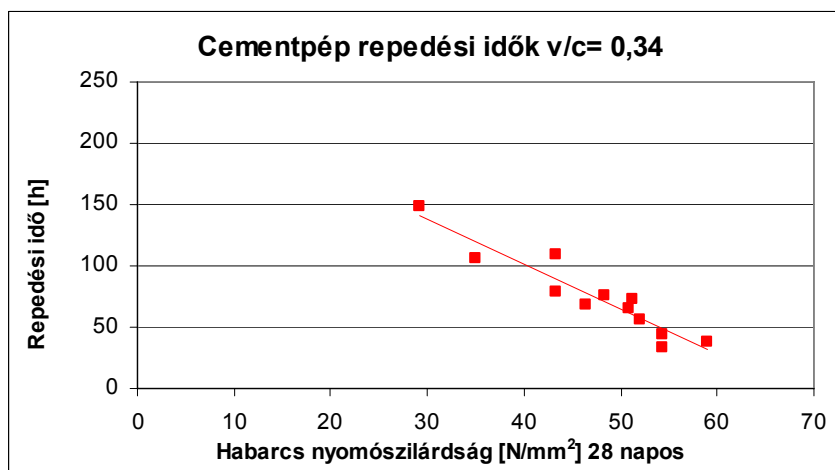
3. téziscsoport: A cementtípus hatása a cementkötésű anyagok repedésérzékenységére

3.1. tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált cementpékek repedési ideje és a cementpékek korai szilárdsági tulajdonságai (2, 7 és 28 napos nyomószilárdsága, az azonos cementtel készített habarcs szabványos nyomószilárdsága) közötti kapcsolat exponenciális függvényekkel írható le, melyek közelítenek a lineáris összefüggéshez (T8-9. ábra). Minél nagyobb a keverék nyomószilárdsága, annál rövidebb a repedési idő, azaz nő a korai zsugorodási repedésérzékenység.



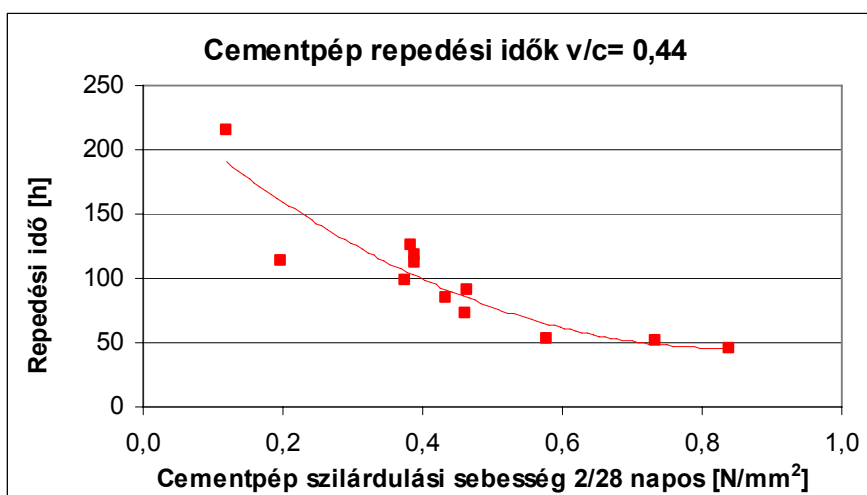
T8. ábra Cementpékek gyűrűs repedési ideje és 2 napos nyomószilárdságának összefüggése (3 db próbatest átlagából számított érték, $v/c = 0,34$)



T9. ábra Cementpékek gyűrűs repedési ideje (3 db próbatest átlagából számított érték, $v/c = 0,34$) és az azonos cementtel készített szabványhabarcsokon mért 28 napos nyomószilárdság összefüggése (3 db próbatest átlagából számított érték, $v/c = 0,50$)

3.2. tézis

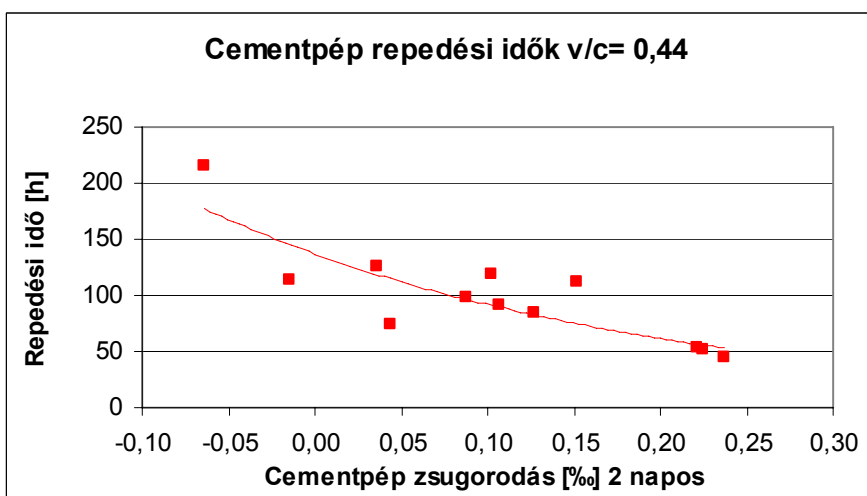
Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált cementpékek repedési ideje és a cementpékek korai szilárdulási sebessége (amit a 2/7 napos; 2/28 napos nyomószilárdságok arányával fejeztem ki) közötti kapcsolat exponenciális függvénnyel írható le, mely közelít a lineáris összefüggéshez (T10. ábra). Minél nagyobb a keverék szilárdulási sebessége, annál rövidebb a repedési idő, azaz nő a korai zsugorodási repedésérzékenység.



T10. ábra Cementpékek gyűrűs repedési idejének összefüggése a 2 napos nyomószilárdság és a 28 napos nyomószilárdság hányadosával (3 db próbatest átlagából számított érték, $w/c = 0,44$)

3.3. tézis

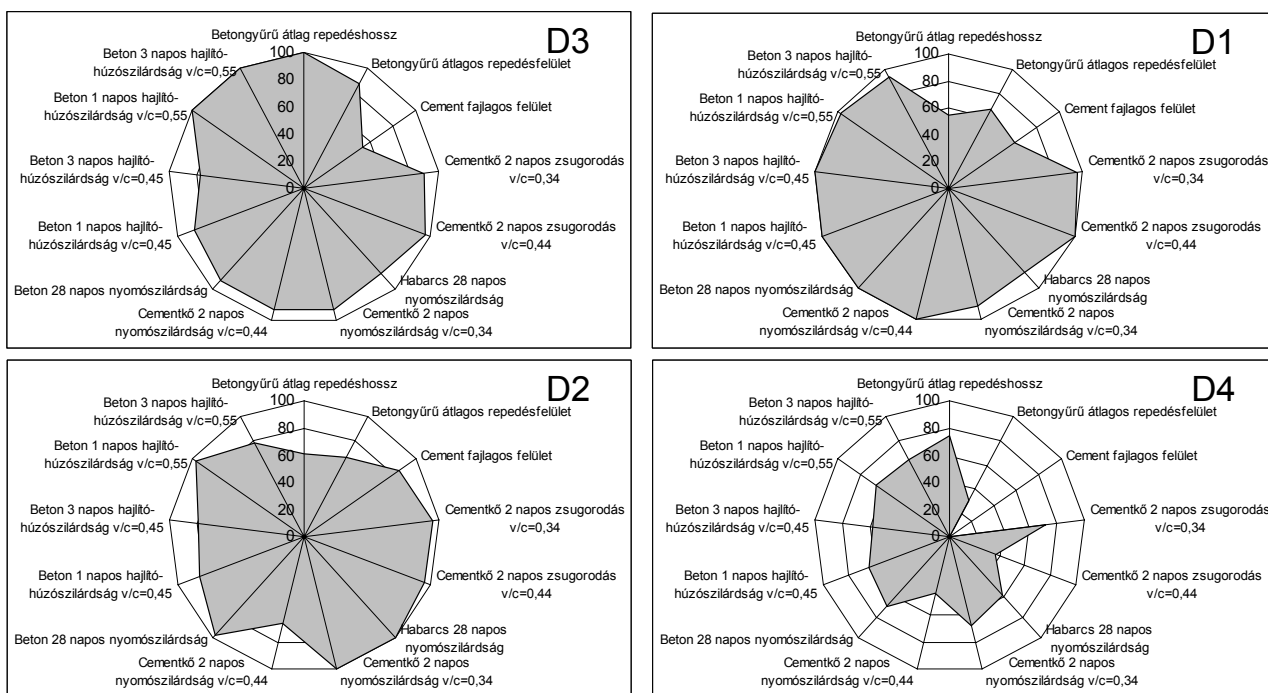
Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált cementpékek repedési ideje és a cementpékek korai zsugorodása (amit cementkő hasábok 2 napos hosszváltozásával jellemeztem) közötti kapcsolat exponenciális függvénnyel írható le, mely közelít a lineáris összefüggéshez (T11. ábra). Minél nagyobb a korai zsugorodás, annál rövidebb a repedési idő, nő a korai zsugorodási repedésérzékenység.



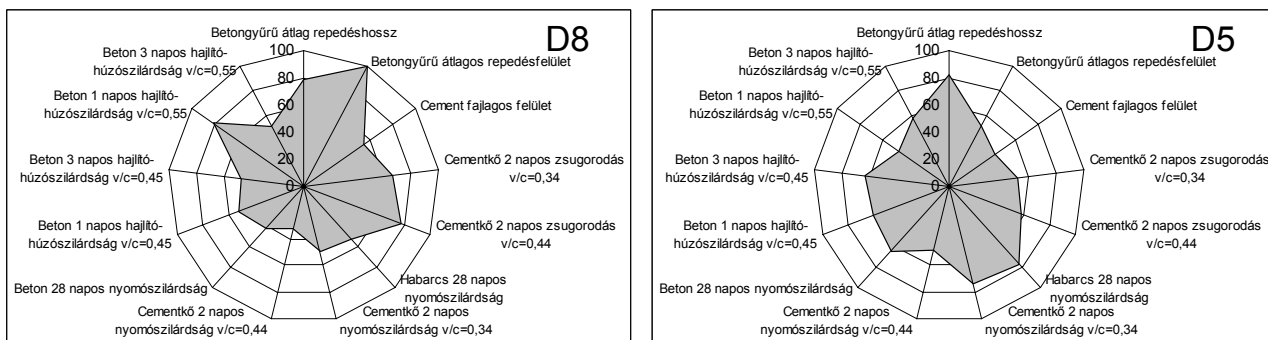
T11. ábra Cementpékek gyűrűs repedési ideje és 2 napos zsugorodásának összefüggése (3 db próbatest átlagából számított érték, $w/c = 0,44$)

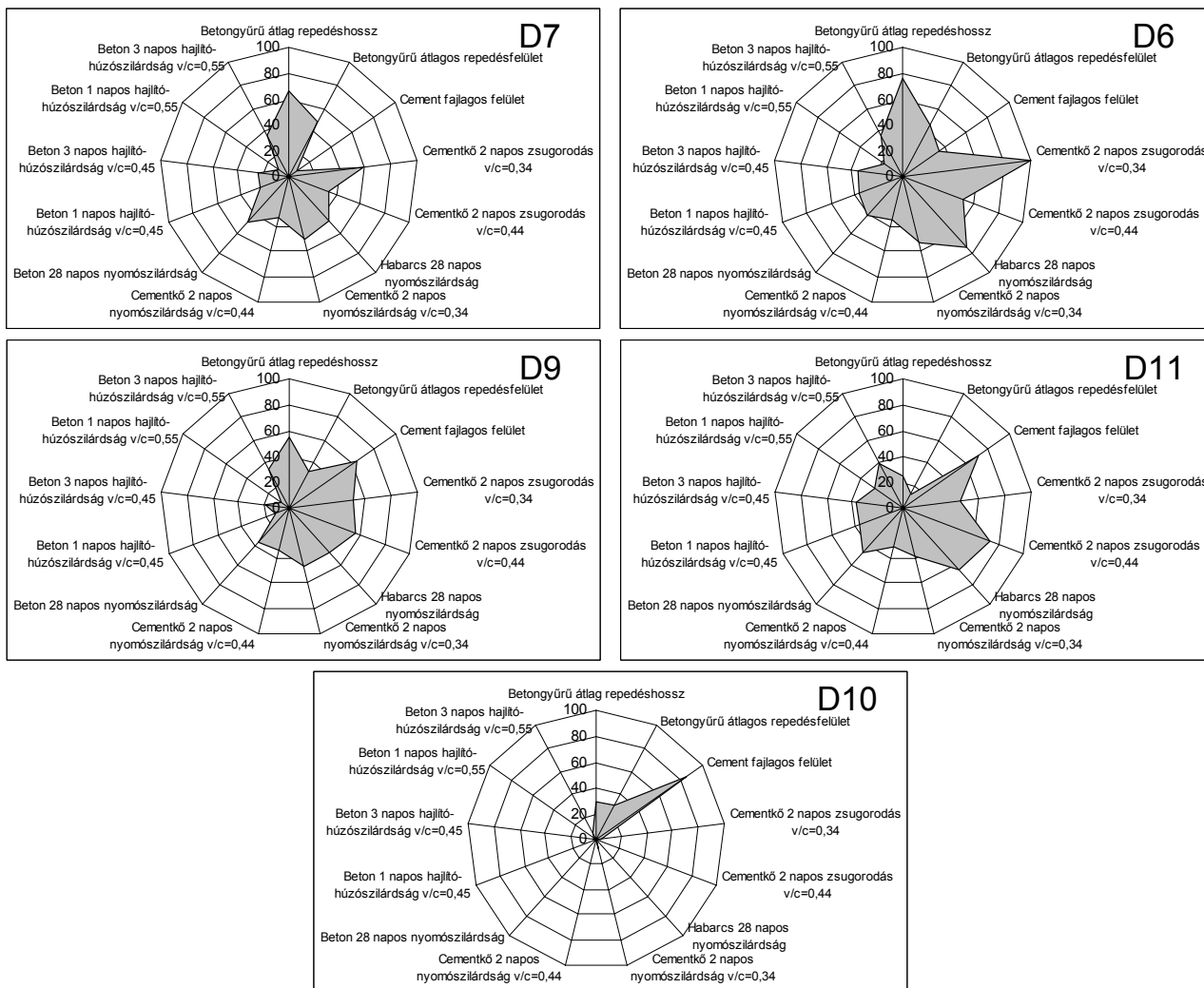
3.4. tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált cementekkel készült közönséges betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége elsősorban a beton korai (1 és 3 napos) hajlító-húzószilárdságától, 28 napos szabványos nyomószilárdságától, az azonos cementtel készített habarcs szabványos nyomószilárdságától, és az azonos cementtel készített cementpép korai (2 napos) nyomószilárdságától függ. Azonos összetételű cementek esetén növeli a repedésérzékenységet, ha nő a cement fajlagos felülete (őrlési finomsága). A betonok repedésérzékenysége szerint sorba rendezve a cementfajtákat a felsorolt paramétereket is feltüntetve a mért tartományon belül százalékos arányban (a legnagyobb előforduló érték jelenti a 100%-ot, a legkisebb a 0%-ot), látható, hogy a repedéshossz és a repedés felület csökkenésével párhuzamosan csökkennek a fent említett paraméterek is (T12-19. ábra). A D1-4 jelű cementek tiszta portlandcementek, a D5-11 jelűek CEM II heterogén cementek, a D 12-13 pedig CEM III heterogén cementek.

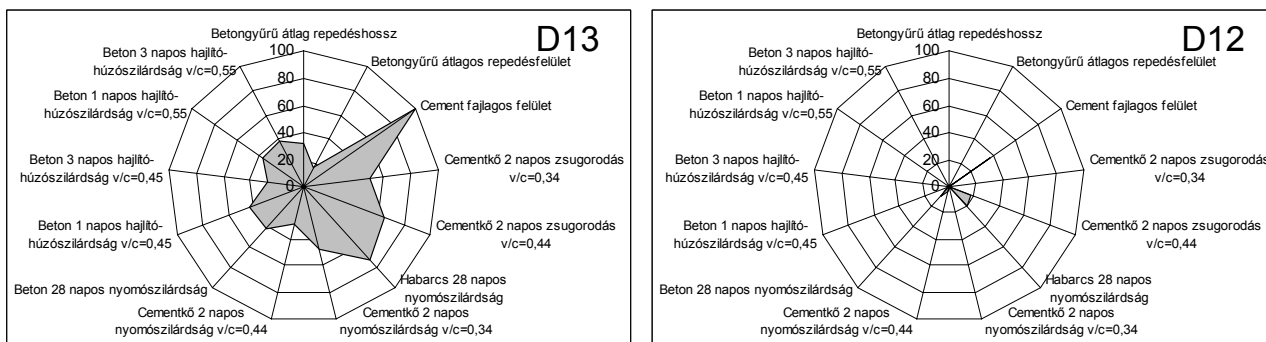


T12. ábra A CEM I tiszta portlandcementek jellemzőinek hatása a beton repedéshosszára és repedésfelületére repedésérzékenység szerint sorba rendezve





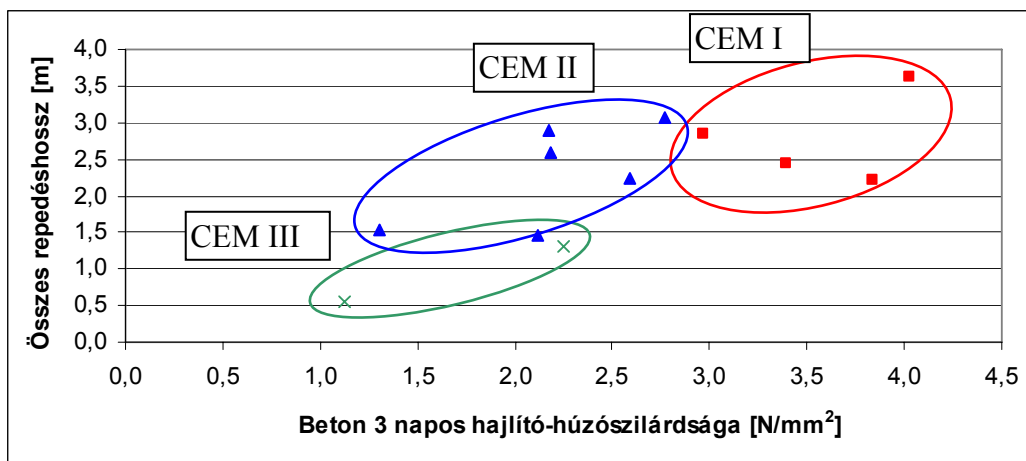
T13. ábra A CEM II heterogén cementek jellemzőinek hatása a beton repedéshosszára és repedésfelületére repedésérzékenység szerint sorba rendezve



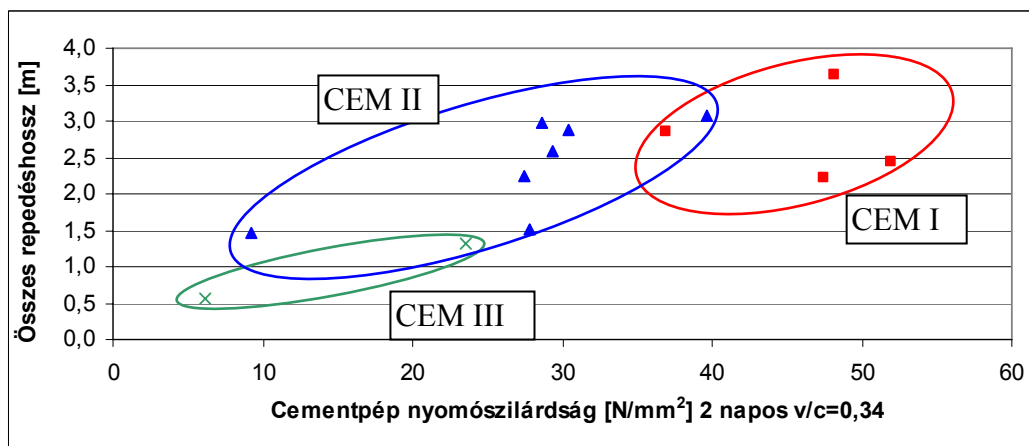
T14. ábra A CEM III heterogén cementek jellemzőinek hatása a beton repedéshosszára és repedésfelületére repedésérzékenység szerint sorba rendezve

3.5. tézis

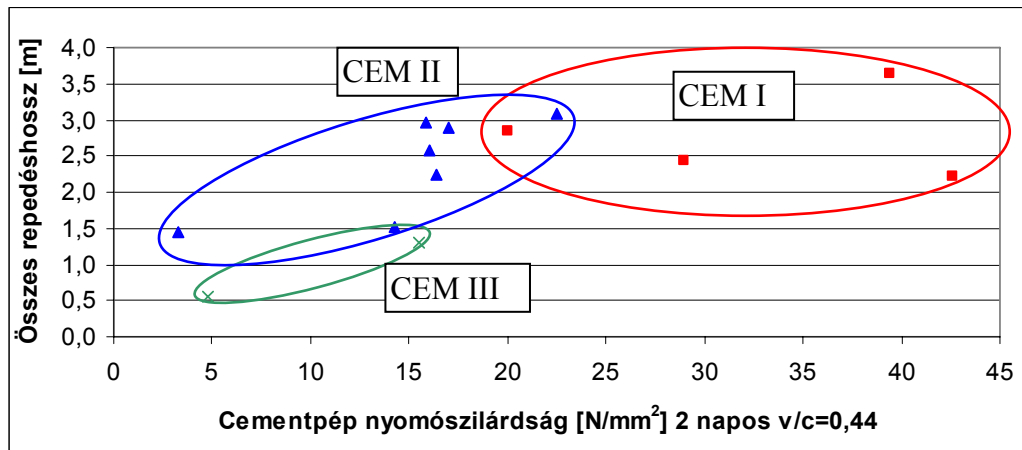
Kísérletileg igazoltam, hogy az általam vizsgált cementekkel készített közönséges betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége függ a cement típusától. A heterogén cementek esetén a nagyobb pernye vagy kohósalak tartalmú cementek kisebb korai zsugorodási repedésérzékenységek (T15-19. ábra). Ha a cementek repedésérzékenységet tekintjük a szilárdságok figyelembevétele nélkül, akkor a nagy pernye vagy kohósalak tartalmú cementek viselkednek a legkedvezőbben azonos fajlagos felület esetén. Ha nő a fajlagos felület, nő a cement repedésérzékenysége is.



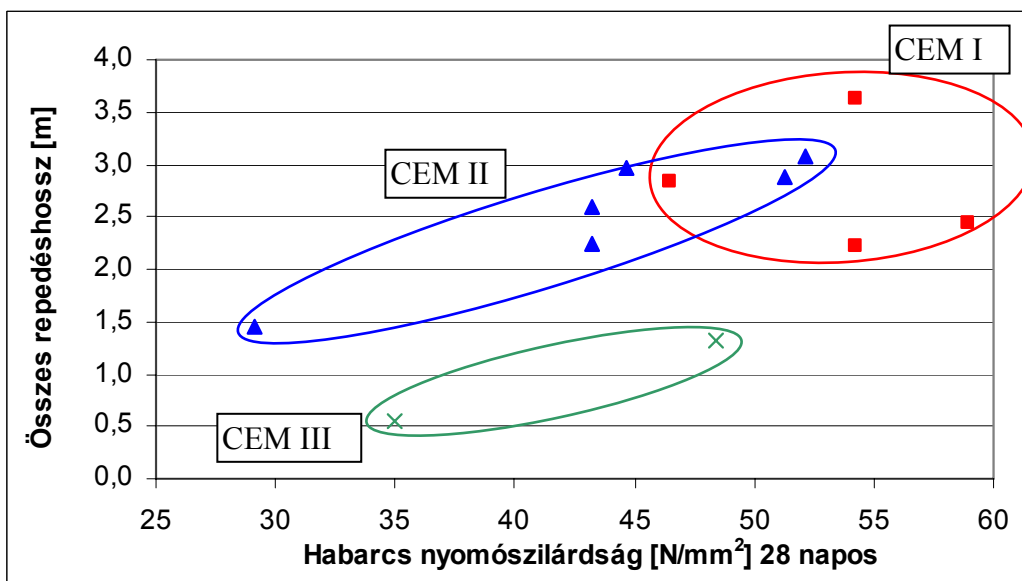
T15. ábra Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) és 3 napos hajlító-húzószilárdsága (minden pont 3 mérési eredmény átlaga, v/c=0,55) közti összefüggés különböző cementek esetén



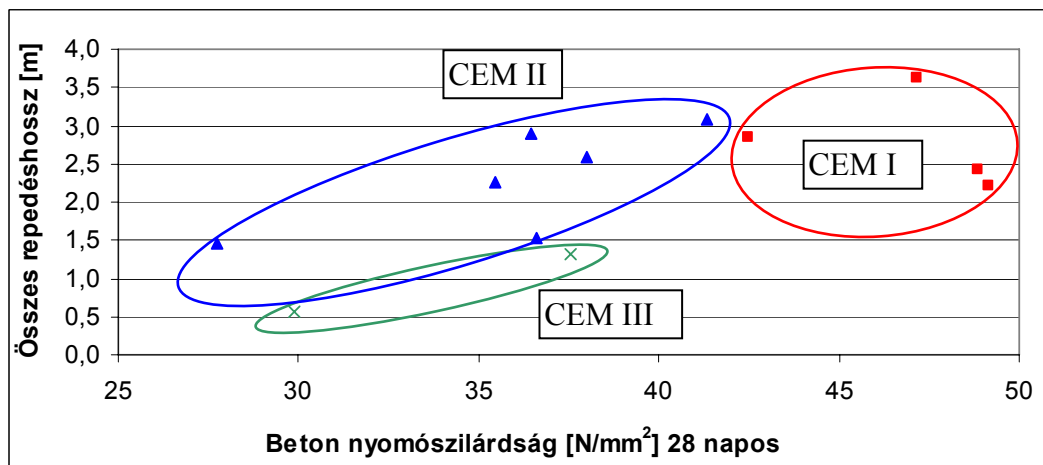
T16. ábra Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) és a cementpép próbatestek 2 napos nyomószilárdsága (minden pont 3 mérési eredmény átlaga, v/c=0,34) közti összefüggés



T17. ábra Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) és a cementpép próbatestek 2 napos nyomószilárdsága (minden pont 3 mérési eredmény átlaga, $v/c=0,44$) közti összefüggés



T18. ábra Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) és a cementek szabványos nyomószilárdsága (minden pont 3 mérési eredmény átlaga, $v/c=0,50$) közti összefüggés



T19. ábra Betonok korai zsugorodási repedésérzékenysége (minden pont 4 mérési eredmény átlaga) és nyomószilárdsága (minden pont 3 mérési eredmény átlaga, $v/c=0,61$) közti összefüggés különböző cementek esetén

5. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI, TOVÁBBI KUTATÁSI KITEKINTÉS

A bemutatott új tudományos eredmények a beton és vasbeton szerkezetek korai zsugorodási repedésérzékenységének, a szerkezeteken kialakuló repedések mennyiségének csökkentését segítik elő. A betonban keletkező repedések jelentősen befolyásolják a beton tartósságát. A mérnök feladata a repedést kiváltó okok ismerete, kiküszöbölése, hatásuk mérséklése. Ez igen sok esetben fontos követelmény, például épületfelújítások során a kisebb önsúly miatt előnyös könnyűbetonból rábetonozást, vagy felbeton réteget készíteni, ezeknél a vékony betonoknál fontos a korai zsugorodási repedésérzékenység vizsgálata és a lehető legkedvezőbb viselkedés elérése.

Kísérleti eredményeim alapján *adalékanyagos könnyűbetonok* esetén, egyszerű módon megbecsülhető a kiválasztott könnyű adalékanyag hatása a keverék repedésérzékenységére a vízfelvétel alapján, ami segíti a repedésmentes könnyűbetonok tervezését. Ez alapján az alkalmazott könnyű adalékanyag kiválasztását is segítik a kimondott tézisek.

Szálerősítésű betonok tervezésekor a hatékony száladagolás meghatározását teszik könnyebbé a bemutatott eredmények. Az alkalmazott kísérleti eljárás alapján könnyen összehasonlítható a különböző szálfajták repedéscsökkentő hatása, illetve a szálak anyaga és geometriája alapján megbecsülhető hatékonyságuk, ami segíti mind a gyártókat, mind pedig a kivitelezőket a megfelelő száltípus kiválasztásában, illetve a hatékony adagolás meghatározásában.

A betontervezés során a *cementfajta* kiválasztása az egyik legmeghatározóbb lépés, ami sok tényezőtől függ (időjárási viszonyok, hőmérséklet, építéstechnológia, szilárdság, alakváltozás, stb.) Az eredmények útmutatást adnak betonok tervezéséhez, segítve a cementek megfelelő kiválasztását repedésérzékenység szempontjából.

Eredményeim hasznos információkat nyújtanak mind a kutatás, mind a gyakorlati alkalmazás területén. Kiszámú további kísérlettel hasonló összefüggések állíthatók fel, illetve a megállapítások egy része adaptálható bizonyos megkötések mellett más könnyű adalékanyag, cement vagy száltípus alkalmazása esetén is. A jövőben új kutatási területek jelölhetőek ki a témán belül. A további kutatások során a cementek korai zsugorodási repedésérzékenységét fogom vizsgálni az őrlési finomság tükrében, azonos klinkerből őrölve különböző finomságú cementeket. Érdekes területnek tartom továbbá a hidraulikus pótlékok kutatását, melyet szintén tervezek tanulmányozni több fajta kiegészítő anyagot őrölve azonos klinkerhez.

6. HIVATKOZÁSOK A TÉZISFÜZETBEN

Balázs, Gy., Borján, J., Cary Silva, J., Liptay, A., Zimonyi, Gy. (1979), „A cement repedésérzékenysége” Tudományos közlemények a BME Építőmérnöki kar, Építőanyagok tanszék, 1979 Budapest, HU ISSN 0324-3575

Grube, H. (2003), „Definition der verschiedenen Schwindarten – Beton”, 2003/12 sz. p. 603

Neville, A. M. (1995), „Properties of concrete” 1995, ISBN: 0-582-23070-5

Lägel E, Slowik V, Schmidt M, Schmidt D, (2011), In situ capillary pressure measurement for preventing plastic shrinkage cracking, Proc. fib Symposium (Ed.: Sruma V.) 2011, Prague, pp. 349-352. ISBN: 978-80-87158-29-6

Szabványok:

EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, 2000

MSZ EN 13055-1:2003 Lightweight aggregates. Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout 2003

MSZ EN 196-1:2005: Cementvizsgáló módszerek. 1. rész: A szilárdság meghatározása

MSZ 4798-1 Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon 2004

Richtlinie Faserbeton 2002, március, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 63 p.

Richtlinie Faserbeton 2008, július, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 97 p.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

[1] **Fenyvesi, O.:** „Affect of lightweight aggregate to early age cracking in concrete” in Periodica Polytechnica, vol. 55/1, 2011 pp. 63-71., ISSN: 0553-6626, online ISSN 1587-3773

[2] Józsa, Zs., **Fenyvesi, O.** „Early age shrinkage cracking of fibre reinforced concrete” in Concrete Structures vol.11, 2010 pp. 61-66., ISSN: 1419-6441

[3] Nemes, R., **Fenyvesi, O.:** “Early age shrinkage cracking in LWAC” in 6th Central European Congress on Concrete Engineering, Proc. of CCC2010 (eds. Srumova, Z., Sruma, V.), Marianske Lazne, 30. Szeptember – 1. October 2010 pp. 79-88. ISBN: 978-80-87158-26-5

[4] **Fenyvesi, O.**, Szabó, K. Zs., Józsa, Zs. „Swelling-shrinking properties of cement and polymer based adhesives” in 4th Central European Congress on Concrete Engineering, CCC2008 (eds. Radic, J., Bleiziffer, J.), Opatija, 2-3. October 2008 pp. 577-583. ISBN: 978-953-7621-01-8

[5] **Fenyvesi, O.** „Early Age Shrinkage Cracking of Fibre Reinforced Lightweight Aggregate Concrete” Proc. of 6th International PhD Symposium in Civil Engineering (Eds. T. Vogel, N. Mojsilovic, P. Marti), Zürich 23-26 August, 2006 pp. 1-8.

- [6] Józsa, Zs., **Fenyvesi, O.** „Könnyű adalékanyagok belső utókezelő hatása a könnyűbetonok korai zsugorodási repedésérzékenységre” in XV. Nemzetközi Építéstudományi konferencia, kiad., (szerk.: Köllő, G.), Csíksomlyó 2011. június 2-5. pp. 124-131. ISSN:1843-2123
- [7] Józsa, Zs., **Fenyvesi, O.** „Kis zsugorodású beton” in XII. Nemzetközi Építéstudományi konferencia, kiad. (szerk.: Köllő, G.), Csíksomlyó 2008. június 12-15. pp. 89-93. ISSN:1843-2123
- [8] **Fenyvesi, O.** „A beton repedésérzékenységről” in X. Nemzetközi Építéstudományi konferencia, kiad. (szerk.: Köllő, G.), Csíksomlyó 2006. június 14-16. pp. 93-98. ISBN:(10) 973-7840-13-5
- [9] **Fenyvesi, O.** „Különböző szálakkal készített FRC korai repedésvizsgálata” in Doktori kutatások a BME Építőmérnöki Karán, (szerk.: Barna, Zs.), 2007. november 14. pp. 39-46. ISBN: 978-963-421-449-6
- [10] **Fenyvesi, O.** „Szálerősítésű könnyűbetonok zsugorodási repedései” in Doktori kutatások a BME Építőmérnöki Karán, (szerk.: Barna, Zs.), 2006. február 28. pp. 29-34. ISBN:963-421-582-3
- [11] Józsa, Zs., Nemes, R., **Fenyvesi, O.**, Lublós, É., Fischer, N., Czuppon, G. „Könnyűbetonok tartóssága” in Betonszerkezetek tartóssága konferencia (szerk.: Balázs, Gy., Balázs, L. Gy.) 2008. június 23. pp. 237-256. ISBN:978-963-420-954-6
- [12] Erdélyi, A., Csányi, E., Kopecskó, K., Borosnyói, A., **Fenyvesi, O.** „Deterioration of steel fibre reinforced concrete by freeze-thaw and de-icing salts” in Concrete Structures vol.9, 2008, pp. 33-44., ISSN: 1419-6441
- [13] Erdélyi, A., Csányi, E., Kopecskó, K., Borosnyói, A., **Fenyvesi, O.** „Acélszálás betonok tönkremenetele: fagyasztás-olvasztás és sózás 2. Állapotromlás, az eredmények értékelése, következtetések” in Vasbetonépítés folyóirat 2007/3 IX. évfolyam, 3. szám, pp. 72-83. ISSN:1419-6441
- [14] Erdélyi, A., Csányi, E., Kopecskó, K., Borosnyói, A., **Fenyvesi, O.** „Acélszálás betonok tönkremenetele: fagyasztás-olvasztás és sózás 1. tudományos háttér, módszerek összehasonlítása” in Vasbetonépítés folyóirat 2007/2 IX. évfolyam, 2. szám, pp. 45-55. ISSN:1419-6441

Az értekezés témakörében elhangzott előadásaim (kiadvány nélkül)

- [15] Józsa, Zs., **Fenyvesi, O.** „Repedéscsökkentés lehetőségei műanyag- és üvegszállal” - Szálbeton - Új utakon c. konferencia Budapest, 2010. márc. 31.
- [16] **Fenyvesi, O.** „Közönséges betonok zsugorodása és zsugorodási repedései” - SZTE Beton Szakosztály klubnap Budapest, 2010. febr. 24.
- [17] **Fenyvesi, O.** „Szálerősítés anyagának hatása az FRC betonok száradási zsugorodására” - PhD hallgatók anyagtudományi napja VII. Veszprém, 2007. november 28.
- [18] **Fenyvesi, O.** „Könnyűbetonok repedésvizsgálata a Faserbeton Richtlinie 2002 alapján” - PhD hallgatók anyagtudományi napja VI. Veszprém, 2006. november 14.