

Nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok technológiája

Dr. Farkas György

egyetemi tanár, tanszékvezető,
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Rövid kivonat

Az elmúlt évek tapasztalatai szerint a vasbeton építésben egyre nagyobb jelentősége van a korrózióból származó szerkezeti károsodások megelőzésének.

A szerkezetek tartóssága növelésének egyik lehetséges eszköze a nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok széles körű alkalmazása lehet. A hazai építési gyakorlatban az ilyen betonok alkalmazásának bevezetése vontatottan halad. Ennek egyik oka a korszerű betontechnológiák nem eléggé széleskörű ismerete lehet. A cikkben összefoglaltam azokat az alapelveket, amelyek a nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok készítésénél lényegesek.

1. Bevezetés

Az elmúlt évek hazai és nemzetközi tapasztalatai egyértelműen igazolták, hogy a vasbetonból készült építmények tartósságát alapvetően befolyásolja az alkalmazott betontechnológia, illetve a beton készítésére vonatkozó technológiai előírások szigorú betartása. Ezt több tényező is alátámasztja, melyek közül talán leginkább ismertek a közúti vasbeton hidak újabban egyre gyakrabban jelentkező időállósági problémái, az IMS rendszerű előregyártott, utófesztett épületszerkezeteknél általánosan mutatkozó korróziós károsodások, de ide sorolhatjuk az egyéb típusú, tárolásra alkalmas, vagy más ipai jellegű építmények vasbeton és fesztett vasbeton szerkezeteinél is mind sűrűbben tapasztalható tartóssági problémák jelentkezését is.

A károsodások kialakulása a legtöbb esetben egyértelműen a szerkezeti beton struktúrájának időbeni megváltozására vezethető vissza, aminek következtében a betonba beágyazott acélbetétek korrózió elleni védelme meggyengül, megindul és egyre erősödik a betétek rozsdásodása, amely rövid időn belül visszafordíthatatlan folyamattá válik. Ez a folyamat vasbeton, de különösen fesztett vasbeton tartószerkezeteknél alapjaiban veszélyezteti a szerkezet teherbírását és előbb vagy utóbb mindenképpen beavatkozást tesz szükségessé a biztonságos teherviselés biztosítása érdekében. Svájcban például napjainkban a vasbeton hidak felújítási, rehabilitációs munkáinak volumene lényegesen meghaladja az új műtárgyak építésének volumenét.

A vasbetonépítés történetének első szakaszában, mintegy nyolc évtizeden keresztül elterjedt volt az a nézet, hogy a vasbetonból készült szerkezetek karbantartására, az acélszerkezetekkel ellentétben, nem kell különösebb gondot fordítani, hiszen ezek az építmények ellenállnak az idő vasfogának, a betonba beágyazott acélbetétek pedig a beton jellegzetesen lúgos, 12 feletti PH értéke következtében, a korrózió ellen védettek. Ez az állítás többé-kevésbé igaznak volt tekinthető századunk első felében, azonban elsősorban a felgyorsult ipari fejlődés következtében kialakuló egyre agresszívabb atmoszférikus hatások következményei, valamint a sókorrózió egyre nyilvánvalóbbá tették, hogy a hagyományos technológiával készített betonok egyre kevésbé alkalmasak a mindinkább előtérbe kerülő tartóssági követelményeknek megfelelni, és ennek következtében a szerkezeti beton készítésének technológiáját mind monolit, mind pedig előregyártott szerkezetek építésénél új alapokra kell helyezni.

2. Nagyszilárdságú (HSC), nagy teljesítőképességű (HPC) betonok a szerkezet tartósságának szolgálatában

Féret francia mérnök már 1897-ben megállapította, hogy a beton nyomószilárdsága négyzetes arányban nő a cementadagolással és fordítottan arányos a keverékben lévő víz, illetve levegő mennyiségének térfogatával. A friss betonkeverékben alkalmazott víz-cement tényező csökkentése tehát, azonos cementadagolás esetén, hatékony eszköz lehet a beton nyomószilárdságának növeléséhez. A cement hidratációjához kémiailag szükséges víz feletti vízmennyiség egy része gélvíz formájában kötődik meg a betonban, a többi pedig elpárolog és kapillárisokat hagy maga után. A kapillárisok kialakulása következtében a beton pórusos-sá, vízáteresztővé válik, ezért a kapillárisok mennyiségének növekedésétől és azok eloszlásától függően egyre kevésbé képes ellenállni a külső, agresszív környezeti hatásoknak. A keverék víz-cement tényezőjének csökkentése tehát nem csak a beton szilárdságát, hanem annak a korrózióval szembeni ellenállását is növeli. A nagyszilárdságú (High Strength Concrete, vagy HSC) betonok alkalmazása ezért a szerkezetek tartóssága fokozásának hatékony eszköze lehet.

A különböző külső hatásokkal (fagy, sólé behatolás, kopás, agresszív atmoszférikus hatások, stb.) szembeni ellenállás fokozása azonban nem csak a beton szilárdságának növelésével, hanem különböző adalékszereknek, pl. zárt légpórusképzőknek a friss betonkeverékben történő megfelelő adagolásával is elérhető. Ezeknek a szereknek a hatása nem mindig jár együtt a beton szilárdságának növekedésével. Az ilyen betonokat valamilyen külső követelmény szempontjából nagy teljesítőképességű (High Performance Concrete, vagy HPC) betonoknak nevezzük. A nemzetközi szakirodalomban a hagyományostól eltérő tulajdonságú betonokat közös néven HSC/HPC betonoknak szokás nevezni, bár egy konkrét esetre vonatkozóan a kétféle tulajdonság nem mindig jelenik meg egyidejűleg.

A beton szilárdsága szerint, a jellemző nyomószilárdságok alapján a különböző betonok, kissé önkényesen, a következő kategóriákba sorolhatók [1]:

6 - 20 N/mm ² :	„kőműves” beton,
25 - 40 N/mm ² :	„hagyományó” beton,
50 - 100 N/mm ² :	nagyszilárdságú beton,
120 - 250 N/mm ² :	szuperszilárdságú beton,
400 - 800 N/mm ² :	hiperszilárdságú beton.

A nagy teljesítőképességű betonok legfontosabb jellemzői a szilárdságtól függetlenül a korrózióállóság, vízzáróság, fagyállóság, kopásállóság és szívósság. Általában kijelenthetjük, hogy a nagy-, szuper- és hiperszilárdságú betonok eleget tesznek a nagy teljesítőképességű betonokkal szemben támasztott követelményeknek is. Ezzel szemben a hagyományos betonosztályok szerint készített betont nem nevezhetjük nagy szilárdságúnak, de az adott esetben ettől függetlenül eleget tehet nagy teljesítőképességű betontól elvárt követelményeknek.

3. A nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok készítése

Mint azt az előzőekben láttuk, a *víz-cement tényező csökkentése* az egyik alapvető feltétele a nagyszilárdságú, korrózióálló betonok előállításának. A kötéshez kémiaiilag szükséges víz mennyisége körülbelül a cementtartalom 25%-a. A friss betonkeverék víz-cement tényezője természetesen nem csökkenthető tetszőlegesen a kémiaiilag szükséges vízmennyiségig a keverék bedolgozhatóságának rohamos romlása nélkül. A megfelelő bedolgozhatóság elengedhetetlen feltétele annak, hogy a megszilárdult beton kellőképpen tömör, vagyis a tartóssági követelményeknek megfelelő szerkezetű legyen. A víz-cement tényező csökkentése esetén a betonkeverék megfelelő bedolgozhatósága *képlékenyítő szerek*, illetve folyósítók (akrilát, naftalin, lignin, melamin, stb.) alkalmazásával biztosítható. Ezek megfelelő adagolásával elérhető a keverékben lévő szilárd részecskék egyenletesebb eloszlása, aminek következtében a kötéshez feltétlenül szükséges vízmennyiség a cement tartalomnak akár 20%-áig is csökkenthető.

Az adalékszerek hatásának mágneses rezonancia vizsgálata azt mutatta, hogy a folyósító szerek a szilárd részecskék felületén összefüggő filmet alkotnak és ennek hatására a keverékben lévő vízmolekulák mobilitása megnövekszik. A részecskék egyenletesebb eloszlása és a vízmolekulák megnövekedett mobilitása együttesen a keverék reológiai tulajdonságainak javulását eredményezik.

Optimális hatás természetesen csak az adalékszerek megfelelő adagolásával érhető el. A korszerű adagolás leghatékonyabb módja a betongyárba telepített adagolóberendezés. Minthogy az adalékszerek hatását számos tényező, például az alapanyagok fajtája és tulajdonságai, a betonkeverék összetétele és a hőmérséklet befolyásolják, minden esetben szükséges az alkalmazási feltételekhez igazodó próba-keverék készítése és ellenőrzése az adagolás beállítására [2].

Az adagolásnál biztosítani kell, hogy a szer a keverékben egyenletesen el tudjon keveredni. Az elkeveredés akkor a legjobb, ha a szert a keverővízzel együtt, vagy a keverés végén adagoljuk a betonba. Száraz keverékbe történő adagolás lerontja, vagy csökkenti az adalékszer hatását. Az adalékszereket általában szabad egymással kombinálva alkalmazni, de ügyelni kell arra, hogy csak betontechnológiai szempontból indokolt kombinációkat, például folyósító és légpórusképző, vagy képlékenyítő és kötészélesztető, alkalmazzunk. Ilyen esetben az adalékszereket a keverékbe egymás után célszerű adagolni. Nem szabad az adalékszereket előre összekevert állapotban a betonba adagolni.

A kutatási eredmények tanúsága szerint a friss betonkeverékben alkalmazott adalékanyag és cement keveréke akkor tekinthető optimálisnak, ha abban a két anyag felülete közel azonos. A cement típusának megválasztásával annak felülete adva van (350-420 m²/kg). Az adalékanyag összfelületében döntő a finomszemcse mennyisége, minthogy a 2 mm alatti szemcsék felülete elérheti akár az összes szemcsfelület 80 %-

át is. Az adalékanyag megfelelőségének megítélésére ezért a hagyományos szemeloszlási görbe és finomsági tényező általában nem elégséges, mivel egyazon finomsági tényezőhöz nagyságrendileg eltérő felületek is tartozhatnak.

A finomszemcsék mennyiségében és ezzel az adalékanyag összfelületében döntő szerepe van a 0,002 mm-nél kisebb átmérőjű agyag-, illetve a 0,002 és 0,02 mm közötti átmérőjű iszapszemcséknek. Ezek azonban lágy anyagok lévén kedvezőtlenül befolyásolják a beton szilárdságát. Vízfelvevő képességük nagy, ezért a nagy agyag- és iszaptartalmú betonok zsugorodási és kúszási jellemzői kedvezőtlenek. Általánosan kijelenthetjük, hogy az agyag és iszap egyértelműen káros a betonra és a nagyszilárdságú betonok készítésének egyik fontos követelménye, hogy az agyag- és iszapmentes legyen. Ez legegyszerűbben mosott adalékosztályozással érhető el.

A nagy-, szuper- és hiperszilárdságú betonok előállításának egyik legfontosabb alapanyaga a szilikapor, mely anyag az öntvények gyártásához készített öntőforma homokjának az öntés befejeztével létrejövő maradványa. A szilikapor lényegében igen finom szemcséjű kvarchomok, melynek kémiai összetétele nagyon hasonló a portlandcementéhez. Előnyös tulajdonsága, hogy aktívan vesz részt a kötési folyamatban. Gyakorlatilag 15-30%-a cementként vehető figyelembe a betonkeverékben. Fajlagos felülete rendkívül nagy, 15000-20000 m²/kg, a hagyományos portlandcement fajlagos felületének mintegy ötvenszerese. Összehasonlításképpen érdemes megjegyezni, hogy a dohányfüstben található korom fajlagos felülete „csupán” 10000 m²/kg.

Az adalékanyag és a cement optimális felületarányának eléréséhez szükség van a betonkeverékben finomszemcsékre. Megfelelő mennyiségű finomszemcse a korszerű betontechnológia szerint a keverékhez adagolt szilikapor vagy pernye alkalmazásával biztosítható. Tájékoztatásul, homokos kavics adalékanyag esetén, mosott adalékosztályozással és megfelelő mennyiségű szilikapor hozzáadása mellett az optimális felületarány úgy érhető el, hogy az adalékban a 4 mm és ennél kisebb átmérőjű szemcsékből képzett homoktartomány tömege a kavics tömegének mintegy 70%-a legyen. A szilikapor tömege szokásos esetben a keverékhez adagolt cement tömegének 7-15%-a között változhat. A keverék víz-cement tényezőjének meghatározásánál, annak hidratációs képessége miatt, a cement mennyiségéhez a szilikapor tömegének mintegy 15-20%-át hozzá kell adni.

A nagyobb szilárdság mellett a szilikapor hozzáadásával készített betonok fontos tulajdonsága a nagy teljesítőképesség is. Ezen belül igen lényeges a betonba ágyazott acélbetétek korrózió elleni védelmében játszott szerepe. A BME Vasbetonszerkezetek Tanszékén végzett kísérletek is azt igazolták [3], hogy az acélbetétek korrózió-érzékenysége a keverékben alkalmazott szilikapor növelésével erőteljesen csökken.

A nagyszilárdságú betonból készített próbatestek nyomó szilárdságvizsgálatának törésképei azt mutatják, hogy az adalékanyag szemcséi eltörnek, így azok saját szilárdságukkal részt vesznek a beton teherbírásában. Ha az adalékanyag geológiai és/vagy szilárdságilag nem homogén, akkor ez megmutatkozik a beton szilárdsági jellemzőiben is, mégpedig úgy, hogy azt az alacsonyabb szilárdságú adalékszemcsék determinálják. Az adalékszemcsék esetleges rejtett repedései ugyancsak kedvezőtlenül befolyásolják a beton szilárdságát. Tapasztalatok szerint ilyen rejtett repedések gyakrabban fordulnak elő a nagyobb átmérőjű szemcsékben. Ezért a nagyobb szemcsék beépítését a nagyszilárdságú betonokba célszerű korlátozni.

Az adalékanyag szemcséinek alakja szempontjából ideális lenne a gömb alak, mivel ennek a legkisebb a felülete és ezáltal legkevesebb a cement- és vízigénye. Ilyen formájú szemcsékből álló adalékanyagok mesterseges előállítására egyre több próbálkozással találkozhatunk a nemzetközi szakirodalomban, összekötve ezeket a kísérleteket könnyű adalékok, például igen keményre égetett agyagból készült adalék gyártásával. A gömb alakú adalékszemcsék a szilikaporról együtt egymáson elgördülő tömegeket képeznek a keverékben, és ezzel elősegítik nagyobb tömörségű beton kialakulását.

A homokos kavicsot szokás zúzottkő adalékkal helyettesíteni a betonkeverékben. A zúzottkőnek azonban nagy a relatív felülete, ezért szilárdsági szempontból fölös mennyiségű cementet igényel. Ezen kívül a zúzottkő adalékkal készült betonban a szemcsék alatt léghézagok képződhetnek, ennek következtében a szilárdság csökkenésével kell számolni. Ezért zúzottkő alkalmazása nagyszilárdságú betonok adalékként nem előnyös.

A megszilárdult beton tulajdonságai szempontjából kifejezetten hátrányos az a ma még gyakran, különösen kisebb volumenű, kőműves jellegű építkezéseken tapasztalható eljárás, amikor a betonkeverés első fázisában a cementet száraz adalékanyaggal keverik össze. Ez azt eredményezi, hogy a kötés szempontjából éppen a legfontosabb helyen, az adalékszemcse és a cement közötti érintkezési ponton nincs víz a hidratációhoz. A cement ezeken a helyeken mintegy bepiszkítja az adalékszemcse felületét. Az ilyen keverési technológia értelemszerűen a beton szilárdságának csökkenésével jár.

Az előzőek miatt célszerű a betonkészítéshez szükséges víz mennyiségének felét-kétharmadát a cementadagolás előtt az adalék megnedvesítésére felhasználni. Tapasztalatok azt mutatják, hogy ezzel a keverési technológiával adott esetben akár 10-15%-al is növelhető a megszilárdult beton szilárdsága.

A hidrofób cementszemcsék átmedvesedése és ennek következtében hidratálódása is kéregszerű lesz, ha a szemcsék átmérője nagyobb a kötési idő alatt átmedvesedő réteg vastagságának kétszeresénél. A kéregszerűen hidratálódó hagyományos cement lassan szilárduló betont eredményez. Ez elsősorban előregyártó üzemekben készült szerkezeti elemek gyártásánál hátrányos, mivel hosszú forgásidőt eredményez a zsaluzatok újrafelhasználásánál, de a korszerű monolit technológiák alkalmazásánál is kedvezőtlen, mivel manapság egy beruházás megtérülése szempontjából egyáltalán nem elhanyagolható tényező az építési idő. A szilárdulás gyorsítása érdekében szokták az ilyen betonokat gőzöléssel érlelni, de bizonyos konzisztencia javító szerekkel is lerövidíthető a kötési idő. Korszerű betontechnológiával úgy iktatható ki a gőzölés, hogy a hagyományos cementek helyett finom őrlésű, például rapid cementet alkalmazunk. Ezzel elérhető, hogy a kéregszerű átmedvesedés a cementszemcse teljes átmérőjére kiterjed viszonylag rövid kötési idő alatt.

A szilárdulási idő lerövidítésének másik lehetősége az úgynevezett *aktivátoros betonkeverők* használata. Az aktivátoros betonkeverőgépbe az alapforgású keverőtányér és lapátok mellett be van építve egy az alapforgásnál kb. tízszeres forgási sebességgel forgó lapáteggyüttes, amely az adalékanyaggal együtt darabolja, darálja a cementszemcséket is. Ezzel a művelettel a gép elvégzi a cement nedves őrlését, aminek eredményeként olyan szemcseátmérek jönnek létre, amelyek teljes tömegükben rövid idő alatt képesek hidratálódni. Az aktivátoros betonkeverők alkalmazása feleslegessé teszi a beton mesterséges érlelését, és ezzel energia megtakarítás is elérhető.

A betonkészítés folyamatának rendkívül fontos mozzanata az *utókezelés*. A beépített friss beton locsolással történő nedvesen tartása nem előnyös a megszilárdult beton anyagjellemzői szempontjából, mivel a rendszerint hideg vizes nedvesítés hatására a kötésző által felmelegedett betontömegben feszültségkülönbségek és ennek következtében repedések keletkeznek. A beton utókezelésének korszerű módja, amikor a kötéshez szükséges víz elpárolgását párazáró, például fólia, vagy lakkszerű rétegnek a betonfelületre való felhordásával előzik meg.

Az előzőekben leírtakból nyilvánvaló, hogy a nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok készítése nagy *szakértelmet igénylő* és megbecsülést érdemlő mérnöki feladat. A minőség biztosításának igénye alapvetően fontos és meghatározó a betonból készített szerkezetek hosszú távú megfelelő működése szempontjából. A betonkeverék megtervezése, a beton gyártása, szállítása, beépítése, tömörítése és utókezelése egyaránt fontos fázisa a nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok készítésének. Fontos ezért, hogy a magas követelményeknek eleget tevő betonok készítését csak magas színvonalú felkészültséggel és megfelelő tárgyi feltételekkel rendelkező személyek végezzék.

4. A nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok alkalmazási területei

A nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok mechanikai, szilárdsági jellemzői [4], korróziós tulajdonságai rendkívül kedvezőek, ezért gyakorlatilag a szerkezetépítés minden területén, előregyártott és monolit építményeknél is előnyösen alkalmazhatók. A beton nyomószilárdsága hajlított szerkezetek teherbírásiánál nem játszik jelentős szerepet, hajlított-nyomott szerkezeti elemeknél azonban, a nyomóerő mértékének növekedésével arányosan, előnyösen kihasználható. Ennek megfelelően a nagyszilárdságú beton kiválóan alkalmas helyszíni vagy előregyártott feszített vasbeton szerkezetek építéséhez.

A nagyszilárdságú betonok a hagyományos betonokhoz képest ridegebben viselkednek. Szokásos vasalás-elrendezés esetén az ilyen betonokból készült szerkezetek szívóssága kisebb. A megkívánt szívósság a megszo-
kotthoz képest sűrűbben elhelyezett, alacsony szilárdságú acélból készült kengyelek beépítésével érhető el.

A szerkezet rendeltetését illetően előnyös lehet a nagyszilárdságú betonok alkalmazása magasépületek, hidak, útburkolatok, tengeri létesítmények, tározók és csővezetékek építésénél. Az ilyen különleges betonok alkalmazásának célja elsősorban a szerkezet élettartamának növelése (ellenállás agresszív hatásokkal szemben, kopásállóság, stb.), a gazdaságosság (kisebb betonmerek, kevesebb acélbetét), a kisebb önsúly, a repedésérzékenység csökkenése (kisebb zsugorodás, kúszás, folyadékzárás) lehet.

5. A nagyszilárdságú betonok hazai előállításának problémái

A nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonok előállítására alkalmas korszerű betontechnológiák hazai elterjedése akadozik. Ennek alapvető okai a következők:

- a beruházók – a rossz beidegződések és hagyományok miatt – nincsenek meggyőződve arról, hogy a nagyszilárdságú betonokból készült szerkezetek előnyösebbek a hagyományos szerkezetekhez képest,
- a kivitelező vállalatok technológiája és személyi állományának felkészültsége – kevés kivételtől eltekintve – nem alkalmas a korszerű betontechnológia alkalmazására,
- az építési tenderek elbírálásának gyakorlata, mely általában a legalacsonyabb áron vállalkozó kivitelezőt részesíti előnyben, nem ösztönzi a vállalkozókat a műszaki fejlesztésre.

Az előzőekre való tekintettel a korszerű betontechnológiáknak és ezzel a nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonoknak széles körben való hazai elterjedéséhez radikális szemléletváltásra van szükség a betontervezés és készítés gyakorlatában.

6. Irodalom

- [1.] Szalai Kálmán: *A nagyszilárdságú beton a betontechnológia forradalma*, Közlekedés és Mélyépítéstudományi Szemle, XLV. évf. 1995. 3. szám
- [2.] Asztalos István: *A jobb és tartósabb betonhoz vezető út*, Beton, VI. évf. 1998. 10. szám
- [3.] Farkas Gy.–Szalai K.: *Nagyszilárdságú, nagy teljesítőképességű betonnal végzett kutatási eredmények I-II.*, Beton, IV. évf. 1996. 10. és 11. szám
- [4.] Farkas György: *Nagyszilárdságú betonok alkalmazása a szerkezetépítésben*, Közlekedés és Mélyépítéstudományi Szemle, XLV. évf. 1995. 3. szám
- [5.] F. de Larrard: *Mechanical material properties*, Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 1996. május 29-31., Párizs, Franciaország.
- [6.] M. Pigeon: *The Durability of High Strength/High Performance Concrete*, Part I.: General Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance (HS/HPC) Concrete, 1996. május 29-31., Párizs, Franciaország.