
	<u>Ultra nagy szilárdságú beton</u>	
Németül:	Ultrahochfester Beton (UHFB)	
Angolul:	Ultra high strength concrete (UHSC)	
Franciául:	Béton à ultra-hautes résistances en compression (BUHRC)	

Ultra nagy szilárdságúnak nevezzük a betont, ha tapasztalati jellemző értéke legalább mintegy 10 %-kal nagyobb, mint az MSZ EN 206-1:2002, illetve az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerinti C100/115 nyomószilárdsági osztályú közönséges beton és nehézbeton, vagy LC80/88 nyomószilárdsági osztályú könnyűbeton nyomószilárdságának előírt jellemző értéke. Átlagos nyomószilárdsága általában legalább 150 N/mm², és elérheti a 250, esetleg 300 N/mm² értéket. Az ultra nagy szilárdságú beton a nagyszilárdságú beton (C55/67 – C100/115, illetve LC55/60 – LC80/88) továbbfejlesztése, ezért tulajdonságai – amelyeket napjainkban is átfogóan kutatnak – sokban hasonlítanak a nagyszilárdságú beton ❖ tulajdonságaihoz.

Ultra nagy szilárdságú beton története

Ultra nagy, mintegy 200 N/mm² nyomószilárdságú betont először több mint 25 évvel ezelőtt a dán *Densit ApS* gyártott, például ipari padlók, repülőtéri pályák, benzinkutak, olaj és gáz szállítóberendezések, legutóbb szél erőművek alaptete stb. építése céljából, *Ducorit*[®] néven. Az utóbbi 15 évben Franciaországban kifejlesztett szálerősítésű ultra nagy szilárdságú betonnak (UHLFB: Ultrahochleistung Faserbeton) két változata van; az egyik a 0,6 mm legnagyobb szemmagyságú finombeton (a *Lafarge*, *Bouygues* és *Rhodia* cégek közös fejlesztése *Ductal*[®] néven), a másik a 6-8 mm legnagyobb szemmagyságú beton (az *Eiffage* cég fejlesztése BSI: Béton Spécial Industriel néven). Az utóbbi adalékanyagát nagyszilárdságú, zúzott, égetett bauxit képezi, amelyet CEM I típusú cementtel és szilikaporról összekeverve, *BSI*[®]/*Ceracem*-Premix néven gyárt és szállít az *Eiffage* és a *Sika* cég.

A híres sherbrooki (Kanada) híd 1989-ben épült, amelyet Franciaországban, Koreában és Japánban több is követett. A sherbrooki gyalogos híd pályalemeze és alsó öve C200 nyomószilárdsági osztályú betonból készült. A 60 m fesztávolságú híd hat előregyártott elemből áll, amelyeket utólag összefeszítettek.

Németországban ultra nagy szilárdságú, szálerősítésű betonból hidakat először 2004-ben Kassel környékén építettek a Kasseli Egyetem fejlesztése alapján (*1. és 2. ábra*). A zúzott kvarchomok legnagyobb szemmagysága 0,5 mm, a cement-tartalom 733 kg/m³, a szilikapor-tartalom 230 kg/m³, a víz-cement tényező 0,24, a víz-kötőanyag tényező 0,20, a víz-finomrész tényező 0,19 volt. (Finomrész alatt az összes 0,125 mm-nél finomabb szem értendő.) Az acélszál-tartalom 78 kg/m³ (1,0 térfogat%), a folyósító adalékszer-tartalom 28,6 kg/m³ volt. A fóliával letakart friss előregyártott elemeket 5 napon át 70 °C hőmérsékleten hőkezelték. A beton vizsgálata során 650±30 mm területű, Ø150·300 mm méretű próbahengereken 185 N/mm² átlagos nyomószilárdságot, 150·150·700 mm méretű próbahasábokon 18 N/mm² átlagos hajlító-húzószilárdságot és 7 N/mm² átlagos közvetlen húzószilárdságot mértek.



1. ábra: Gyalogos és kerékpáros híd a Nieste folyó felett, Kasselben, ultra nagy szilárdságú előregyártott feszített vasbetonelemből. Fesztávolság: 12 m, lemezvastagság: 10 cm, szegélymagasság: 40 cm. A 12 tonnás elemet autódaruval emelték a helyére.
Forrás: Schmidt, M. – Fehling, E., 2006



2. ábra: A Fulda folyó felett átívelő, 140 m hosszú Gärtner téri híd Kasselben, ultra nagy szilárdságú, szálerősítésű betonból készített, keresztirányban előfeszített, 5 m széles és 8,5 cm vastag pályalemezzel, és a pályalemezt alátámasztó, hosszirányban utófeszített övvel.
Forrás: Schmidt, M. – Fehling, E., 2006

Az ausztriai Kärntner megyében, Völkermarkt községben 2008. júniusában kezdtek hozzá a világ leghosszabb, 157 m hosszú, részben ultra nagy szilárdságú betonból készülő, 14 m széles közúti hídjának építéséhez (3. ábra). A híd átadásának tervezett időpontja 2009 ősze. A C165/185 nyomószilárdsági osztályú, szálerősítésű, ultra nagy szilárdságú betonból a 70 m hosszú, 6 cm fálvastagságú szekrénytartó-ívek készültek. (Freytag, B. – Sparowitz, L., 2008)



3. ábra: Az ausztriai Völkermarktban, a Mühlgraben (Malomárok) felett, részben szálerősítésű ultra nagy szilárdságú betonból épült közúti híd
Forrás: <http://www.arching.at>

További példákat a 4. és 5. ábrán mutatunk be.



4. ábra: Az 1998-ban, Ductal[®] típusú ultra nagy szilárdságú finombetonból épült Peace-gyalogoshíd Szöulban. Fesztávolsága 120 m, magassága 15 m, pályalemeze 4,3 m széles és 3 cm vastag, keresztmetszelve 1,1 m magas.

Forrás:

<http://87.230.81.56/imagineductal/home.php>

5. ábra: Klinker siló ultra nagy szilárdságú betonból készült tetőpanele. USA, Illinois szövetségi állam, Joppa. Épült 2001-ben. Forrás: <http://www.michigan.gov>

Tömörség, tartósság, zsugorodás, repedés

Az ultra nagy szilárdságú betont a nagy szilárdság mellett a rendkívül tömör szövetszerkezet jellemzi. Mind összes porozitása, mind kapilláris porozitása (0,1 μm feletti átmérővel) nagyon csekély. Ezáltal a transzport folyamatok a közönséges és a nagyszilárdságú betonhoz képest nagyon lassúak, és a repedés nélküli ultra nagy szilárdságú beton nagyon tartós. Tartósságára utaló módon megnevezésére szinonimaként az „ultra nagy teljesítőképességű beton” (angolul: „Ultra High Performance Concrete”, röviden: UHPC) kifejezést is használják.

A karbonátosodás előrehaladása egy év alatt kisebb, mint 0,1 mm, ezért – szemben a nagy szilárdságú betonokkal – az ultra nagy szilárdságú betonok esetén mérlegelhető az egyébként előírt betonfedések csökkentése. Káros anyag és a víz csak a kapillárisokon keresztül képes említésre méltó mértékben a beton belsejébe hatolni, ezért az ultra nagy szilárdságú beton az erős kémiai hatásoknak is ellenáll, és légbuborékok nélkül is igen fagy- és olvasztósó-álló. Az ultra nagy szilárdságú beton alkáli reakciójára (alkálifém-oxid – szilikát reakciójára) utaló jeleket eddig nem tapasztaltak.

A fiatal ultra nagy szilárdságú beton a kémiai átalakulás folytán zsugorodhat vagy duzzadhat, a hidratációs hő távozása és a kiszáradás következtében zsugorodhat \blacklozenge . Ezeket összefoglaló néven külső hatások nélküli, ún. autogén alakváltozásoknak hívják (Fontana, P. 2007). A kiszáradás (önkiszáradás) részben a hidratáció során lekötött víz felhasználásának, részben a pórusok relatív nedvesség-tartalma csökkenésének következménye. A vízhiány belső kiszáradáshoz vezet, amelyet külső térfogat csökkenés kísér. A teljesen vagy részben kiszáradt pórusokban olyan nagy nyomáscsökkenés lép fel, hogy a cementkő összehúzódik. A száradási zsugorodás csökkenő víz-cement tényező mellett rendszerint növekszik. A száradási zsugorodást a víz alatt tárolt és vízzel telített fiatal cementkő duzzadása csökkentheti. Miközben a fiatal beton felület-közeli kiszáradását megfelelő utókezeléssel általában meg lehet akadályozni, addig a fiatal ultra nagy szilárdságú beton zsugorodására a nagy cement-tartalom és a kis víz-cement tényező folytán a kémiai átalakulás és a hidratációs hő távozása a mértékadó. Az ultra nagy szilárdságú beton esetén jelentős a kiszáradás nélkül zajló kémiai (autogén) zsugorodás {lásd hidratáció \blacklozenge }, amely például 0,13 víz-kötőanyag

tényező esetén a beton 28 napos korában a 0,2 mm/m értéket is megközelítheti. Hasonló jelentősége van hidratációs hőfejlődésnek, amelynek hatására 350 – 400 kg/m³ cement-tartalom esetén a kezdetben 20 °C hőmérsékletű friss beton a megengedett felső korlátnak tekinthető 70 °C hőmérsékletre is felmelegedhet. A beton hülése közben a keresztmetszeti hőmérséklet-gradiens sajátfeszültségeket ébreszt, amelyek felület közeli repedéseket hozhatnak létre. A hidratációs felmelegedés kis víz-kötőanyag tényezővel, illetve kis hőfejlesztésű cement alkalmazásával csökkenthető.

Ha a zsugorodást valami akadályozza (például az adalékanyag, a zsaluzat, az illeszkedő építőelem stb.), akkor a fiatal betonban gátolt alakváltozásból eredő feszültségek ébrednek, amelyek repedéseket okozhatnak. A gátolt alakváltozásból eredő feszültségek a fiatal ultra nagy szilárdságú beton nagy ernyedési képessége következtében az első napokban csökkennek, majd növekszenek, és a beton esetleg megreped. Végérvényesen még nem tisztázták, hogy a repedésképződés az ultra nagy szilárdságú beton tartósságát csökkenti-e. Ha a nagyon vékony repedéseken keresztül víz hatol az ultra nagy szilárdságú beton szövetszerkezetébe, akkor kedvező esetben az utólagos hidratáció folytán a *repedések öngyógyulása* következik be. Kedvezőtlen feltételek mellett különböző károsodási folyamatok léphetnek fel, mint esetleg a másodlagos ettringit képződés vagy az alkáli szilikát reakció. Mind a két reakció betonkárosító duzzadási nyomásokat ébreszthet, és ezzel a beton tartósságát csökkentheti.

Az ultra nagy szilárdságú beton nagy tömörsége a tűzállóság szempontjából kedvezőtlen, mert a szabad és fizikailag kötött vízből képződő gőz távozása nehezebb, mint a kevésbé tömör közönséges vagy a nagyszilárdságú betonból. Nagy vízgőznyomás alakul ki, ami robbanásszerű lepattogzásokhoz vezet.



Az ultra nagy szilárdságú beton alapanyaga az adalékanyag, a kőliszt, a cement, a szilikapor, a folyósító adalékszer és a víz, esetleg a pernye, metakaolin, finom kohósalak őrlemény és az erősítő szál.

Adalékanyag

Ultra nagy szilárdságú betont finom vagy durva legnagyobb szemmagyságú adalékanyaggal lehet készíteni. A beton rendkívül kis ekvivalens víz-cement tényezőjére (víz-kötőanyag tényezőjére) és nagyon nagy nyomószilárdságára tekintettel az adalékanyag legfontosabb tulajdonsága a szemmegoszlás, a szemalak, a mechanikai, ásványtani tulajdonságok, az adalékanyag és cement közötti kémiai-fizikai kölcsönhatás, a kis keverési vízigény. Az adalékanyag szemmegoszlását úgy kell megtervezni, hogy a keverék tömörsége a lehető legnagyobb legyen. Az adalékanyag egyébként általában elégítse ki az MSZ EN 12620:2002+A1:2008 szabvány követelményét, Magyarországon az MSZ 4798-1:2004 szabvány figyelembevételével.

Bár korábban nem volt szokás, durva adalékanyaggal is lehet 150 N/mm²-t messze meghaladó nyomószilárdságokat elérni. A *durva adalékanyaggal* készült ultra nagy szilárdságú beton adalékanyagának legnagyobb szemmagysága > 1 mm, általában 8 vagy 16 mm. Megnevezése német nyelvterületen „grobkörniger UHFB”. Tapasztalatok szerint a durva adalékanyagú ultra nagy szilárdságú beton esetén is tömörök a fázishatárok, és hátrányos mikro-repedéseket nem tartalmaz. A szemalak zömök legyen. Míg az adalékanyag rugalmassági modulusának és a cementkő rugalmassági modulusának hányadosa közönséges és nagyszilárdságú beton esetén mintegy 3, addig ultra nagy szilárdságú beton esetén ne legyen több, mint 1,0-1,4.

Az eredetileg *finom adalékanyaggal* készült ultra nagy szilárdságú betont angolul „Reactive Powder Concrete”-nak (röviden: RPC), franciául „Béton de Poudres Réactives”-nek (röviden: BPR) nevezik, német megnevezése „feinkörniger UHFB” vagy „Reaktionspulverbeton”. Adalékanyagának legnagyobb szemmagysága ≤ 1 mm, általában legfeljebb 0,5 mm, és ennek ellenére „beton”-nak tartják.

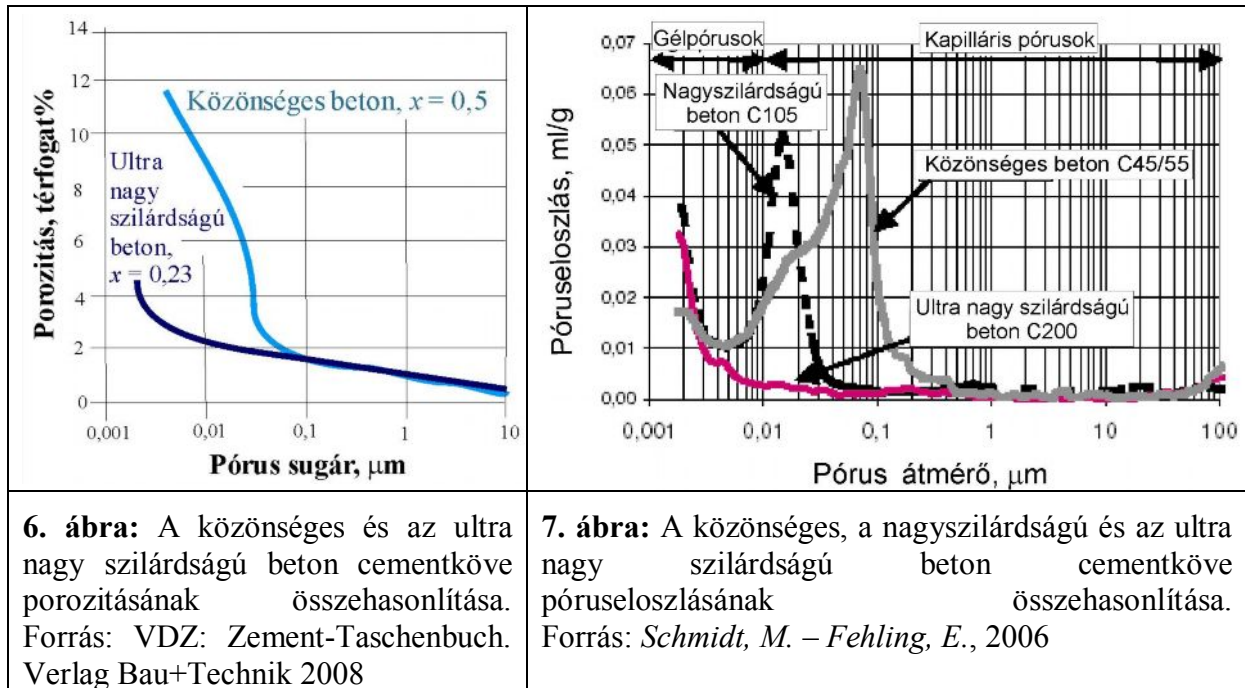
A *finom adalékanyagú* ultra nagy szilárdságú beton finom szemének (< 0,125 mm) mennyisége általában több mint 1000 kg/m^3 (kb. 350 – 400 liter/m³). A finom szem-tartalmat úgy kell összeállítani, hogy a finom beton tömörsége a lehető legnagyobb, porozitása a lehető legkisebb legyen. Ennek hátterében az áll, hogy a finom szemek (szem nagysága > 1 μm , Blaine-féle fajlagos felülete mintegy $3600 \text{ cm}^2/\text{g}$) hézagait kitöltő még finomabb szemek (szem nagysága < 1 μm , Blaine-féle fajlagos felülete mintegy $18000 \text{ cm}^2/\text{g}$) mennyiségét növelve egy adott részarányig a szemhalmaz tömörsége növekszik, majd e részarány fölött csökken, miközben a habarcs viszkozitása eleinte csökken (jobban folyik), majd növekszik (kevésbé folyik). Ismert, hogy zömök alakú (ideális esetben gömb alakú) szemek esetén a legjobb térkitöltést a Fuller-parabola \diamond adja. Az optimumot megkeresve a finom szemhalmaz hézagainak kitöltéséhez – a szemek felületét nedvesítő vízrétegtől elvonatkoztatva – kevés víz is elegendő. A szemalakra, illetve a kis keverési vízigényre való tekintettel az ultra nagy szilárdságú *finom* beton adalékanyaga általában kedvező szemalakú homok, bár újabban homok és zúzottkő, például bazalt őrléménnyel is készítettek ultra nagy szilárdságú betont.

Az 1 μm alatti finom szemek célirányos adagolásával azonban általában nem csak az 1 μm feletti finom szemek hézagtérfogata és ezáltal vízigénye csökken, hanem a finom szem keverék belső fajlagos felülete is megnövekszik. Ha az 1 μm feletti finom szemekhez a szükségesnél több 1 μm alatti finom szemet adunk, vagy a finom szem igen finom és belső fajlagos felülete igen nagy – mint például a szilikapor \diamond esetén –, akkor esetleg több vízre van szükség a szemek felületének nedvesítéséhez és az igen finom szemek hézagtérfogat növekményének kitöltéséhez, mint amennyi a teherhordó szemcseváz szerkezetéhez tartozna, és a kellenél több igen finom szem miatt is romlik a szemek közötti teherátadás. Ezért az 1 μm alatti igen finom szemek mennyiségét és a vízigényt korlátozni kell.

Cement

Az ultra nagy szilárdságú beton cement-tartalma általában $600 - 1000 \text{ kg/m}^3$, tehát a nagyon kis víz-kötőanyag tényező (nevezik módosított víz-cement tényezőnek, ekvivalens víz-cement tényezőnek, víz-cement tényező egyenértéknek is) miatt sokkal több, mint a közönséges (normál) vagy a nagyszilárdságú betoné. Ha az ultra nagy szilárdságú beton nagyon tömör, akkor 500 kg/m^3 -nél kisebb cement-tartalommal is elkészíthető.

A cementkő szükséges tömörségére követelmény érték nem ismert, de az irodalomban található higanypenetrációval (higany-poroziméterrel) felvett diagramok, amelyek a különböző szilárdságú betonok cementkőve porozitásának különbségét mutatják be (6. – 7. ábra). Ezek szerint az ábrák szerint a 0,1, illetve a 0,01 μm -nél kisebb pórusok tartományában jelentkezik a nagy porozitás különbség. Kutatóktól függ, hogy a 0,1 μm pórusnagyságot a makro-gélpórusok és a mikro-kapilláris pórusok határának, vagy a mikro-kapillárisok tartományába eső értéknek tekintik.



Kísérletek szerint előnyös, ha az ultra nagy szilárdságú beton trikálcium-aluminát (C_3A) szegény vagy mentes (szulfátálló), nem túl finomra őrölt portlandcementtel készül {lásd nagyszilárdságú beton ◀}. A nagyon finomra őrölt cement nagy vízigénye kedvezőtlen, ezért a 3000 – 4500 cm^2/g fajlagos felületű cement alkalmazását ajánlják. A cement átlagos nyomószilárdsága 54 – 64 N/mm^2 közé essék, azaz 42,5 vagy 52,5 nyomószilárdsági osztályú legyen. Általában CEM I típusú cementet alkalmaznak, de például Németországban CEM III/B 42,5 NW/HS jelű kis hőfejlesztésű, szulfátálló kohósalakcementtel, 12 tömeg% szilikapor-tartalom és $x = 0,2$ víz-cement tényező mellett, 20 °C hőmérsékleten tárolt beton próbatesteken, 28 napos korban 160 N/mm^2 beton nyomószilárdságot értek el (Schmidt et al., 2008).

Kiegészítőanyag

A nagy vagy ultra nagy szilárdságú beton szükséges tömörségét legkönnyebben II. típusú (rejtett hidraulikus tulajdonságú) kiegészítőanyag (szilikapor, metakaolin stb., lásd nagyszilárdságú beton és szilikapor ♦) adagolásával lehet elérni.

A szilikapor aktivitása folytán a cementkő részének tekintendő. Adagolása a cement-tartalomra vetített 10 – 25 tömeg% között mozog, bár a beton lúgosságát csökkenti, ezért 11 tömeg%-nál nagyobb adagolása nem ajánlott.

Az amorf metakaolin a cement hidratációja során keletkező kalcium-hidroxiddal (portlandittal) másodlagos kalcium-szilikát-hidrát fázist képez, miáltal a beton nyomószilárdsága csak kevéssé tér el a szilikapor-tartalmú ultra nagy szilárdságú beton szilárdságától.

A pernye bár rejtett hidraulikus tulajdonságú, II. típusú kiegészítőanyag, az ultra nagy szilárdságú betonban inkább csak a mészkölisztéhez hasonlóan töltőanyag szerepét tölti be.

A kőliszt inert, I. típusú kiegészítőanyag, amely a cementtel nem lép reakcióba, ezért általában töltőanyagként alkalmazzák. A kőliszt a hőkezelt ultra nagy szilárdságú betonban azonban a töltőanyag hatás mellett mégis hozzájárul a szilárdsághoz, mert kristályosodási csíra szerepét is betölti, leghatékonyabban akkor, ha szemnagysága 5 – 25 μm közé esik. Például a (kvarcliszt + szilikapor)/cement arány mintegy 0,62 legyen. Kvarcliszt adagolással kedvező tömörség esetén a nyomószilárdság akár 20 %-kal is megnőhet az ekvivalens víz-cement tényező csökkentése nélkül. Más megfogalmazásban, azonos nyomószilárdság és

ekvivalens víz-cement tényező mellett a kvarcliszt adagolással a cementnek mintegy 20 %-a megtakarítható.

Víz, víz-cement tényező

Az ultra nagy szilárdságú beton a kis víz-cement tényező ❖ ellenére jól folyósítható, szétosztályozódási és kivérzési hajlama csekély.

A beton nagy szilárdsága és tömörsége nagyrészt a csekély víz-kötőanyag tényezőnek (ekvivalens víz-cement tényezőnek) ❖ köszönhető. A nagy teljesítőképességű, nagy vagy ultra nagy szilárdságú betonok általában 0,25-0,30 alatti, sokszor 0,2 körüli víz-kötőanyag tényezővel készülnek, és így ha csak utólag nem vesznek fel vizet, akkor teljes mértékben nem tudnak hidratálódni. A teljes hidratációhoz – ha minden feltétel rendelkezésre áll – akár 10-100 évre is szükség van.

A víz-kötőanyag tényező optimumát a megszilárdult beton kizsaluzáskori testsűrűsége (ρ_0) és a szemhalmaz anyagsűrűsége (ρ_s) hányadosa ($k_{rel} = \rho_0 / \rho_s$) függvényében keresik. Kísérleti eredmények szerint a k_{rel} hányados akkor éri el a legnagyobb értéket ($k_{rel, max} = 0,87$), ha a víz-kötőanyag tényező értéke 0,13 – 0,15 közé esik, mert ekkor a legkisebb beton levegőtartalma. Újabb kutatások rámutatnak, hogy egyéb tényezők hatása folytán nagyobb víz-kötőanyag tényező mellett is lehet ultra nagy szilárdságú betont készíteni (Schmidt et al., 2008).

Az ultra nagy szilárdságú beton tömörségére nagy hatással van a finomanyag keverék hézagterfogata, amelynek megítélésére bevezették a víz-finomrész tényezőt. A víz-finomrész tényező a víz és a 0,125 mm alatti szemek (cement és az összes egyéb 125 μ m alatti finom szem) térfogatának $V_{víz}/V_{finomrész}$ vagy tömegének $M_{víz}/M_{finomrész}$ hányadosa. A legtömörebb térkitöltéshez tartozó optimális szemmegoszlást és finom szem-tartalmat számítással vagy kísérlettel lehet meghatározni, de a számítási módszerek csak közelítő eredményre vezetnek, mert ma még a valós eredményre vezető numerikus és anyagtani modellek (pl. a szemalak, a felületi érdesség stb. leírása) hiányoznak. A kísérletek hézagterfogat és viszkozitás mérésből állnak. Például azonos víz-cement tényező, nagy szilikapor adagolás, kis tömörség és $V_{víz}/V_{finomrész} = 0,51$ hányados mellett 500 mm terület és 155 N/mm² nyomószilárdságot, kisebb szilikapor adagolás, nagyobb tömörség és $V_{víz}/V_{finomrész} = 0,44$ hányados mellett 650 mm terület és 195 N/mm² nyomószilárdságot mértek.

Adalékszer, folyósítószer

A klasszikus betontechnológiát ❖ felváltó korszak kezdetén, amely a hatékony képlékenyítő és folyósító adalékszer ❖ megjelenésének időszaka, a beton folyósítószerként jórészt lignin-szulfonát (LS), naftalin-formaldehid-szulfonát (SNF vagy NFS) vagy melamin-formaldehid-szulfonát (MFS vagy SMF) bázison készültek. Ezek hatása arra épült, hogy a még alig vagy kissé hidratálódott klinkerásványok, illetve első hidratációs termékek – különösen az ettringit – felületén adszorbeálódnak (lekötődnek), miáltal a klinkerásványok, illetve hidratációs termékek felületén elektrosztatikus taszítás jön létre, ami a friss beton folyós állapotának lényeges feltétele, és lehetővé teszi a víz-cement tényező csökkentését. E „kezdeti generációs” folyósítószer vízcsökkentő hatása és hatásideje az ultra nagy szilárdságú betonok készítéséhez nem elegendő, erre a célra az ún. „új generációs” folyósító adalékszer, mint a szulfonált-vinilkopolimer (poliakrilát, PA) bázisú és a polikarboxilát (PC), illetve továbbfejlesztett változata, a polikarboxilát-éter (PCE) bázisú szuperfolyósítószer alkalmasak.

A szuper-folyósítószerre, különösen a polikarboxilát-éter bázisú folyósítószerre az jellemző, hogy alkalmazásukkal – szemben a „kezdeti generációs” folyósítószerekkel – a klinkerásványok közötti elektrosztatikus taszítóhatás némiképp háttérbe szorul, és elsődleges szerephez a molekulák közötti térbeli taszítás vagy távolságtartás (németül: sterischer Effekt, sterische Abstoßung, sterische Hinderung) jut. Általuk a vízmegtakarítás és a hatáside megnő,

a cementpép igen kis víz-cement tényező mellett is tömörre válik, a csökkent adszorpció folytán – amely főképp a trikálcium-aluminátra összpontosul – a hidratáció zavartalanabb.

Szálerősítés

A szerkezet építésben az ultra nagy szilárdságú beton nagy szilárdságának kihasználásához nagy vashányad vagy előfeszítés alkalmazása szükséges. Gyakran acélszalakat vagy nagyszilárdságú műanyagszalakat (például poli-vinil-alkohol szalakat, PVA) kevernek a betonba, miáltal akár az 50 N/mm² hajlító-húzószilárdságot is el lehet érni. Ha vasalás nélkül, csak acélszalak kerülnek a betonba, akkor általában nagy száladagolásra van szükség. Finomszemű ultra nagy szilárdságú beton esetén az ajánlott acélszal adagolás 2,5 – 3,5 térfogat%, a szálhosszúság 8 – 16 mm, az átmérő 0,1 – 0,2 mm, a szálhosszúság és az adalékanyag legnagyobb szemmagyságának hányadosa 10 legyen. Az acélszal nem csak a teherbírás, illetve a szívósság szempontjából hasznos, hanem csökkenti a repedésképződést és a repedéstágasságot is. A korai zsugorodás mérséklése és a tűzállóság szempontjából kedvező a poli-propilén szál, amelyet 0,3 – 0,6 térfogat% mennyiségben adagolnak az ultra nagy szilárdságú betonba. Előnyös a vegyes száladagolás, így a különböző hosszúságú acélszalak, illetve az acél- és például a poli-akril-nitril szalak együttes alkalmazása. A száladagolás a konzisztenciát és a szétosztályozódási (ülepedési) hajlamot a víz-kötőanyag tényező függvényében befolyásolja, a bedolgozhatóságot megnehezíti.

Ultra nagy szilárdságú beton készítése

Az ultra nagy szilárdságú betonból készített szerkezeti elemek – így az ultra nagy szilárdságú betonból épített hidak túlnyomó többsége is – külföldön eddig leggyakrabban előregyártással készültek. A kis keresztmetszeti méretek különlegesen karcsú szerkezeteket eredményeznek. A nyomott elemek keresztmetszete is csökkenthető, illetve terhelése növelhető.

Az ultra nagy szilárdságú beton készítésére jelenleg még nincs előírás. A 150 N/mm² feletti ultra nagy szilárdságú beton készítésének módjával az irodalom részletesen foglalkozik (*Schmidt, M. et al., 2008*). A nagyszilárdságú betonok ❖ betontechnológiai intézkedéseinek következetes alkalmazása – a víz-cement tényező csökkentése, a szilikapor alkalmazása, a mikro tartományban a tömörség fokozása – lehetővé teszi a nyomószilárdság növelését mintegy 200 N/mm²-ig.

Az ultra nagy szilárdságú beton összetételére példa az 1. táblázatban látható.

1. táblázat: Példa az ultra nagy szilárdságú beton összetételére

Összetevők	Finomszemű	Durvaszemű
	ultra nagy szilárdságú beton összetétele, kg/m ³	
CEM I 52,5 szulfátálló portlandcement	800	580
Víz	170	150
Kvarchomok, legnagyobb szemmagyság 0,5 mm	1020	355
2/8 mm szemmagyságú bazalt zúzottkő	–	710
0,09 mm alatti kvarcliszt	220	130
Szilikapor	135	175
Acélszal	–	195
Folyósító adalékszer	25	30

Az ultra nagy szilárdságú beton készítésekor mindenekelőtt a száraz összetevőket kell megkeverni, majd ezután kell a folyékony összetevőket a keverődobba juttatni. Ügyelni kell a csomósodás nélküli keverésre. Ha a beton szálerősítésű, akkor a szalakat – a tökéletes elkeveredés érdekében – a folyósítószer hatásának megjelenése után kell a keverékhez adni, és alaposan bekeverni. Előnyös lehet, ha a betont két ütemben keverik meg, először 6 m/s, majd a második ütemben 1,4 m/s keverési sebességgel. A keverési folyamatba 1-2 perc

pihentetési idő is beiktatható. A teljes szükséges keverési idő 10-15 perc. Az erőteljes keverés hatására a keverék nagyon felmelegedhet, ez rontja a bedolgozhatóságot és lerövidíti a bedolgozási időt, ami ellen az összetevők hűtésével lehet védekezni.

A *vákuumban való keveréssel* csökkenthető a friss beton levegő-tartalma, ugyanakkor a vibrálással történő utólagos levegő eltávolítás az ultra nagy szilárdságú beton gyakran ragadós konzisztenciája miatt kevésbé hatásos. A vákuum akkora legyen, hogy 30 °C keverési hőmérséklet mellett a víz jelentősen még ne párologjon.

Az ultra nagy szilárdságú beton szivattyúzható. Szabad eséssel nem szabad a zsaluzatba juttatni.

A zsaluzat tömör és tömített kell legyen, és ellen kell álljon a nagy folyadék nyomásnak.

Ha a friss ultra nagy szilárdságú beton ragadós, tapadós konzisztenciájú, akkor a tömörítéshez az átlagosnál több energia szükséges. A kis levegő-tartalmú, öntömörödő konzisztenciájú betont alig kell tömöríteni. Ha a levegő-tartalom kihajtása a cél, akkor az kis frekvencián és kis amplitúdával történjék. Ez utóbbi esetben a tömörítési idő általában hosszabb, mint a közönséges beton esetén. Előregyártó üzemben az ultra nagy szilárdságú betont külső vibrátorral, újabban tűvibrátorral is szokás tömöríteni. Helyszíni betonozás során a tömörítés a szokásos eszközökkel történhet.

A friss helyszíni ultra nagy szilárdságú beton felületének megmunkálása a friss beton ragadósága miatt körülményesebb, utókezelése nagyobb körültekintést igényel, mint az előregyártott betoné. A sima felület kialakításához sokszor nem elegendő az egyszerű lehúzás, de bevált a kis frekvencián járatott könnyű vibropalló megfelelő időbeni alkalmazása: ha a friss beton még nem kötött eléggé meg, akkor a felület felszakad. Ha viszont a beton utókezelése nem megfelelő és a beton már megdermedt, akkor a felület már alig munkálható meg.

Ha a szabad felületet nem védjük meg a kiszáradástól és a napsugárzástól, akkor a felület a kis víz-tartalom és a nagy finomrész-tartalom folytán egyenetlen, ún. „elefántbőrös” lesz és korai, képlékeny vagy kapilláris zsugorodás is felléphet. Célravezető utókezelés a felület azonnali légmentes betakarása vagy állandó nedvesen tartása. Különösen előnyös, ha a föliatakarás felhelyezése előtt a felületre utókezelőszert hordunk fel, mert ezáltal nemcsak az „elefántbőr” képződése, hanem a korai zsugorodásból származó felületi repedések keletkezése is megelőzhető.

Hőérleléssel vagy nyomás alatti szilárdítással a természetes érlelésnél nagyobb szilárdságokat lehet elérni.

A *hőérlelés* legszokásosabb módja szerint a betont egy-két napos pihentetés után 48 órán át, kiszáradásmentesen 70-90 °C hőmérsékletű levegőn tárolják, és így a cement hidratáció sebességét felgyorsítva a beton akár el is érheti a végszilárdságát. A 60 °C hőmérséklet feletti korai hőkezelés hatására a cement trikálcium-aluminát ásványa és a kötés-szabályozó kalciumsulfát (gipszkő) nem ettringitté (trisulfáttá) és monosulfáttá {lásd cement hidratációja ❖}, hanem a kalcium-szilikát-hidrát kevésbé stabil változatává alakul, és a szabadon maradt szulfát később nedvesség jelenlétében káros, repesztő-hatású másodlagos ettringitet képezhet. Tapasztalatok szerint trikálcium-aluminát szegény cementtel készülő, igen tömör ultra nagy szilárdságú beton esetén ez a veszély nem áll fenn, ha a friss betont hőkezelés előtt egy napig környezeti hőmérsékleten pihentetik.

A 90 °C feletti hőmérsékleten való szilárdítással és a *nyomás alatti szilárdítással* eddig csak kevés tapasztalat van. (*Schmidt, M. et al., 2008*)

Felhasznált irodalom

- MSZ 4798-1:2004 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés. Az MSZ EN 206-1 és alkalmazási feltételei Magyarországon
- MSZ EN 206-1:2002 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés
- MSZ EN 12620:2002+A1:2008 Kőanyag-halmazok (adalékanyagok) betonhoz
- DIN 1045-2:2001 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- Fontana, P.: Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 570. Beuth Verlag GmbH., Berlin, 2007
- Freytag, B. – Sparowitz, L.: WILD-Brücke – UHPC in der Praxis als Ergebnis der Forschung. Forschung & Entwicklung für Zement und Beton. Kolloquium 2008. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Kurzfassungen der Beiträge
- Schmidt, M. – Fehling, E.: Grundlagen der Betontechnologie von Hoch- und Ultrahochleistungsbeton und Anwendung von UHPC im Brückenbau. Der Tagungsband Seminar der Vereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure in Hessen e. V. am 05.04.2006. pp. 1-11.
- Schmidt, M. et al.: Ultrahochfester Beton. Sachstandbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 561. Beuth Verlag GmbH., Berlin, 2008
- Zement-Taschenbuch Verein Deutscher Zementwerke e. V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Düsseldorf, 2008.

Jelmagyarázat: ❖ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

A cikk eredeti változata megjelent a		2009. október havi számának 12-14. oldalán (1. rész) és a 2009. november-december havi számának 14-17. oldalán (2. rész)
--------------------------------------	---	--

Vissza a

Noteszlapok abc-ben

Noteszlapok tematikusan



tartalomjegyzékhez



Vissza a **Fogalmak** könyvtár tartalomjegyzékéhez