ANYAGTUDOMÁNY

Nagyszilárdságú öntömörödő betonok (HSSCC) szilárdulási folyamatai I.

Dr. Salem G. Nehme PhD. – BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Dr. Kovács Imre PhD. – Debreceni Egyetem Műszaki Főiskolai Kar, Építőmérnöki Tanszék

Kovács József BSc. – Debreceni Egyetem Műszaki Főiskolai Kar, Építőmérnöki Tanszék

Hardening process (I) of high-strength self-compacting concretes

The hardening processes of high strength self-compacting concretes are generally described with natural logarithm functions. The aim of this publication is the overall investigation of these processes in order to analyse the impacts of concrete-technological characteristics especially on the graph of the function.

Keywords: self-compacting concrete, high-strength concrete, relative compressive strength, early strength

Kulcsszavak: öntömörödő beton, nagyszilárdságú beton, relatív nyomószilárdság, korai nyomószilárdság

1. Bevezetés

Napjaink betontechnológiája a korszerű adalékszereknek köszönhetően lehetővé teszi az egyre nagyobb teljesítőképességű és tartósságú betonstruktúrák megvalósítását. A nagy korai szilárdságú és több mint 150 N/mm² nyomószilárdságú betonok, valamint a bedolgozás előtt hosszabb időn keresztül stabilizálható betonkeverékek erről meggyőző bizonyítékot nyújtanak. Az elmúlt évtizedben egyre szélesebb körben terjedtek el az öntömörödő és a nagyszilárdságú betonok. Ez a fejlődés világszerte új lehetőségeket biztosít az ipar számára, melyet a nagyszilárdságú és az öntömörödő betonok különleges tulajdonságainak egyesítése jelenthet.

Amennyiben a betontechnológia fejlődésének tendenciáit figyelemmel kísérjük, ráébredünk, hogy a nagy teljesítőképesség és az egyszerű bedolgozhatóság mellett a szilárdulási folyamat az ipar által felhasznált betonokkal szemben támasztott alapvető követelmények közé tartozik. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy mind az előregyártott, mind a helyszíni betonok esetében a nagy korai szilárdság a gyártás, valamint a kivitelezés idejét csökkentheti.

Cikkünk célja a nagyszilárdságú, öntömörödő betonok kivitelezés és gazdaságosság szempontjából meghatározó jelentőségű szilárdulási folyamatainak vizsgálata különböző betontechnológiai paraméterek mellett.

2. Fogalommeghatározás

Az öntömörödő beton zsaluzatba töltésekor szükségtelen a beton bármilyen tömörítése, minden kiegészítő tömörítési energia nélkül, csupán a nehézségi erő hatására üregmentesen kitölti a legösszetettebb zsaluzatot is, önállóan tömörödik, szinte tökéletesen kiegyenlítődik szétosztályozódás és kivérzés nélkül (ha elsősorban a konzisztencia feltétel teljesül). Az öntömörödő beton összetétele a szokványos betonoktól eltérő. Legfontosabb a nagy finomrész tartalom, mely „mint görgős csapágó” működik a betonban (1. ábra).

C: Normál beton, SCC Öntömörödő beton

1. ábra. A normál beton és az öntömörödő beton összetevői [V%], (Okamura–Ouchi, 2003)

Fig. 1. Components of normal and self-compacting concrete (V %) (Okamura–Ouchi, 2003)

A betonokat elsősorban a nyomószilárdság szerint szokták osztályozni. A német szabályozás (DAfStb-Richtlinie für Hochfester Beton) nagyszilárdságú betonnak a B65–B115 közötti betonokat nevezi, amely az európai jelölések szerint C55/67 – C100/115 közötti betonoknak felel meg. A CEP-FIB munkacsoportja 1990-ben az alábbiak szerint határozta meg a nagyszilárdságú beton fogalmát:

„Azokat a betonokat, amelyeknek a henger nyomószilárdsága a jelenlegi nemzeti előírásokban létező határok, azaz 60–130 N/mm² között van, nagyszilárdságú betonoknak nevezzük.”

2. ábra. Nagyszilárdságú betonok követelményei (Nawy, 1996)

Fig. 2. Requirements of high-strength concrete

3. Kísérleti terv

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék Laboratóriumában kísérleteket végeztünk nagyszilárdságú öntömörödő betonokkal. Vizsgálataink közvetlen célja különböző kiegészítő adalékanyagok és cementtípusok hatásának vizsgálata volt a szilárdulási folyamatra, valamint a 28 napos nyomószilárdságra.

Kísérleteinkben változó paraméternek tekintettük a cement típusát (CEM II/A-S 42,5, CEM II/B-S 32,5 R), a felhasznált cement mennyiségét (400 kg/m³, 440 kg/m³), a kiegészítő finomrész típusát (kohósalak, mészköliszt, szilikápor), továbbá a teljes (cement+por) finomrésztartalmat (600 kg/m³, 630 kg/m³). Kísérleti állandóink az adalékanyag szemmegoszlási görbéje (0/4 OH frakció 45%, 4/8 OK frakció 25%, 8/16 OK frakció 30%, d_{max} = 16 mm) és a víztartalom (v = 162 l/m³) voltak.

3.1. Betonösszetétel

Adalékanyagként mosott, osztályozott és szárított homok és kavics frakciókat alkalmaztunk. Az adalékanyagot ennek megfelelően három különböző frakcióból kevertük.

A homok frakció szemcsenagysága 0,063–4 mm között, a kavics frakciók szemcsenagysága 4–8 mm, ill. 8–16 mm között változott. A homok finomrész tartalmát (d ≤ 0,125 mm) szitavizsgálattal határoztuk meg (3 m%). Ezen értéket a pépvizsgálat során figyelembe vettük.

A megfelelő konzisztencia elérésének érdekében Glenium 51 nagyteljesítményű folyósítószer alkalmaztunk, mely polikarboxiléter alapú komplex rugalmas óriásmolekulából áll, eltérő lánchosszúsággal és többfajta funkció csoportokkal. A Glenium 51 hatása kétféle mechanizmusból tevődik össze. A molekulák adszorbeálódnak a cementszemcsék felületén, melynek hatására elektrosztatikus taszítóerő alakul ki, így a cementszemcsék erősen *diszpergálódnak*. Ennek köszönhetően a frissbeton jobban bedolgozható. A molekulák hosszú oldalláncai térbeli akadályt képeznek, emiatt a kötési folyamat közben egyes hidratációs termékek közötti kapcsolódás nem jön létre.

A beton összetételét Dr. Salem G. Nehme határozta meg.

3.2. Kísérleti elrendezés

Az eltérő betonösszetételektől 12 db, 150 mm élhosszúságú próbakockát készítettünk. Semmilyen tömörítést nem végeztünk, a próbatestek a nehézségi erő hatására tömörödtek.

A próbakockákat az MSZ 4798-1:2004 előírásainak megfelelően a kizsaluzástól a törés előtti 15. percre vízben tároltuk.

A beton nyomószilárdságát 2, 7, 14, ill. 28 napos korban, 3-3 db próbakockán határoztuk meg, FORM+TEST típusú 3000 kN-os erővezérelt terhelő-berendezéssel, az MSZ 4798-1:2004 előírásainak megfelelően, 11,20 kN/s erőléptékkel.

4. Kísérleti eredmények

4.1. Frissbeton jellemzők

Az 1. táblázat a különböző betonreceptúrák (1–12) területi értékeit foglalja össze. A területek kísérleteink alatt 640 mm és 740 mm közötti értékekre adódtak, melyek megfelelnek az öntömörödő betonokkal szemben támasztott területi követelményeknek. A konzisztencia- és a törésképvizsgálatok során szétosztályozódást nem tapasztaltunk.

4.2. Nyomószilárdság

A megszilárdult betonra jellemző tulajdonságokat (nyomószilárdság 2, 7, 14 és 28 napos korban, nyomószilárdság 28 napos korra vonatkoztatva 2, 7 ill. 14 napos korban, megszilárdult beton nedves testsűrűsége) a 2. táblázatban közöljük.

1. táblázat

Frissbeton tulajdonságok (Kovács J., Csicsely A., 2006), A vizsgálatokat ellenőrizte Dr. Salem G. Nehme
 Properties of the fresh concrete (Kovács J., Csicsely A., 2006), Tests were controlled by Dr. Salem G. Nehme

Receptúra száma	Cement		Kiegészítő adalékanyag		Finom-rész tartalom	Hőmérsékleti adatok		Terület [mm]
	Típus	Mennyiség [kg/m³]	Típus	Mennyiség [kg/m³]		Levegő [°C]	Beton [°C]	
1	CEM II 32,5	400	Kohósalak	200	600	32,1	32,8	680
2	CEM II 42,5	400	Kohósalak	200	600	32,4	32,8	680
3	CEM II 32,5	440	Kohósalak	190	630	32,0	32,6	740
4	CEM II 42,5	440	Kohósalak	190	630	31,5	31,1	690
5	CEM II 32,5	400	Mészkelet	200	600	26,1	24,3	690
6	CEM II 42,5	400	Mészkelet	200	600	27,1	24	700
7	CEM II 32,5	440	Mészkelet	190	630	24,7	26,1	700
8	CEM II 42,5	440	Mészkelet	190	630	24,6	27,6	710
9	CEM II 32,5	400	Mészkelet	160	600	24,2	25,9	650
			Szilikapor	40				
10	CEM II 42,5	400	Mészkelet	160	600	24,3	27,2	660
			Szilikapor	40				
11	CEM II 32,5	440	Mészkelet	146	630	25,0	28,1	640
			Szilikapor	44				
12	CEM II 42,5	440	Mészkelet	146	630	25,4	27,6	660
			Szilikapor	44				

2. táblázat

Frissbeton tulajdonságok (Kovács J., Csicsely A., 2006), a vizsgálatokat ellenőrizte Dr. Salem G. Nehme
 Properties of the fresh concrete (Kovács J., Csicsely A., 2006), Tests were controlled by Dr. Salem G. Nehme

Receptúra sorszáma	Nyomószilárdság 150 mm élhosszúságú próbakockán				Relatív nyomószilárdság 28 napos korra vonatkoztatva, %				Relatív nyomószil. 28 napos korra és 5. sz. receptúrára vonatkoztatva, %	Megszilárdult beton testsűrűsége, kg/m³
	2	7	14	28	2	7	14	28		
	Napos				Napos					
1	36,6	55,3	60,5	66,6	54,9	83,0	90,8	100	128,3	2347,6
2	56,4	76,8	81,8	90,5	62,4	84,9	90,5	100	174,3	2399,5
3	35,3	56,6	62,9	73,2	48,3	77,3	85,9	100	141,0	2358,8
4	54,2	79,5	83,1	93,4	58,0	85,1	88,9	100	180,0	2418,6
5	26,4	38,1	43,6	51,9	50,8	73,4	84,1	100	100,0	2299,6
6	49,8	58,4	65,6	73,5	67,8	79,5	89,3	100	141,6	2423,1
7	29,9	43,8	52,0	59,1	50,6	74,1	87,9	100	113,9	2370,5
8	51,0	66,0	72,1	74,7	68,3	88,4	96,6	100	143,9	2255,2
9	27,1	50,2	62,7	67,4	40,2	74,5	92,9	100	129,9	2335,4
10	44,9	68,5	79,2	82,9	54,1	82,6	95,6	100	159,7	2386,5
11	31,2	51,7	63,4	71,0	44,0	72,8	89,2	100	136,8	2333,8
12	49,2	68,6	79,1	84,6	58,2	81,1	93,5	100	163,0	2388,2

3. ábra. Az átlagos nyomószilárdság alakulása az idő függvényében
(Kovács J., Csicsely A., 2006)

Fig. 3. Development of the average compressive strength
as a function of time

4. ábra. Az relatív nyomószilárdság alakulása az idő függvényében
(Kovács J., Csicsely A., 2006)

Fig. 4. Development of the relative compressive strength
as a function of time

5. ábra. A betonok időbeni nyomószilárdsági folyamata
Fig. 5. Development of the compressive strength of concrete as a function of time

5. Öntömörödő betonok hatása a szilárdulási folyamatra

5.1. Kiegészítő anyagok hatása a szilárdulási folyamatra

Az alábbiakban azonos cementminőségű, cementmennyiségű, víz/cement tényezőjű és azonos finomrész-tartalmú, de különböző kiegészítő adalékanyag felhasználásával készült keverékeket hasonlítunk össze. A pontokra logaritmikus függvényeket helyeztünk, a korreláció értéke minden esetben 0,96 feletti.

A 3. ábra alapján megállapítható, hogy a kohósalakkal készített keverékek befolyásolják leghatékonyabban a nyomószilárdság átlagos értékét, ettől – CEM II 32,5 cement felhasználása mellett – kis mértékben tér el a mészkőlisztből és szilikaporból készített keverék. A mészkőliszt felhasználásával előállított keverékek 28 napos átlagos nyomószilárdsága ~80%-a a kohósalakkal előállított keverék nyomószilárdságának. Ennek oka, hogy a kohósalak, mint gyengén hidraulikus kötőanyag részt vesz a kötésben.

A 4. ábrán a relatív nyomószilárdságot (28 napos korra vonatkoztatva) ábrázoljuk az idő függvényében. Megállapítható, hogy a korai relatív szilárdság a mészkőliszt felhasználásával készített keverékek esetén kiemelkedő, CEM II 42,5 cementminőség mellett megközelíti a 70%-ot. A kohósalakkal készített keverékek esetében ez az érték 60% körüli, még a szilikapor adagolás a korai szilárdságot átlagosan 50% körüli értékre szorítja le. Megállapítható továbbá, hogy a nagyobb szilárdsági osztályú cement felhasználásával készített keverékek korai relatív nyomószilárdsága kedvezőbb.

5.2. Cement típusa hatása a szilárdulási folyamatra

Az 5. ábrából és 2. táblázatból megállapítható, hogy a CEM II 42,5-ből készült betonok nyomószilárdsága nagyobb, mint a CEM II 32,5-ből készült betonoké. Továbbá a relatív kezdeti szilárdság (2 napos korban) a CEM II 42,5-ből készült betonok esetén nagyobb (44,9%–56,4% között) volt, mint a CEM II 32,5-ből készült betonok (26,4%–36,6%) esetén.

A 6. ábrán a 28 napos nyomószilárdságot ábrázoljuk a víz/cement tényező függvényében. Mivel a kohósalak gyengén hidraulikus anyag, a víz/cement tényező meghatározása során a számított cementmennyiséget a keverékben lévő kohósalak mennyiség 20%-ával megnöveltük. E szerint a kohósalak felhasználásával készített keverékeknel 400 kg/m³, kohósalak nélkül 440 kg/m³ cement felhasználása mellett értük el a 0,37-es értékű víz/cement tényezőt.

Az tendenciák alapján megállapítható, hogy CEM II 32,5 cement felhasználása esetén a szilikapor felhasználásával készített keverékek – azonos víz/cement tényező mellett (0,37) – jobb nyomószilárdsági eredményeket adtak, mint a kohósalakkal vagy mészkőlisztel készített keverékek. CEM II 42,5 cement felhasználása esetén, szintén azonos víz/cement tényező mellett, ill. kevesebb cementtartalomnál azonban a kohósalak 8–10%-kal nagyobb átlagos nyomószilárdsági értékeket adott, mint a szilikaporról készített keverék. A csak mészkőlisztel készített keverékek átlagos nyomószilárdsági értékei kb. 10–15%-kal elmaradnak a többi keverék nyomószilárdsági értékeitől.

A 7. ábrán 28 napos nyomószilárdsághoz viszonyított 2 napos szilárdságot ábrázoljuk %-ban kifejezve a víz/cement tényező függvényében. Az ábra alapján megállapít-

6. ábra. A nyomószilárdság alakulása a víz/cement tényező függvényében
Fig. 6. Development of the compressive strength as a function of the water/cement ratio

7. ábra. A 2 napos relatív nyomószilárdság alakulása a víz/cement tényező függvényében
Fig. 7. The 2-day relative compressive strength as a function of the water/cement ratio

ható, hogy kohósalak felhasználása mellett a víz/cement tényező csökkenésének hatására a korai relatív szilárdság is csökkent, mészkőliszt esetén nem változott, szilikapor esetén 5%-ot nöött. Megállapítható továbbá, hogy CEM II 42,5 cement felhasználása esetén 10–20%-os korai relatív szilárdság növekedés érhető el. Figyelemre méltó eredmény a mészkőliszttel készített keverékek közel 70%-os korai relatív nyomószilárdsága.

5.3. Kiegészítő anyagok és a finomrész tartalom hatása a szilárdulási folyamatra

Jelen fejezetben a nyomószilárdság változását vizsgáljuk a finomrész-tartalom függvényében. A finomrész-tartalom meghatározásánál a cement és a kiegészítő finomrész mennyisége mellett figyelembe vettük a felhasznált homok 0,125 mm szemnagyság alatti mennyiségét is (3%).

Megállapítható, hogy CEM II 32,5 cement felhasználása esetén 5%-os finomrész-tartalom növekedés esetén 5–15% nyomószilárdság növekedés érhető el, ami mészkőliszt kiegészítő finomrész mellett a legintenzívebb (8. ábra). Nagyobb szilárdságú cement felhasználása esetén ez a szilárdság növekedés mindössze 3,5%.

A 9. ábrán 28 napos nyomószilárdsághoz viszonyított 2 napos szilárdságot ábrázoljuk %-ban kifejezve a finomrész-tartalom függvényében. A 9. ábra alapján megállapítható, hogy a finomrész-tartalom növekedésének hatására a 2 napos szilárdság 10–20%-os növekedést ér el, ami a 28 napos szilárdsághoz viszonyítva 10–20%-os növekedés tapasztalható.

pítható, hogy a finomrész tartalom növelése kohósalak esetén 7–12%-os korai relatív szilárdságbeli csökkenést okoz, még mészkőliszt felhasználása esetén nem változtat az értéken. A szilikaport tartalmazó keverékek esetében azonban 10%-os növekedés tapasztalható.

6. Megállapítások

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének laboratóriumában kísérleteket végeztünk nagyszilárdságú öntömörödő beton felhasználásával.

Laboratóriumi vizsgálataink közvetlen célja a betontechnológiai jellemzők hatásának meghatározása a szilárdulási folyamatokra, ill. a 28 napos átlagos nyomószilárdságra.

Kísérleti változók voltak:

- a cement típusa CEM II/B-S 32,5 R; CEM II/A-S 42,5
- a cement tartalom 400 kg/m³; 440 kg/m³
- a kiegészítő finomrész típusa kohósalak; mészkőliszt; mészkőliszt + szilikapor
- a finomrész-tartalom 600 kg/m³; 630 kg/m³
- a 2. és 4. pont hatására a víz/cement tényező, mint kísérleti változó

8. ábra. Az átlagos nyomószilárdság alakulása a finomrész-tartalom függvényében
Fig. 8. Development of the average compressive strength as a function of the fine particles content

9. ábra. A 2 napos relatív nyomószilárdság a finomrész-tartalom függvényében
Fig. 9. The 2-day relative compressive strength as a function of the fine particles content

Kísérleti állandók voltak:

- az adalékanyag szemeloszlási görbéje
- víztartalom $v=162 \text{ l/m}^3$

Kísérleteink során az alábbi vizsgálatokat végeztük el:

- konzisztencia (terülés)
- nyomószilárdság 150x150x150 mm méretű próbakockán mérve
 - 2, 7, 14, ill. 28 napos korban

Kísérleti eredményeink alapján megállapítható:

- A kísérleteink során vizsgált kiegészítő finomrész típusok közül a kohósalak befolyásolja legkedvezőbben a korai és 28 napos nyomószilárdság értékét.
- Nagy korai relatív szilárdságú betonok készítéséhez a mészkőliszt bizonyult a leghatékonyabbnak.
- Azonos víz/cement tényezőjű keverékek esetén a kohósalak hidraulikus kötőképesége miatt kevesebb cement mennyiség felhasználása mellett is nagyobb nyomószilárdsági értékek adódnak.
- A víz/cement tényező leszorításával a korai relatív nyomószilárdság kohósalak felhasználása esetén

csökkent, mészkőliszt és szilikaport adagolás mellett növekedést tapasztaltunk.

- Kisebbségi osztályú cementfelhasználás esetén kis mértékű finomrész-tartalom növeléssel is nyomószilárdság növekedés érhető el.
- A finomrész-tartalom növelése kohósalak esetén kis mértékben csökkenti, mészkőliszt esetén nem változtatja, szilikaport adagolás mellett növeli a korai relatív nyomószilárdságot.

7. Köszönetnyilvánítás

Megköszönjük Csányi Erikának és Csicsely Attilának a laboratóriumi vizsgálatok során nyújtott segítségét.

Irodalom

- [1] Edward G. Nawy (1996): Fundamentals of high strength high performance concrete, Logman Group Limited pp. 23
- [2] Okamura, H. and Ozawa, K. (1995): „Mix-design for self-compacting concrete.” Concrete, Library of JSCE, 25, 107–120.
- [3] Kovács J., Csicsely A. (2006): Nagyszilárdságú öntömörödő betonok, Tudományos, Diákköri Dolgozat
- [4] Okamura, H. and Ouchi, M. (2003): Self-compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, 5–15, April 2003.