

Betonkeverékek egyszerűsített alapmodellje és alkalmazása

5. rész: Konzisztenciát befolyásoló

tényezők

PEKÁR GYULA
gypekar@emi.hu

A gyártói megfigyelések során a konzisztenciára vonatkozóan is számos érdekes kérdés merült fel. Véleményem szerint igazán értékelhető adathalmazt éppen a gyártói megfigyelésekben (illetve a transzportbeton kiszállítási helyszínein) végzett vizsgálatokkal nyerhetünk. Mindazonáltal a statisztikai jellemzők a konzisztencia tekintetében korántsem igazolnak olyan szoros kapcsolatot, mint a szilárdság vagy az alakváltozás esetén, ezért a kellő óvatosság indokolt, bár az óvatosság sosem jelentheti azt, hogy legyintve mondjunk le bizonyos következtetésekről.

1. Rövid szakirodalmi áttekintés

A frissbeton konzisztenciáját befolyásoló tényezők ismerete a bedolgozhatóság tudatos tervezése miatt fontos, ezért már nagyon régóta kutatják. Alexanderson munkássága számomra azért érdekes, mert ő a pépes (habarcsos) keverékektől egészen a betonkeverékekig, tehát igen széles skálán vizsgálta, hogy azonos (osztályú) konzisztencia milyen összetételi feltételek mellett biztosítható [1]. Az általa publikált diagramok (26., 27. ábra) azt fejezik ki, hogy ismert konzisztenciájú adott cementpéphez száraz adalékanyagot adva, a konzisztencia csak abban az esetben maradhat állandó, ha egyúttal a víz-cement tényezőt megváltoztatjuk. A betonban lévő adalék-

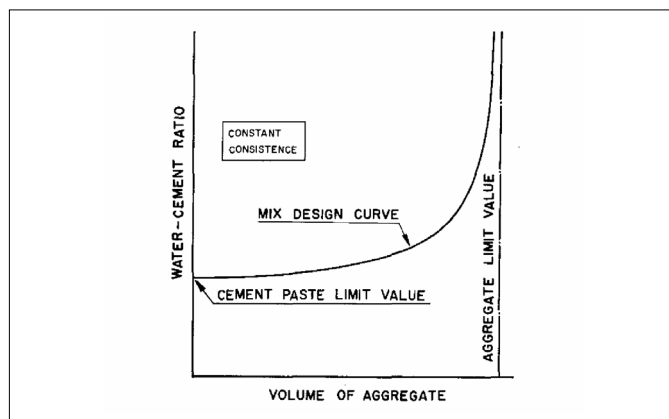
anyag térfogatarányát azonban csak egy bizonyos, a konzisztenciától is függő felső határig lehet növelni, nagyjából a 27. ábra szerint. Alexanderson érdeme, hogy már figyelembe veszi a pépek levegőtartalmának (légbuborék-képző adalékszerek!) konzisztenciára gyakorolt hatását, sőt, számol is velük.

Hazánkban Dr. Ujhelyi munkássága a konzisztencia tervezésében is kiemelkedő: 1989. évi doktori értekezése [2] nem csupán alapos összefoglalását adja az addig ismert vízigénybecslő módszereknek, de a szerző maga is módszert dolgozott ki a konzisztenciától függő vízigény számítására. A módszer jól alkalmazható az adalékszer nélküli keverékek konzisz-

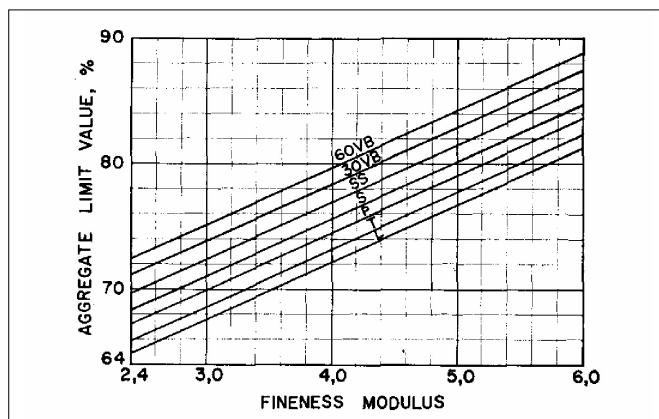
tenciájának tervezésére; becslóformuláiban az adalékanyag vízigénye a finomsági modulustól, a cement vízigénye pedig a fajlagos felülettől függ. Ez utóbbi már az ún. „felületszemléletet” is előrevetíti: észre kell venni ugyanis, hogy a betonkeverékbe nem csak a halmazos szilárd fázisú alkotók tömegeit / térfogatait, de azok felületeit is bevisszük, és ezek a felületek bizonyos hatásokat idéz(het)nek elő a beton tulajdonságai tekintetében!

A konzisztencia tervezését azonban „megbonyolítja” a nagy fajlagos felületű cementek és a kiegészítőanyagok megjelenése, továbbá az újabb „generációs” – és egyre „különbözőbb” reológiai jelenségeket előidéző – adalékszerek hatása. Ez az oka annak, hogy az utóbbi évtizedben egyre több közlemény foglalkozik a cement-tartalmú keverékek reológiai viselkedésének megfigyelésével. Hazánkban Spráncz Ferenc és társai különböző cementek és adalékszerek adagolásával készült pépek kifolyási idejét és területét vizsgálták, és számszerűsíthető összefüggéseket is találtak a reológiai jellemzők és az összetételi jellemzők között [3] [4]. Munkájuk tudatosan a pépek vizsgálatára irányult, hiszen (ahogyan Alexanderson is felismerte), a beton reológiai viselkedését nagymértékben a pép tulajdonságai határozzák meg. Vizsgálataik forrásértékűek, ezért úgy sejttem, hogy sokáig akad még „bogarászni” való az adataik között...

A jövőbeni hazai kutatások tekintetében ötletadó lehet Z. Toutou és N.



26. ábra Az azonos konzisztencia biztosításához szükséges v/c-tényező változása a betonban lévő adalékanyag térfogatarányának függvényében, Alexanderson szerint



27. ábra Az adalékanyag bedolgozható maximális térfogatarányának függése a finomsági modulustól, különböző konzisztencia-osztályok esetén (A svéd jelölések „fentről lefelé” nagyjából az „AFN”, „F”-osztályok közötti skálának felelnek meg.)

Roussel beszámolója [5]. A szerzők a betonalkotók reológiai viselkedését négy lépcsőben vizsgálták: először szuszpenzió (víz + szilikapor), másodszor pépen (víz + szilikapor + cement), harmadszor habarcsón (víz + szilikapor + cement + homok), végül negyedszer betonon is (víz + szilikapor + cement + homok + kavics). A négy típus keverékeinek mindegyikében vizsgálták a reológiai jellemzőket, és érdekes adatokat közölnek a nyírófeszültség (shear stress) és a nyírási sebesség (shear rate) közötti, valamint a folyási nyíró-határfeszültség (yield stress) és a halmazos szilárd fázisú alkotók térfogatarányai közötti összefüggésekről. Ezt a kutatási irányt hazánkban is érdemes volna elindítani; nem igényelne elviselhetetlen költségeket, annál több szisztematikus és kitartó munkát. A hozadék viszont a beton bedolgozhatóságának megbízhatóbb tervezése lenne, különösen a reológiai szempontból mindig „érzékeny” NT-betonok esetén.

2. A konzisztenciára ható tényezők a betonkeverékek egyszerűsített alapmodellje szerint

Az egyszerűsített alapmodellben a konzisztencia és a frissbeton reológiai jellemzői tekintetében is elemzés tárgya a betonösszetéti állapotjelzők hatása (p : péparány a betonban, x : folyadék térfogataránya a pépporhoz képest, χ_c : cement térfogataránya a pépporban, λ_{AD} : adalékszer térfogataránya a pépporhoz képest, l : levegő térfogataránya a betonban), de a betonalkotók fizikai jellemzőit is mindig tekintetbe kell venni. Például ilyen fontos hatótényező a betonalkotó halmazos szilárd fázis (pépporok és adalékszemek) térfogati fajlagos felülete, amelyet a cikksorozat 4. részében [6] is említett módon, lényegében a Dr. Kausay által ismertetett eljárás szerint [7] számolunk, azzal az eltéréssel, hogy alapesetben a szemeket nem gömb formájúnak, hanem ellipszoid alakúnak tekintjük. A betonkeverékbe vitt felületméretek szerepe már csak azért is egyértelmű, mert a beton „folyása” során a halmazos szilárd szemek a felületeiken keresztül

lépnek kölcsönhatásba egymással, valamint a diszperziós közeg szerepét játszó folyadékkal (vízzel, amely esetleg adalékszer is tartalmaz).

Mindezek mellett még azt is érdemes átgondolni, hogy reológiai szempontból a beton voltaképpen egy „önhasonló” (fraktálszerű) összetett rendszer, ami abban nyilvánul meg, hogy a halmazos szilárd fázisú alkotók különböző léptékű méreteiben a struktúra ismétlődik. A cement + kiegészítő poranyag, mint diszperziós fázis, ugyanazt a szerepet játssza a pépben, mint amit az adalékanyag játszik a betonban. A folyadék is, amely diszperziós közegként viselkedik a pépben, ugyanazt a szerepet játssza, mint a pép a betonban. A pép diszperziós közegként szerepel az adalékanyag, mint diszperziós fázis számára. Az egyetlen lényeges eltérés az említett diszperziós fázisok szemméretei közötti két nagyságrendnyi különbségben rejlik, ám a struktúra a különböző léptékű méretek esetén folytonosan ismétlődik, ami valószínűen a halmazos szilárd fázisú betonalkotók szemméreteinek exponenciális eloszlására vezethető vissza.

Ha a pépalkotó porok felületét vastag folyadékréteg borítja (persze nem annyira, hogy „kivérezzon”), akkor a pép várhatóan jobban folyik ahhoz képest, mint amikor a folyadékréteg vékony bevonatot képez a szemcséken. Ugyanez a nagyobb léptékű mérettartományokra is érvényes: ha az adalékanyag felületét vastag pépréteg fedi (ami kvázi folyadékként szerepel), akkor várhatóan a frissbeton-keverék is jobban fog folyni ahhoz az állapothoz képest, mint amikor az adalékanyagra vékonyabb pép jut. „Folyósság” szempontjából a tiszta pép konzisztenciája számít felső határértéknek (ekkor a „pépvastagság” végtelen), mert amikor a péphez halmazos szilárd fázisú anyagot adagolunk (legyen az adalékanyag és vagy péppor), akkor a bevitt többlet felület miatt magától értetődően vékonyodni fog a diszperziós fázis szemcséit borító diszperziós közeg vastagsága, ami a keverék folyási tulajdonságainak romlását okozza.

A vízcsökkentő adalékszer ($\lambda_{AD} > 0$) hatását – a fenti gondolatmenetet követve – úgy is értelmezhetjük, hogy a diszperziós fázis szemcséinek minden mérettartományában „levékonyítja” a diszperziós közeg azon vastagságait, amelyek egy adott konzisztencia eléréséhez az adalékszer nélküli keverékeknél (volnának) szükségesek. A jelen cikksorozat 2. részében [8] ismertetett gyártóüzemi megfigyelések esetében vizsgált 132 db „KK”-konzisztenciájú betonkeveréknél (amelyből 72 adalékszer nélkül, 60 pedig valamilyen vízcsökkentő hatású adalékszerrel készült) az adalékanyag $\varnothing 0,063\text{--}32$ mm közötti mérettartományára jutó pép (mint diszperziós közeg) átlagvastagsága a betonadalékszeres keverékeknél szignifikáns módon néhány μm -rel vékonyabb volt az adalékszer nélküli alcsoportéhoz képest. Ez a csekélynek tűnő „pépvékonyító hatás” azonban 1 m^3 -nyi keveréként – az adalékváztól függően – $10\text{--}30$ l közötti pépmegtakarítást jelenthet.

Ha ismerjük a beton strukturális összetételét, akkor a diszperziós fázis egy d méretű szemcséjét bevonó diszperziós közeg vastagságát nagyon egyszerűen számíthatjuk a (37) és (38) összefüggésekből:

$$v_a = \frac{1}{2} \cdot d_a \cdot \left(\left(1 + \frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (37)$$

$$v_z = \frac{1}{2} \cdot d_z \cdot \left((1+x)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (38)$$

ahol

v_a a d_a [mm] átmérőjű adalékanyag-szemcséket borító pép rétegvastagsága [mm]-ben,

v_z a d_z [μm] átmérőjű pépporszemcséket borító folyadék (víz) rétegvastagsága [μm]-ben,

p a betonban lévő pép térfogataránya (betonösszetéti állapotjelző),

a a betonban lévő adalékanyag térfogataránya ($a > 0$),

x a folyadék-péppor térfogatarány.

A fenti összefüggések lényegében azt fejezik ki, hogy a diszperziós közeg vastagsága a diszperziós fázis szemméretével egyenesen arányos, és az arányossági tényező függ a diszperziós

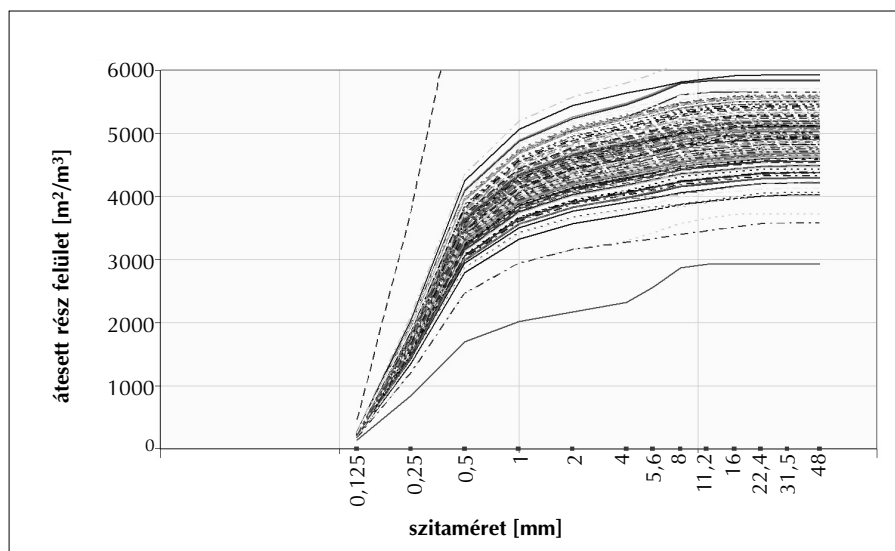
közeg és a diszperziós fázis térfogatarányától. A betontechnológus egyik feladata ezzel kapcsolatban megállapítani azt, hogy konkrét betonalkotók esetén milyen térfogatarányú adagolásokkal kapja meg azt az optimális közegvastagságot a szilárd szemcsék méreteloszlásának függvényében, amely egy adott konzisztencia eléréséhez szükséges.

3. Gyártóüzemi megfigyelések eredményei és azok értékelése

3.1. Általános adatok

A konzisztencia-vizsgálatok a beton keverésének kezdetét követő 15 ± 5 percen belül történtek területméréssel (EN 12350-5). A vizsgálatoknak alávetett keverékek összetételei jellemzői a cikk-sorozat 3. részének 5. táblázatában közöltekhez képest alig változtak [9], bár azóta újabb keverékek adataival frissült az adatbázis. A 11. táblázatban összefoglaljuk az aktuális adatokat.

Az adalékszerekkel készült keverékek betonösszetételei állapotjelzőinek



28. ábra Felhasznált adalékanyag-keverékek felületeloszlásai (2008-2010 között). (Az ábrából „kifutó” egyetlen görbe egy $\sim 12\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ térfogati fajlagos felületű homokhoz tartozik.)

részletesebb adatait a 12. táblázatban közöljük.

A 12. táblázat adataiból azonnal szembetűnő, hogy a keverőtelep túlnyomó többségben EN 206-1 szabvány szerint F2 és F3 konzisztenciájú betonkeverékeket szolgáltat ki, nyilván-

valóan igazodva a megrendelői igényekhez. Külön értekezést igényelne az a gyakorlat, amikor a mindenkori megrendelő már csak „költséghatékonyság” miatt is előszeretettel választja a betonkeverékek „keményebb” (értsd: „olcsóbb”) konzisztenciáját,

		Betonösszetételei (strukturális) állapotjelzők					Egyéb technológiai adatok, információk			
		ρ	x	x_c	λ_{AD}	I	A kiértékelésbe vont adalékszerek*	hagyományos v/c	a^{**}	D_{max} (mm)
Konzisztencia üzemi megfigyelései 2008-2010. 242 megfigyelés	min.	0,153	0,924	0,552	0,000	0,000	"Nagyon erős" folyósító, "Erős" folyósító, 3 db "Közepes" képlékenyítő	0,335	0,652	4
	max.	0,314	3,381	0,977	0,030	0,088		1,218	0,790	32
	átlag	0,255	1,684	0,839	0,009	0,017		0,685	0,728	24
	szórás	0,021	0,301	0,080	0,009	0,014		0,143	0,019	8

11. táblázat Az üzemi megfigyelések során konzisztencia-vizsgálatoknak alávetett keverékek betonösszetételei állapotjelzői és egyéb adatai (* az adalékszerek terméknevezeéseit szándékosan mellőzzük, ** a: a betonkeverékben lévő adalékanyag térfogataránya)

		ρ – pép tf-arány		x – folyadék-por tf-tényező		λ^* – adalékszer dózis a péppor térfogatarányában			Mért területek [mm]		Faktorok a (39) képlethez	
Adalékszer kódneve	Megfigyelések száma	ρ_{min}	ρ_{max}	x_{min}	x_{max}	λ_{min}	$\lambda_{átlag}$	λ_{max}	Ter_{min}	Ter_{max}	$f_{1, AD}$	$f_{2, AD}$
„nincs szer”	113	0,153	0,302	1,254	3,381	0,000	0,000	0,000	300	470	1	1
„nagyon erős”	49	0,220	0,267	1,287	1,675	0,010	0,014	0,025	390	550	14,256	1,004
„erős”	10	0,212	0,314	0,924	1,872	0,008	0,016	0,030	340	590	8,868	1,012
„közepes -1”	28	0,214	0,285	1,076	1,975	0,012	0,020	0,029	380	480	4,529	1,012
„közepes -2”	31	0,217	0,290	1,297	1,876	0,006	0,016	0,028	350	480	4,846	1,017
„közepes -3”	11	0,240	0,263	1,215	1,850	0,012	0,020	0,028	390	480	4,042	1,004

12. táblázat Az adalékszer nélküli és a különböző adalékszerekkel megvalósult keverékek betonösszetételei állapotjelzőinek és konzisztencia mértékszámainak adatai, valamint a (39) képlet $f_{1,AD}$ és $f_{2,AD}$ faktorai

ugyanis jelentős kockázat rejlik a konzisztencia eltarthatósági idejének esetleges nem kellő figyelembe vételében, illetve a beton konzisztenciájához esetleg nem kellően igazodó bedolgozási technológiában.

Az általános adatok ismertetése nem volna teljes, ha nem mutatnám be, hogy milyen határok között változtak a homokos kavics frakciók keverékeinek szemmegoszlásai. A 28. ábrán egyetlen diagramba zsúfolva mutatom be az összes keverék adalékvázának eloszlásgörbéit, amelyeket nem átesett m%-ban, hanem térfogat-egységre számított „átesett felületben” vettem fel. Látható, hogy 0,5 mm-nél nyílik igazán szét az olló, és a betonba „belevitt” térfogati fajlagos felület 4000-6000 m²/m³ között ingadozik. Mindezek nyilvánvalóan nem lényegtelen tényezők a keverékek konzisztenciája szempontjából.

3.2. Konzisztencia függése a

betonösszetéti állapotjelzőktől

A mérési eredmények feldolgozása során először az adalékszer nélküli keverékek adatait elemezve kerestünk összefüggéseket, majd az így nyert alapegyenleteket használtuk fel az adalékszeres összetételek esetében, az adalékszeres hatásait kifejező faktorok számításai során is. Az összes megfigyelt mérési eredményre legjobban illeszkedőnek találtuk a (39) szerinti képletet.

$$Ter [mm] = (1 + f_{1,AD} \cdot \lambda_{AD}) \cdot f_{2,AD} \cdot A \cdot$$

$$\frac{\left(\frac{x}{z}\right)^{n_x}}{\left(1 + \frac{a \cdot f_a}{z \cdot f_z}\right)^{n_f}} \cdot \left(1 + \frac{a}{z}\right)^{n_a} \quad (39)$$

ahol:

Ter a betonkeverék területének becsült várható értéke [mm],

λ_{AD} az adalékszer adagolása (dózisa) a péppor térfogatarányában (betonösszetéti állapotjelző),

$f_{1,AD}$ az adalékszer „dózisfaktora” (a megfigyelt szerekre vett konkrét értékeit lásd 12. táblázatban),

$f_{2,AD}$ az adalékszer anyagára jellemző faktor (a megfigyelt szerekre vett konkrét értékeit lásd 12. táblázatban),

A kísérleti állandó, esetünkben $A=39386,8$,

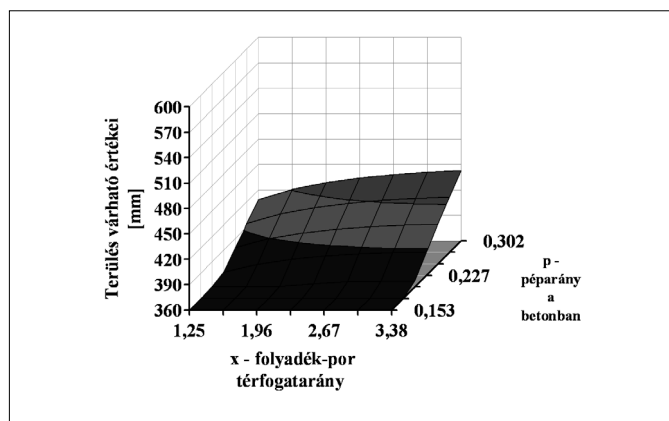
n_x , n_f és n_a kitevők, amelyek értékei a megfigyelések során a következők: $n_x=0,288$, $n_f=1,208$ és $n_a=0,319$,

f_z a péppor térfogati fajlagos felülete [m²/m³],

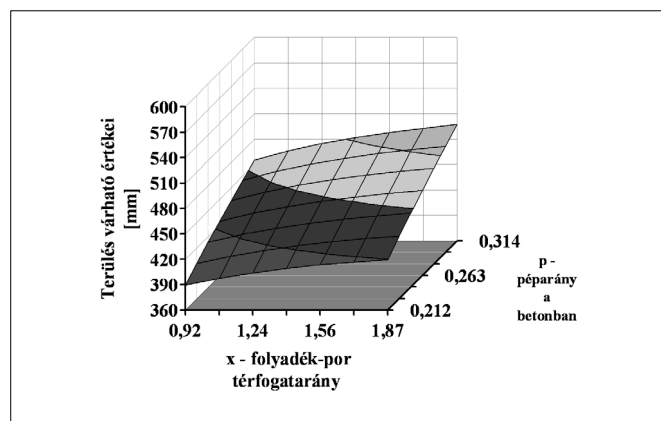
f_a az adalékanyag térfogati fajlagos felülete [m²/m³],

z a péppor térfogataránya a betonban, a többi jelölés megegyezik a (37) és (38) képletekével.

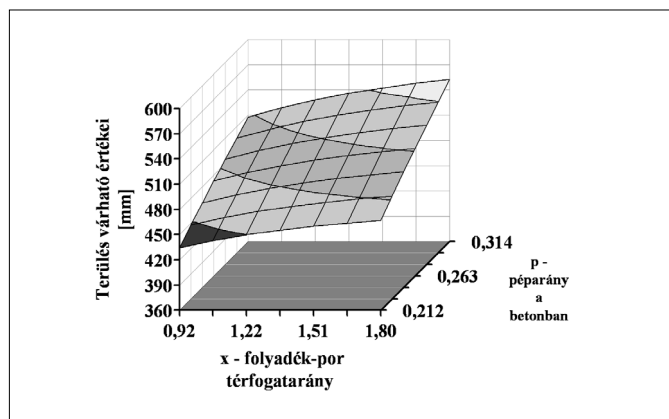
Az összefüggés korrelációja ugyan gyenge ($R^2 \approx 0,29$), ami konzisztencia esetében nem is nagyon meglepő, azonban a képlet szorzótényezőinek



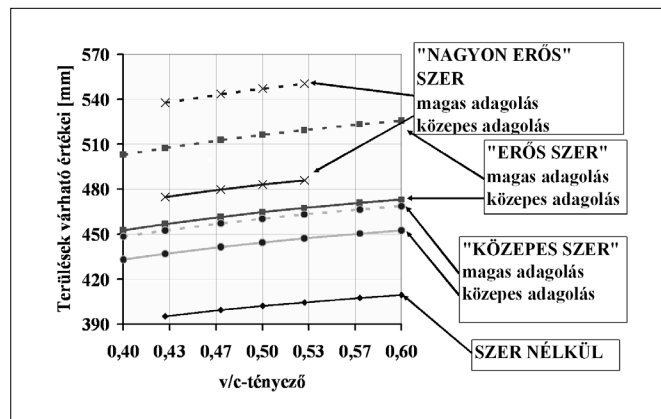
29. ábra Adalékszer nélküli ($\lambda_{AD}=0$) keverékek területének várható értékei a megfigyelt p-x tartományban



30. ábra „ERŐS ADALÉKSZER” közepes ($\lambda_{AD}=0,016$) adagolása mellett elérhető területek várható értékei a megfigyelt p-x tartományban



31. ábra „ERŐS ADALÉKSZER” magas ($\lambda_{AD}=0,030$) adagolása mellett elérhető területek várható értékei a megfigyelt p-x tartományban



32. ábra A különböző adalékszerekkel, és azok nélkül elérhető konzisztenciák az adagolás függvényében 280 liter/m³ péptartalmú, 20 liter/m³ levegőtartalmú, kiegészítőanyagot nem tartalmazó betonkeverékek esetén

szignifikanciája $p=0,06$ valószínűségi szinten igazolt. A becsléssel kapott területi mérték konfidencia-intervalluma 95%-os valószínűségi szinten ± 88 mm, 67%-os valószínűségi szinten ± 36 mm. Az összefüggés érdekessége, hogy $a=0$ esetben (tehát tisztán pép esetén) maximumértéket vesz fel, ezzel megfelel az Alexanderson által megfogalmazott alapelvnek is. Újszerű, hogy figyelembe veszi az adalékszer dózisének (λ_{AD}) hatását, valamint a hatóerejét ($f_{1,AD}$) és annak a fajtája szerinti ($f_{2,AD}$) hatását is. Ez utóbbira az üzemi megfigyelések során 1-hez nagyon közeli értéket kaptunk (lásd 12. táblázat). Adalékszer nélküli esetekben a képlet a csak vizes adagolású keverékek becsült területeit adja, mert ekkor $\lambda_{AD}=0$; $f_{1,AD} = f_{2,AD} = 1$.

A (39) képletből becsült területi mértékeket várható értékeknek kell tekinteni, amelyek a fent megadott konfidencia-intervallumon belül ingadozva bármilyen értéket felvehetnek, a számolt értékek azonban a legvalószínűbben előfordulható értékek.

Az eredmények feldolgozásából származó néhány szemléltető ábrát mutatok be a 29-32. ábrákon.

A 32. ábra egyik érdekessége, hogy

kifejezi, az adott v/c-tartományban és péptartalom mellett a „közepes szer” magas dózis mellett közel azonos teljesítésre lehet képes, mint az „erős szer” – közepes dózis mellett. A szeradagolás egy bizonyos határon belüli növelése lényegesebb hatótényező, mint a v/c-tényező növelése (a „vizezés”)!

4. Összefoglalás

A gyártóüzemi megfigyelések eredményei alapján igazolódni látszik a betonösszetéti állapotjelzők hatása a frissbeton-keverékek konzisztenciájára, de ezzel egyidejűleg a betonkeverékben lévő halmazos szilárd fázisú alkotók térfogati fajlagos felületeinek a szerepe is hangsúlyosan felmerült mind elméleti, mind gyakorlati szinten, amelyek remélhetőleg inspirációt jelentenek majd a téma további alapos kutatására is.

Felhasznált irodalom

- [1] Alexanderson J.: Design of concrete mixes. Materials and Structures, Volume 4, Number 4, July 1971., pp 203-212.
- [2] Ujhelyi J.: A beton struktúrájának és nyomószilárdságának tervezése. Doktori értekezés. Magyar Tudományos Akadémia, 1989. augusztus.
- [3] Spránitz F.: Érdemes-e küszködni az

NT betonokkal? 4. rész - avagy milyen neműek a nagy teljesítőképességű (NT) betonok?, Beton, XVII. évf. 1. szám, 2009. január, pp 3-7.

- [4] Spránitz F.: Érdemes-e küszködni az NT betonokkal? 5. rész - avagy milyen neműek a nagy teljesítőképességű (NT) betonok?, Beton, XVII. évf. 2. szám, 2009. február, pp 3-6.
- [5] Toutou Z.- Roussel N.: Multi Scale Experimental Study of Concrete Rheology: From Water Scale to Gravel Scale. Materials and Structures, Volume 39, Number 2, March 2006., pp 189-199.
- [6] Pekár Gy.: Betonkeverékek egyszerűsített alapmodellje és alkalmazása. 4. rész: Alakváltozást befolyásoló tényezők. Beton, XIX. évf. 4. szám, 2011. április, pp 19-23.
- [7] Kausay T.: Beton adalékanyagok szemmegoszlási jellemzőinek számítása grafoanalitikus módon. Vasbetonépítés, VI. évf. 1. szám, 2004., pp 3-11.
- [8] Augusztin B. - Pekár Gy.: Betonkeverékek egyszerűsített alapmodellje és alkalmazása. 2. rész: Gyártóüzemi megfigyelések. Beton, XIX. évf. 1. szám, 2011. január, pp 8-13.
- [9] Pekár Gy.: Betonkeverékek egyszerűsített alapmodellje és alkalmazása. 3. rész: Nyomószilárdságot befolyásoló tényezők. Beton, XIX. évf. 2. szám, 2011. február, pp 14-18.



www.skalar.hu