

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

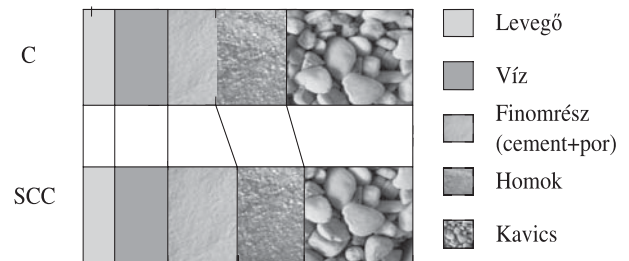
Napjaink betontechnológiája a korszerű adalékszereknek köszönhetően lehetővé teszi az egyre nagyobb teljesítőképességű és tartósságú betonstruktúrák megvalósítását. A nagy korai szilárdságú és több mint 150 N/mm² nyomószilárdságú betonok, valamint a bedolgozás előtt hosszabb időn keresztül stabilizálható 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 csapágy” működik a betonban (1. ábra).



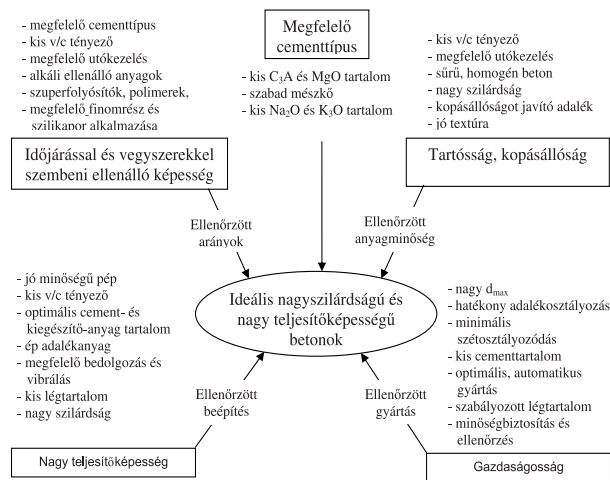
C: Normál beton, SCC Öntömörödő beton

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 szemcse nagysága 0,063–4 mm között, a kavics frakciók szemcse nagysága 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 próbakockákat 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. percreg 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 területlek 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

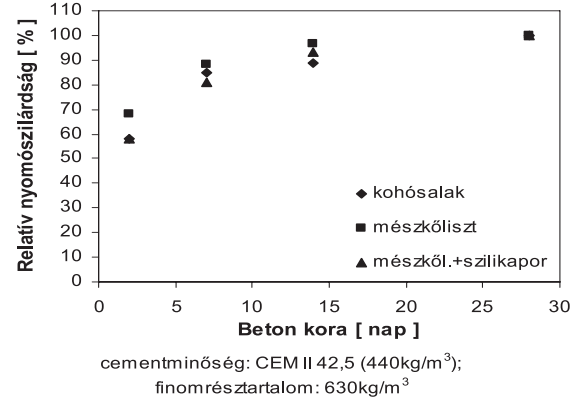
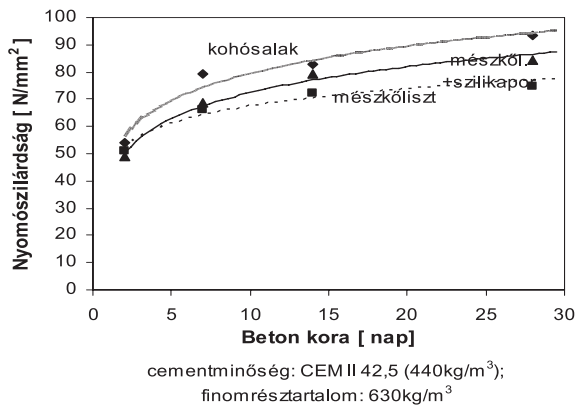
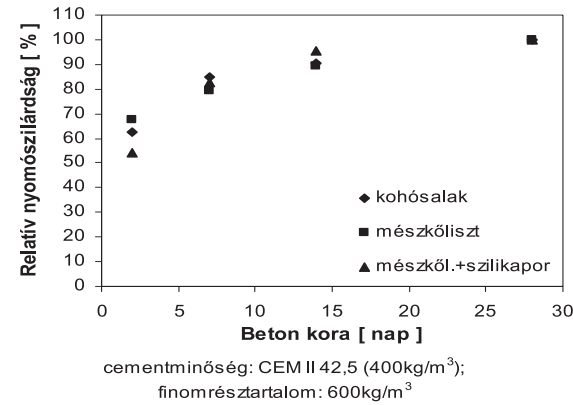
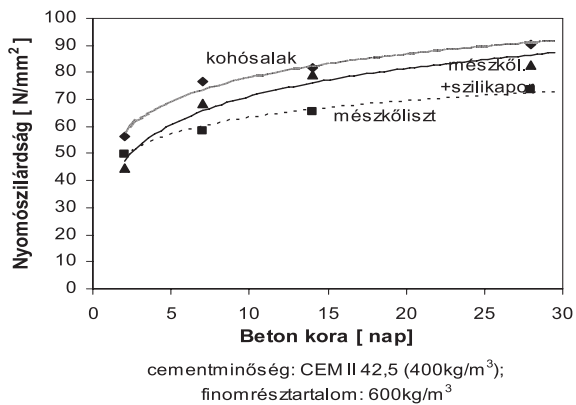
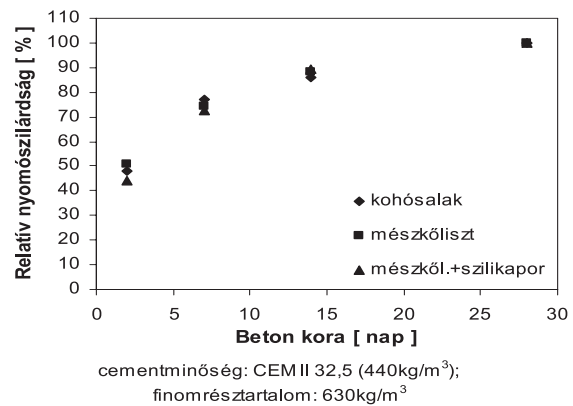
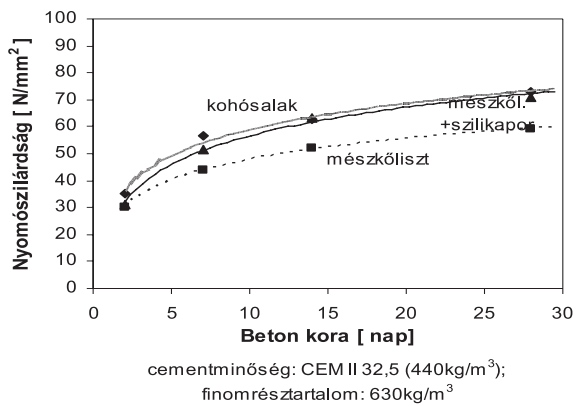
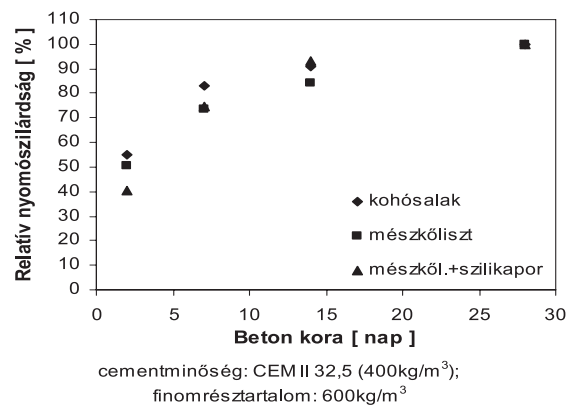
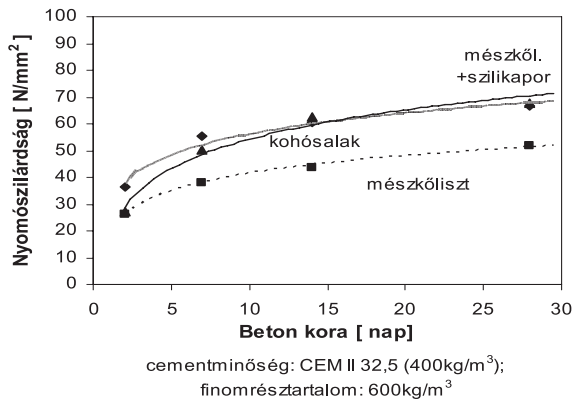
A megszilárdult betonra jellemző tulajdonságokat (nyomószilárdság 2, 7, 14 és 28 napos korban, nyomószilárdság 28 napos korra vonatkoztatva 2, 7 ill. 14 napos korban, megszilárdult beton nedves testsűrűsége) a 2. táblázatban közöljük.

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/m ³] | Típus | Mennyiség [kg/m ³] | | 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 | Mészkeőliszt | 200 | 600 | 26,1 | 24,3 | 690 |
| 6 | CEM II 42,5 | 400 | Mészkeőliszt | 200 | 600 | 27,1 | 24 | 700 |
| 7 | CEM II 32,5 | 440 | Mészkeőliszt | 190 | 630 | 24,7 | 26,1 | 700 |
| 8 | CEM II 42,5 | 440 | Mészkeőliszt | 190 | 630 | 24,6 | 27,6 | 710 |
| 9 | CEM II 32,5 | 400 | Mészkeőliszt | 160 | 600 | 24,2 | 25,9 | 650 |
| | | | Szilikapor | 40 | | | | |
| 10 | CEM II 42,5 | 400 | Mészkeőliszt | 160 | 600 | 24,3 | 27,2 | 660 |
| | | | Szilikapor | 40 | | | | |
| 11 | CEM II 32,5 | 440 | Mészkeőliszt | 146 | 630 | 25,0 | 28,1 | 640 |
| | | | Szilikapor | 44 | | | | |
| 12 | CEM II 42,5 | 440 | Mészkeőliszt | 146 | 630 | 25,4 | 27,6 | 660 |
| | | | Szilikapor | 44 | | | | |

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, % | Meggőszilárdult beton testsőűrsőűse, kg/m ³ |
|--------------------|---|------|------|------|---|------|------|-----|--|--|
| | 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 |

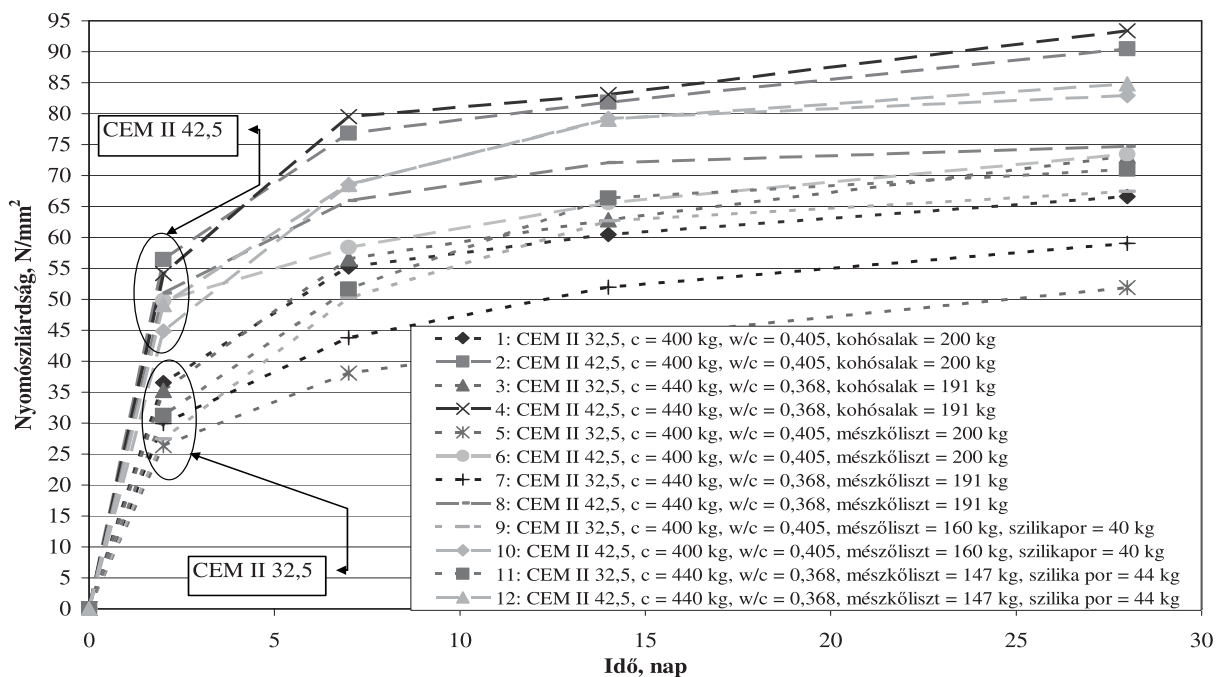


3. ábra. Az átlagos nyomószilárdság alakulása az idő függvényében (Kovács J., Csicsely A., 2006)

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 logaritmusos 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 mészkölisztből és szilikaporból készített keverék. A mészköliszt 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 mészköliszt 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 értékűre szorítja le. Megállapítható továbbá, hogy a nagyobb szilárdsági osztályú cement felhasználásával készített keverékek korai relatív nyomószilárdsága kedvezőbb.

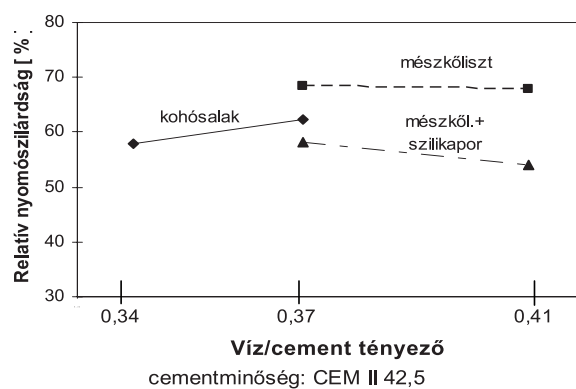
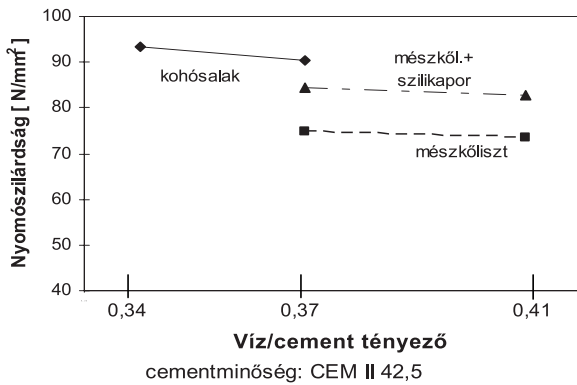
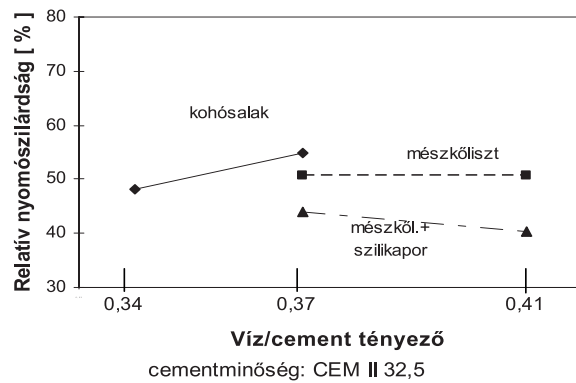
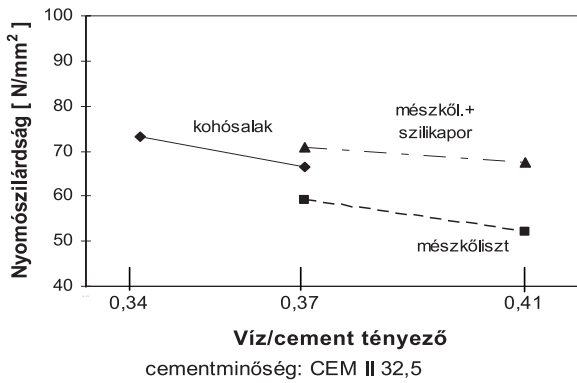
5.2. Cement típusa hatása a szilárdulási folyamatra

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 érték 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 mészköliszttel 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 szilikaporral készített keverék. A csak mészköliszttel 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 növelt. 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 szemmagyság 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 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.

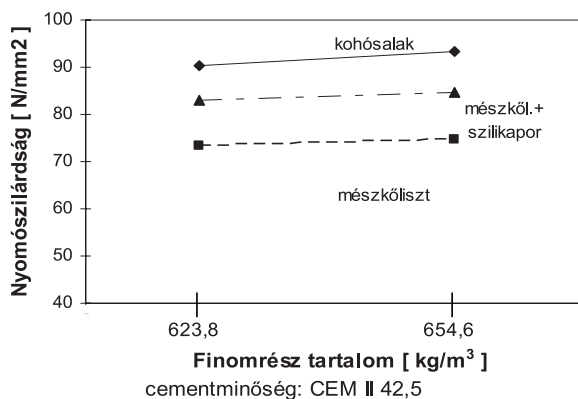
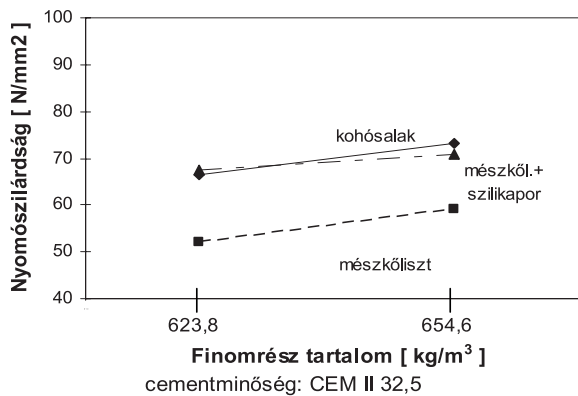
6. Megállapítások

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

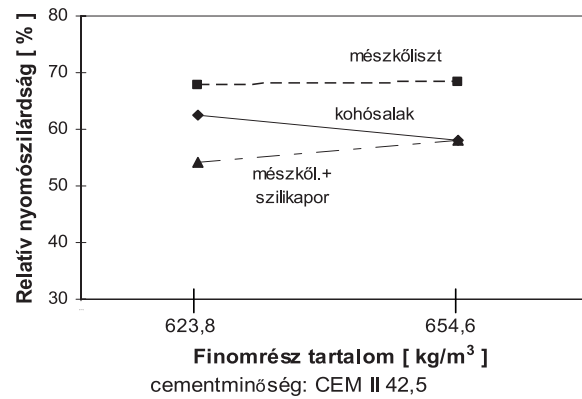
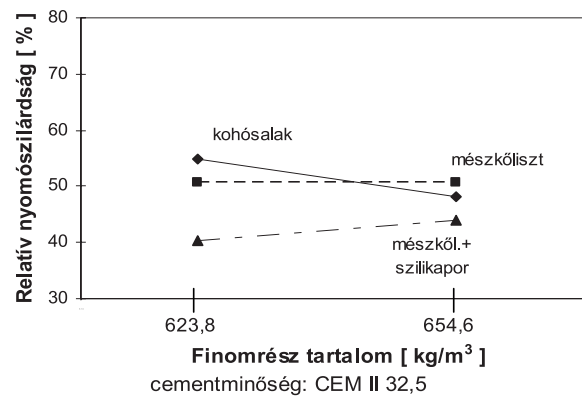
Laboratóriumi vizsgálataink közvetlen célja a betontechnológiai jellemzők hatásának meghatározása a szilárdulási folyamatokra, ill. a 28 napos átlagos nyomószilárdságra.

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 szilikapor 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, szilikapor adagolás mellett növeli a korai relatív nyomószilárdságot.

7. Köszönetnyilvánítás

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

Irodalom

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