



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK
1111 Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3.

Tel: 463-4068 • Fax: 463-3450 • WEB <http://www.epito.bme.hu/en/> • E-mail: titkars@ek.bme.hu


JELENTÉS

POLISZTIROLBETON TŰZ, HŐ- ÉS PÁRATECHNIKAI LABORVIZSGÁLATA

1. rész: Polisztirol betonok tűzvizsgálata

Megbízó: ICL Kft.
Székhely: 6000 Kecskemét, Mátyás Király krt. 52.

Készítették:


Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva
egyetemi docens


Dr. Hlavička Viktor
adjunktus

Biró András
tanszéki mérnök


Dr. Nagy Balázs
adjunktus


Dr. Dunai László
tanszékvezető

Budapest, 2020. november 14.

Tartalom

1. BEVEZETÉS	3
2. SZAKIRODALOM.....	4
2.1 Betonok viselkedése tűzterhelésre.....	4
2.1.1. A beton kémiai és fizikai változása hőterhelés hatására	4
2.1.2. A betonfelület réteges leválása.....	9
2.2 Könnyűbetonok viselkedése magas hőmérsékleten	14
3. KÍSÉRLETI MÓDSZER.....	19
3.1 Tűzállóság	19
3.1 Nyomószilárdság.....	20
4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK.....	21
4.1 Szemrevételezés a tűzterhelés után	21
4.2 Nyomószilárdság alakulása a hőterhelés után	21
5. ÖSZEFoglalás	24
6. IRODALOM	25

1. BEVEZETÉS

Az **ICL Kft.** megbízta a **BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékét**, hogy elvégezze a cég által gyártott polisztirolbeton tűz, hő- és páratechnikai laborvizsgálatát.

A feladat során a következő részfeladatokat végeztük el:

- próbatestek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata,
- hővezetési tényező mérése,
- szorpciós izoterma meghatározása.

2. SZAKIRODALOM

2.1 Betonok viselkedése tűzterherre

A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak, sőt a beton a lehűlés után sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, tönkremegy.

A betonszerkezetek tönkremenetele alapvetően két okra vezethető vissza (*Kordina, 1997*):

- (1) a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására,
- (2) a betonfelület réteges leválására.

2.1.1. A beton kémiai és fizikai változása hőterhelés hatására

A betonban lejátszódó kémiai folyamatok alakulását a hőmérséklet növekedésének hatására termoanalitikai módszerekkel (TG/DTG/DTA) vizsgálhatjuk. A TG (termogravimetriás) és a DTG (derivált termogravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése lehetséges. A DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel nyomon követhetjük a mintákban a hőmérséklet növekedésének hatására bekövetkező exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulását.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten függ (*Thielen, 1994*):

- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete és ásványtani összetétele megváltozik, a betonban lejátszódó kémiai folyamatok a *2.1. ábrán* láthatók.

100 °C körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) bomlása 50 °C és 110 °C között következik be. 200 °C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegveszteség újabb kismértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztesége eltérő lesz egészen addig, amíg a pórusvíz és a kémiaiilag kötött víz eltávozik. A kiinduló

nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség 250°C-300 °C között már nem érzékelhető (*Khoury, Grainger, Sullivan, 1985*).

beton megolvad 1400°C

megkezdődik a beton olvadása

kerámiai kötés felbomlása

kalcium-karbonát hőbomlása 800°C

kűszás erőteljes növekedése

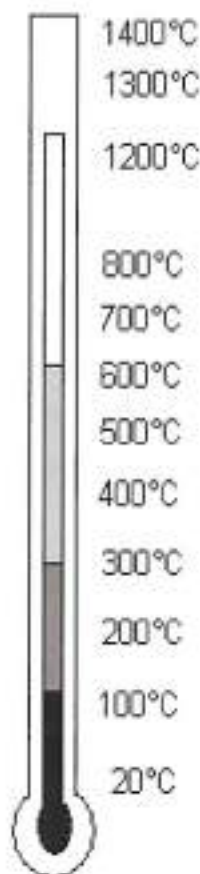
kvarc térfogat növekedéssel járó

átkristályosodása 573°C

kalcium-hidroxid dehidratálódása

**a beton szilárdságvesztésének kezdete
400°C**

kémiaailag kötött víz távozásának
kezdete – 100°C



2.1. ábra: Fizikai és kémia változások a beton melegedése során (*Niels, 2005*)

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}\uparrow$). Ez a víz eltávozásával járó változás hőelnyelő reakcióval jár. Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz (*Schneider, Weiss, 1977*).

A közönséges betonok esetén a kvarc $\alpha \rightarrow \beta$ kristályátalakulása 573 °C-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár (*Waubke, 1973*), ami a beton lényeges károsodását eredményezi. Ettől a ponttól a beton nem teherhordó.

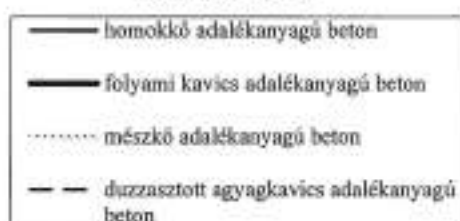
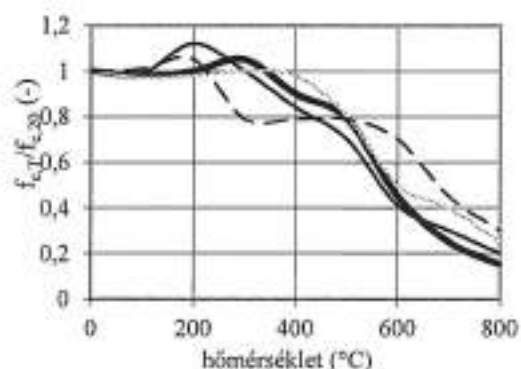
700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel jár (*Hinrichsmeyer, 1987*). Ez a folyamat mind a könnyű-, mind a normálbetonok esetén lejátszódik, és jelentős szilárdságcsökkenést okoz.

A beton pórusszerkezete három részből áll: a cementkő porozitása, az adalékanyag felülete és a cementkő közötti (kontaktzóna) porozitás, valamint az adalékanyag porozitása. (Az utóbbi csak nagy porozitású adalékanyagoknál játszik szerepet, pl.: könnyűbetonoknál).

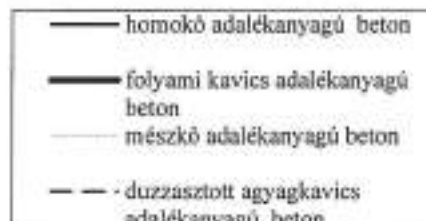
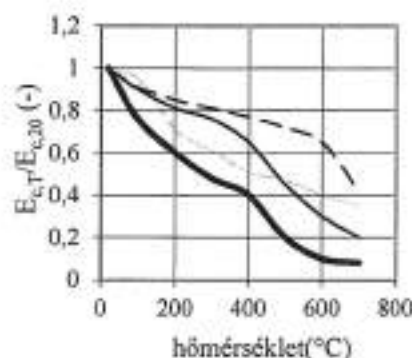
A kvarckavics adalékanyagú betonoknál 150 °C-ig a cementkő porozitása, valamint az adalékanyag és a cementkő közötti kontaktzóna porozitása nő. A kontaktzónában 150 °C-ig repedések keletkezhetnek, amit az adalékanyag és cementkő különböző hőtágulásával magyarázhatunk. A cementkő struktúrája 450 °C-ig stabil, de mikrorepedések már e hőmérséklet alatt is kialakulhatnak. 450 °C-550 °C között azonban a portlandit bomlása miatt a pórusok száma megnő. Ezután 650 °C-ig a cementkő felépítése nem változik. E felett a CSH vegyületek bomlása megkezdődik és a kapillárisok száma megnő. 750 °C felett a pórusok átmérője nagymértékben növekszik. A mikrorepedések mérete nagymértékben függ az adalékanyag legnagyobb szemnagyságától (*Hinrichsmeyer, 1987*).

A beton szilárdsági jellemzőinek magas hőmérséklet hatására bekövetkező változását legnagyobb mértékben az adalékanyag típusa határozza meg. (*Schneider, 1986; Houry et al, 2001*). *Schneider (1986)* alapján a 2.2. és a 2.3. ábrán jól látható, hogy az adalékanyag típusa jelentősen befolyásolja a beton magas hőmérsékleten való viselkedését: minden adalékanyag típushoz jellegzetesen más viselkedés tartozik. Ennek legkézenfekvőbb magyarázata, hogy a különböző adalékanyagok alakváltozása a hőmérséklet függvényében eltérő (*Niels, 2005*).

A nyomószilárdság vizsgálatát ebben a kísérletsorozatban is szobahőmérsékletre visszahűlt állapotban végezték, mivel a melegen vizsgált próbatestek maradó nyomószilárdsága nagyobb, mint a szobahőmérsékleten vizsgáltaké (*Schneider, 1986*). A nyomószilárdság-hőmérséklet összefüggés diagramján (2.2. ábra) 200 °C-ig nem olvasható le egyértelmű tendencia. A kvarckavics és a mészkő adalékanyagú betonok esetén kezdeti szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amit átmeneti szilárdságnövekedés követ. Az átmeneti szilárdságcsökkenésre logikus magyarázatot nyújthat a cementkő és az adalékanyag különböző hőtágulási együtthatója (*Hinrichsmeyer, 1987*). A cementkő és az adalékanyag hőtágulása miatt az adalékanyag szemcsék és a cementkő határfelületén mikrorepedések keletkeznek. A hőmérséklet emelkedése során az adalékanyag növekvő hőtágulása miatt ezek a repedések záródnak.



2.2. ábra: A beton relatív maradó nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten az adalékanyag típusától függően (Schneider, 1986)



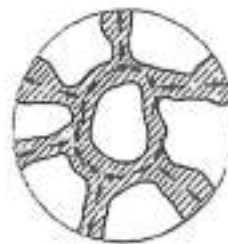
2.3 ábra: A beton relatív maradó rugalmassági modulusának változása magas hőmérsékleten az adalékanyag típusától függően (Schneider, 1986)

400 °C-ig a nyomószilárdság értékei csökkenő tendenciát mutatnak, a fellépő szilárdságcsökkenést a cementmátrix berepedezésével magyarázhatjuk. 400 °C felett a különböző adalékanyagú betonok szilárdsági értékeinek alakulását külön kell tárgyalni, mivel lényegesen eltérő tendenciát mutatnak. A kvarckavics adalékanyagú betonok szilárdságcsökkenése 550 °C-ig megközelítőleg 40%, a duzzasztott agyagkavics esetén ez a szilárdságcsökkenés jóval kisebb, mintegy 20%. A szilárdságcsökkenést 450 °C—550 °C között a portlandit bomlása, valamint az adalékanyag és a cementkö eltérő hőtágulása okozza.

A beton maradó nyomószilárdságát nagymértékben befolyásolja a beton alkotóelemei közötti teherátadás módja. A teherátadási mód a beton egyes alkotóelemeinek egymáshoz viszonyított szilárdsági és merevségi viszonyaitól függ. A nyomásból származó igénybevételek a nagyobb szilárdságú és nagyobb merevségű összetevőn keresztül adódnak át. A teherátadás módja lényegesen különböző a kvarckavics adalékanyagú és a könnyű adalékanyagú betonok esetén (2.4. a). és b) ábra).



a) kvarckavics adalékanyag esetén

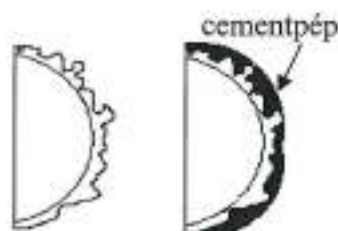


b) könnyűbetonok esetén

2.4. ábra: A belső teherátadás módja (Romić, Lazić, 1985)

A kvarckavics adalékanyagú betonnál a habarcsréteg közvetíti az adalékanyag szemcsék között a teher jelentős részét, de a teherviselés elsősorban az adalékszemcsék feladata. A szokványos betonok hőterhelésre történő tönkremenetele a kontaktzónában következik be, amit az adalékanyag és a cementkő rugalmassági modulusának eltérése, illetve az adalékanyag felületén lerakódott portlandit (kalciumhidroxid) és ettringit réteg dehidratációja okoz. Az adalékanyag felületén vékony vízréteg válik ki, itt kristályosodnak ki a portlandit, valamint az ettringit ásványok. A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséken keresztül futnak, ezért a közönséges betonok nyomószilárdság értékét alapjában véve a cementkő-váz szilárdsága korlátozza. A nagyszilárdságú betonok viselkedése ettől jelentősen eltér: a kalcium-hidroxid a szilikaporrall reakcióba lép és kalcium-szilikahidrát képződik, ami az adalékanyag szemcsék felületén lerakódott réteg (kontaktzóna) szilárdságát növeli. Emiatt a nagyszilárdságú betonok jellemző tönkremeneteli helye nem a kontaktzóna, hanem az adalékanyag szemcsék széthasadása (hasonlít a könnyűbetonra).

A könnyűbetonban az adalékanyag könnyebben összenyomható, a teherviselés elsődlegesen a habarcsváz feladata. Az adalékanyag szemcsék csak kis mértékben vesznek részt a teherviselésben (Ujhelyi, 1995; Ujhelyi, 2005; Faust, 2000). A teherátadás módjának megváltozását az okozza, hogy a cementkő és a könnyű adalékanyagok rugalmassági modulusa jóval közelebb van egymáshoz, mint a kvarckavics és a cementkő rugalmassági modulusa. Könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezete miatt a kontaktzóna lényegesen nagyobb szilárdságú, mint a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén. Az adalékanyag porózus felülete miatt az adalékanyag felületén levő pórusokba a cementpép behatol (2.5. ábra), és egy fogazással ellátott erős kapcsolat alakul ki (Nemes, 2006). Az adalékszemcsék pórusaiba behatolt cementpép mennyisége az adalékanyag mikrostruktúrájától, a cement finomságától, illetve a cementpép viszkozitásától függ (Zhang, Gjørsv, 1990). A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséi körül futnak.



2.5. ábra: Az adalékanyag felületének porózus szerkezete duzzasztott agyagkavics esetén
(Faust, 2003)

700°C fölött az adalékanyagtól függetlenül minden beton esetén további jelentős szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amit a CSH-vegyületek átalakulása okoz.

A beton rugalmassági modulusa – a nyomószilárdsághoz hasonlóan – hőmérséklet növekedésével folyamatosan csökken (2.3. ábra). A hőterhelés hatására a betonok közül a könnyűbetonok rugalmassági modulusa csökken a legkisebb mértékben. A legnagyobb mértékű csökkenést a kvarckavics adalékanyagú beton rugalmassági modulusa mutatja: itt a csökkenés már 100 °C-on 33% körüli érték; 400 °C-ig további csökkenés következik be mintegy további 20 %-kal csökken a rugalmassági modulus értéke; 400 °C-550 °C között jelentősebb, mintegy újabb 30 %-os csökkenés figyelhető meg; 600 °C felett a görbe enyhén eső tendenciát mutat. A 100°C-ig bekövetkező drasztikus csökkenést a pórusokból távozó víz és a repedések képződése okozza. A rugalmassági modulus jóval nagyobb mértékű csökkenést mutat, mint a nyomószilárdság (Hinrichsmeyer, 1987).

A beton hajlító-húzószilárdsága a nyomószilárdsághoz hasonlóan szintén nagymértékben függ az adalékanyag típusától. A hajlító-húzószilárdság szobahőmérsékleten mért értéke acélszál és üvegszál adagolás esetén nő, azonban a hőterhelés hatására bekövetkező relatív szilárdságcsökkenés értékét a száladagolás nem, vagy csak kis mértékben befolyásolja.

2.1.2. A betonfelület réteges leválása

A betonfelületek réteges leválásának két oka lehet:

- (1) a betonból távozó vízgőz lefeszíti a felületi rétegeket;
- (2) a terhelt zóna már nem tudja a hőtágulásból származó újabb erőket felvenni és lemorzsolódik, leválik.

A nagyszilárdságú betonok felületének leválását általában a hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező feszültségek okozzák; normálbetonok esetén általában a betonból távozó vízgőz feszíti le a felületi rétegeket. A betonfelület leválásának mechanizmusát a 2.6. ábrán láthatjuk: a betonfelület egyik oldalát hőterhelés éri, a betonból távozó vízgőz hatására egy vízgőzzel telített réteg alakul ki, ahol a vízgőz nyomása egyre nő és lefeszíti a betonrétegeket.

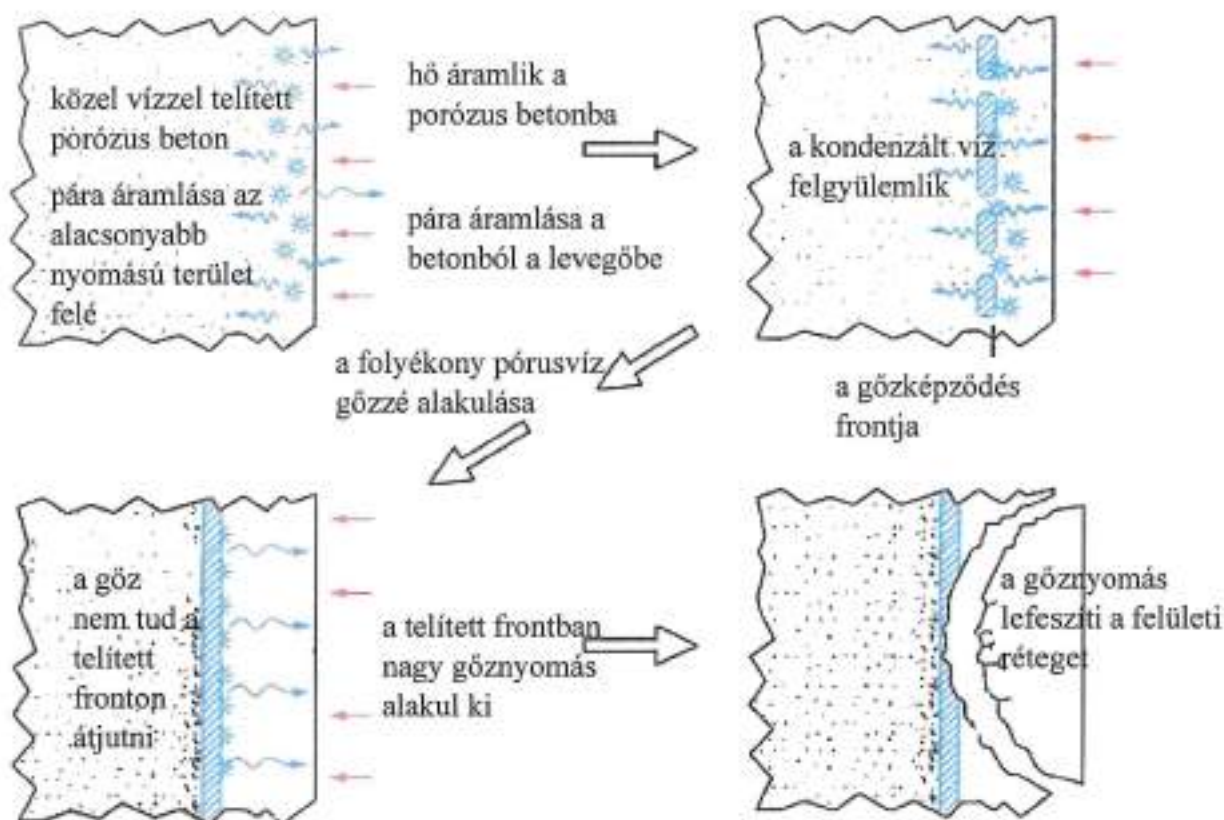
A betonfelület réteges leválásának az esélyét a következő tényezők befolyásolják:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasbetétek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, a polipropilén száladagolás, az acél szálerősítés, a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága (Silfwerbrand, 2004).

A betonra átadódó nyomóerő függvényében változik a felület réteges leválásának esélye (2.7. ábra). Kisebb nyomóerő esetén kisebb keresztmetszeti méret előírása is elegendő a beton felület réteges leválásának megakadályozására. A 2.7. ábrán feltüntetett szükséges betonfedési értékek függetlenek a hőterhelés mértékétől és az időtartamától.

Alagutak esetén fontos, hogy a betonfelületek réteges leválása tűz esetén lehetőség szerint ne következzen be. Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye műanyagszálak alkalmazása esetén lényegesen kisebb, mivel a szálváz kiégése során létrejövő pórusszerkezet a szétrepedés veszélyét csökkenti (Richtlinie, 2005; Dorn, 1993).

Mörth, Haberland, Horvath és Mayer (2005) alagútelemekekkel (hosszúság 11 m, magasság 2 m) végzett kísérletei igazolták, hogy a polipropilén szálakkal erősített betonok felületének réteges leválása a tűz hatására (1200°C-os hőterheléscsúcsán) nem következett be (2.8. és 2.9. ábra).

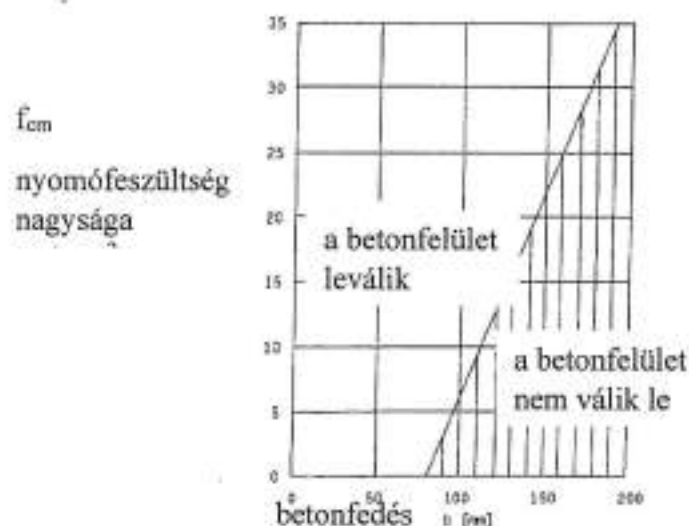


2.6. ábra: A betonfelület leválásának mechanizmusa

(Winterberg, Dietze, 2004)

Hasonló eredményre jutott Ausztriában egy másik kutatócsoport is (Waltner, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005), amely nyomott lemezeket vizsgált. A hagyományos betonnál két órás tűzterhelés hatására következett be a betonfelület réteges leválása, a polipropilén száladagolással készített lemez esetében viszont ez nem volt észlelhető (2.10. és 2.11. ábra).

Lényeges kérdés azonban, hogy – mindezen előnyös tulajdonságok mellett – a szálerősítésű beton nyomószilárdságának csökkenése se legyen drasztikus a szokványos betonhoz képest. Horiguchi (2005) a szálerősített betonok nyomószilárdságát vizsgálta magas hőmérsékleti tartományokban (2.12. ábra). A nyomószilárdságot 100 mm átmérőjű, 200 mm magas hengereken, szobahőmérsékletre visszahűlve vizsgálta. A felfűtés sebessége 10°C/perc volt, a próbatesteket 1 órán át tartotta az adott hőmérsékleten. Az alkalmazott beton víz-cement tényezője 0,3 volt (583 kg/m³-es cementadagolással). Az első beton szálerősítés nélkül, készült, a második 0,5 V%-os polipropilén száladagolással, a harmadik 0,5 V%-os acélszáladagolással, a negyedik 0,25 V%-os polipropilén és 0,25 V%-os acélszáladagolással készült.



2.7. ábra: A betonfelület réteges leválásnak tartománya (MSZ EN 1992-1-2)
(Érvényes lemezek, gerendák, falak és oszlopok nyomott zónáiban lévő kisebbik keresztmetszetre.)

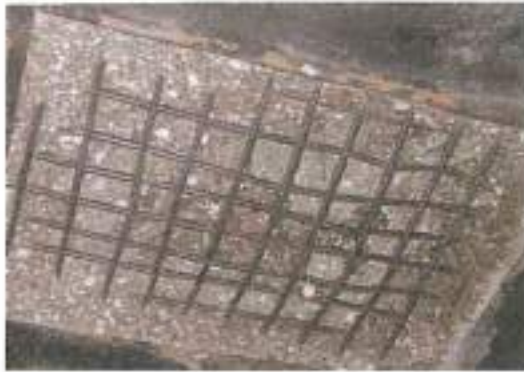


2.8. ábra: Száladagolás nélkül készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után



2.9. ábra: 2 kg/m³ polipropilén száladagolással készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után

(Mörth, Haberland, Horvath és Mayer, 2005)



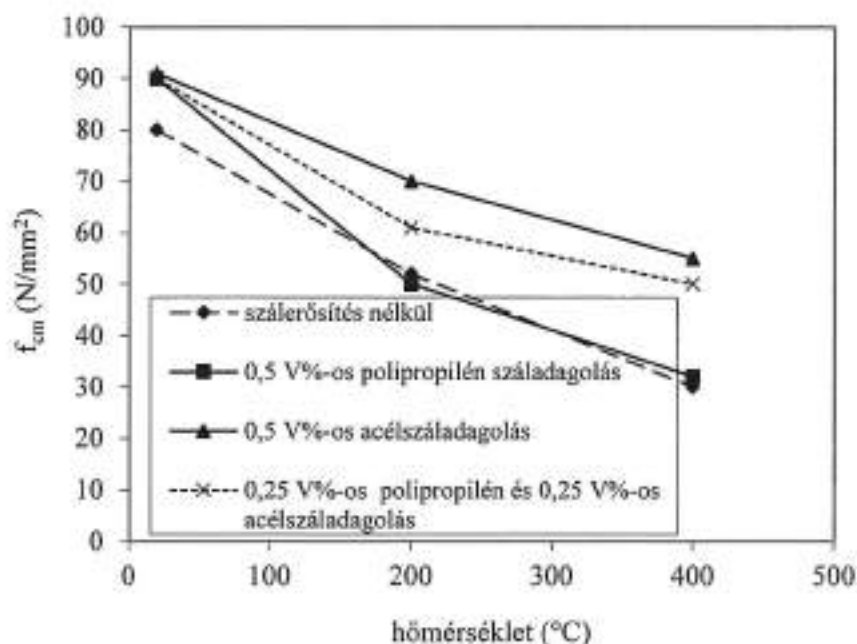
2. 10. ábra: Száladagolás nélkül készült
lemez felülete 2 órás tűzteher után



2. 11. ábra: Műanyag száladagolással
készült lemez felülete 2 órás tűzteher után

(Waltner, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005)

A nyomószilárdság értékei a szálerősítés nélküli és a szálerősítésű betonok esetén hasonló tendenciát mutatnak. A szálerősítés nélküli és a műanyag száladagolású betonok esetén jóval alacsonyabb értékek figyelhetők meg a 200°C-os, illetve a 400°C-os hőterhelést követően, mint az acélszál, illetve a hibrid (0,25 V%-os polipropilén és 0,25 V%-os acél) száladagolás esetén. A fokozott szilárdságsökkenést a műanyagszálak alkalmazása esetén műanyagszál-váz kiégése, valamint a kiégés során megnövekedett porozitás okozhatja.

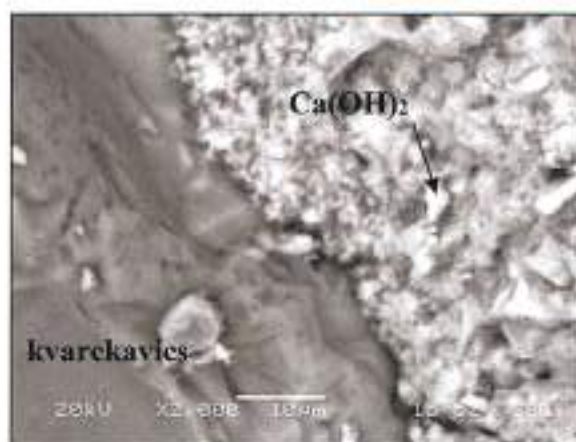
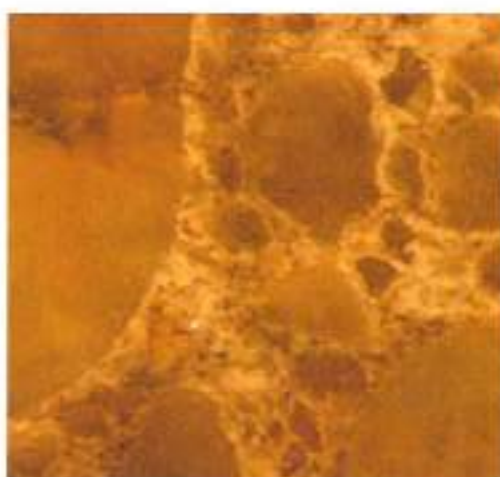


2.12. ábra: A szálerősítésű betonok nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten

(Horiguchi, 2005)

2.2 Könnyűbetonok viselkedése magas hőmérsékleten

A kvarckavics adalékanyagú betonnál a habarcsréteg közvetíti az adalékanyag szemcsék között a teher jelentős részét, de a teherviselés elsősorban az adalékszemcsék feladata. A normál betonok hőterhelésre történő tönkremenetele a kontaktzónában következik be, amit az adalékanyag és a cementkő rugalmassági modulusának eltérése, illetve az adalékanyag felületén lerakódott portlandit (kalcium-hidroxid) és ettringit réteg dehidratációja okoz. Az adalékanyag felületén vékony vízréteg válik ki, itt kristályosodnak ki a portlandit, valamint az ettringit ásványok (2.13. ábra).



N 2000



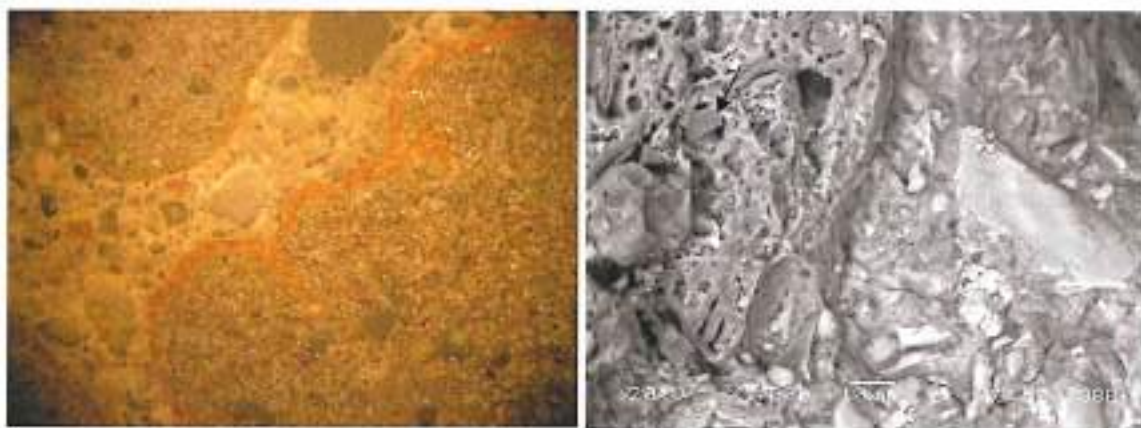
N 500

2.13 ábra: 20°C-on a kvarckavics adalékanyaggal készült beton (elektronmikroszkópos felvétel)

A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséken keresztül futnak, ezért a normál betonok nyomószilárdság értékét alapjában véve a cementkő-váz szilárdsága korlátozza. A nagyszilárdságú betonok viselkedése ettől jelentősen eltér: a kalcium-hidroxid a szilikaporról

reakcióba lép és kalcium-szilikahidrát képződik, ami az adalékanyag szemcsék felületén lerakódott réteg (kontaktzóna) szilárdságát növeli. Emiatt a nagyszilárdságú betonok jellemző tönkremeneteli helye nem a kontaktzóna, hanem az adalékanyag szemcsék széthasadása és ebben hasonlít a könnyűadalékos betonra.

A könnyűbetonban az adalékanyag szilárdsága kisebb, a teherviselés elsődlegesen a habarcsváz feladata. Az adalékanyag szemcsék csak kis mértékben vesznek részt a teherviselésben (Ujhelyi, 1995; Ujhelyi, 2005; Faust, 2000). A teherátadás módjának megváltozását az okozza, hogy a cementkő és a könnyű adalékanyagok rugalmassági modulusa jóval közelebb van egymáshoz, mint a kvarckavics és a cementkő rugalmassági modulusa. Könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezete miatt a kontaktzóna lényegesen más szerkezetű, mint a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén (2.14 ábra). Az adalékanyag porózus felülete miatt az adalékanyag felületén levő pórusokba a cementpép behatol és egy fogazással ellátott erős kapcsolat alakul ki. Az adalékszemcsék pórusaiba behatolt cementpép mennyisége az adalékanyag mikrostruktúrájától, a cement finomságától, illetve a cementpép viszkozitásától függ (Zhang, Gjorv, 1990). A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséi körül futnak.



2.14. ábra: Az adalékanyag felületének porózus szerkezete duzzasztott agyagkavics esetén

A könnyűbetonok alkalmazásakor a tűzterherre való méretezés során körültekintően kell eljárni: az adalékanyag megfelelő kiválasztása és az adalékanyag viselkedésének ismerete nagyon lényeges kérdés.

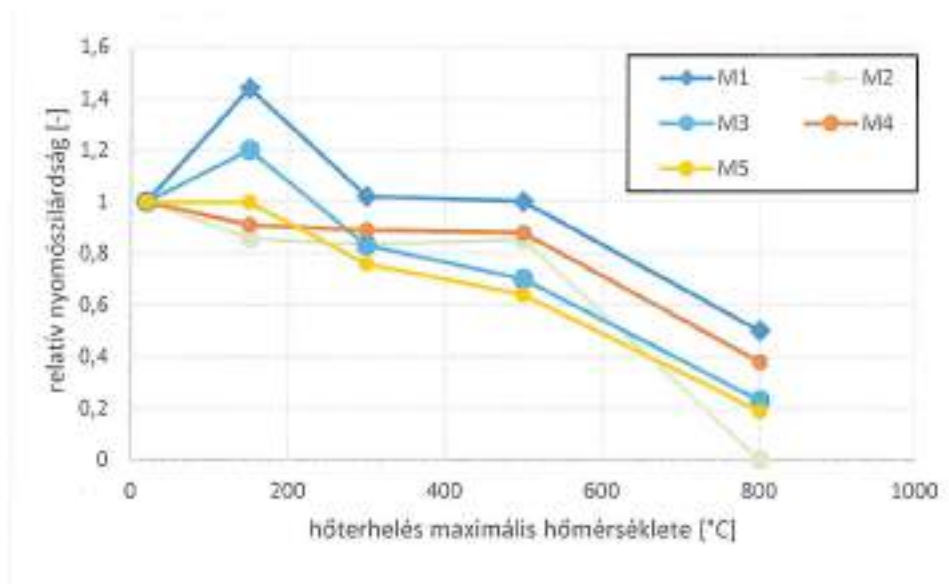
Laboratóriumi vizsgálatainkhoz 5 különböző könnyűadalékos betont vizsgált 20 °C, 50 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C és 800 °C hőterhelést követően.

A hőterhelés utáni szemrevételezés alapján megállapították, hogy a kisebb szilárdságú adalékanyaggal készült a próbatestek 800 °C-os hőterhelés követően elszíneződtek, alacsonyabb hőmérsékletű hőterhelés esetén nem figyeltek meg elszíneződést. A nagyobb szilárdságú adalékanyaggal készült próbatestek a 800 °C hőterhelés alatt a kemencében a belső feszültség hatására darabjaira hullott, ezek alapján ezzel az adalékanyaggal készült próbatestek a betonfelület leválására hajlamossá teszik a betont. Megállapítható, hogy a betonfelületek leválására való érzékenység duzzasztott adalékanyagú beton esetén függ az adalékanyag szilárdságától, minél nagyobb az adalékanyag szilárdsága, annál nagyobb a betonfelület leválásának az esélye.

Az 5N (kisebb szilárdságú) adalékanyag esetén (M1, M3 és M5) beton esetén, a szobahőmérsékleten mért szilárdsághoz képest nagyobb szilárdságot mértünk a 150 °C-os hőterhelést követően (2.15 ábra). Ez az adalékanyag nagy vízfelvevő képességével magyarázható. 150 °C-os hőterhelést követően az adalékanyagban tárolt víz párolgása a beton nyomószilárdságát növelte. A 300 °C felett egyenletes szilárdságcsökkenés figyelhető meg. Ez megközelíti az 20 °C-on mért szilárdságot. A kezdeti, illetve a maximális szilárdság és a 800 °C-ig mért szilárdság aránya lényegesen kedvezőbb a közönséges betonhoz képest. Ez elsősorban az adalékanyag nagy porozitásával (67%) és nyitott pórusszerkezetével indokolhatjuk. Az M3 beton érzékenyebben reagált a hőterhelésre ezt az eltérő cement típus és az eltérő cementmennyiséggel lehet magyarázni.

Az M3 betonnál az M5 érzékenyebben reagált a hőmérséklet emelkedésére ezt a műanyagszálak adagolásával tudjuk magyarázni.

Az M2 és M4 beton esetén (nagyobb szilárdságú adalékanyaggal készült) kezdeti kis szilárdságcsökkenést figyelhetek meg. A relatív nyomószilárdság 150 °C és 500 °C között közel állandó értéket mutat. A cementkő és az adalékanyag hőtágulása miatt az adalékanyag szemcsék és a cementkő határfelületén mikro repedések keletkeznek 500 °C-ig a nyomószilárdság értékei csökkenő tendenciát mutatnak. A betonnyomószilárdság csökkenése 550 °C-ig megközelítőleg 20 %. A szilárdságcsökkenést 450 °C – 550 °C között a portlandit bomlása, valamint az adalékanyag és a cementkő eltérő hőtágulása okozza. 500 °C fölött további szilárdságcsökkenést figyeltek meg, amit a CSH-vegyületek átalakulása okoz. A 800 °C-os hőterhelést követően a legnagyobb szilárdságú adalékanyag (M2) esetén a próbatestek felhasadtak ezért 0-ra vettük a nyomószilárdság értékét.



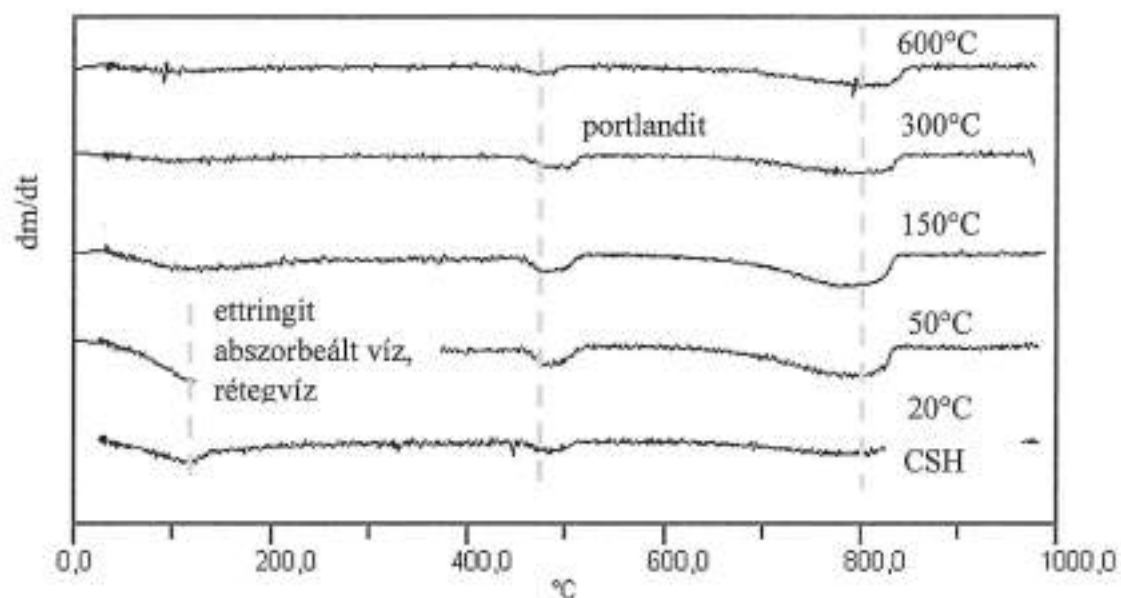
2.15. ábra: relatív nyomószilárdság változás a hőterhelés függvényében

(A nyomószilárdság átlagértéke 20 °C-on az M1: 27,5 N/mm², M2: 53,23 N/mm², az M3: 36,1 N/mm², az M4: 46,3 N/mm², M5:34,5 N/mm² volt.)

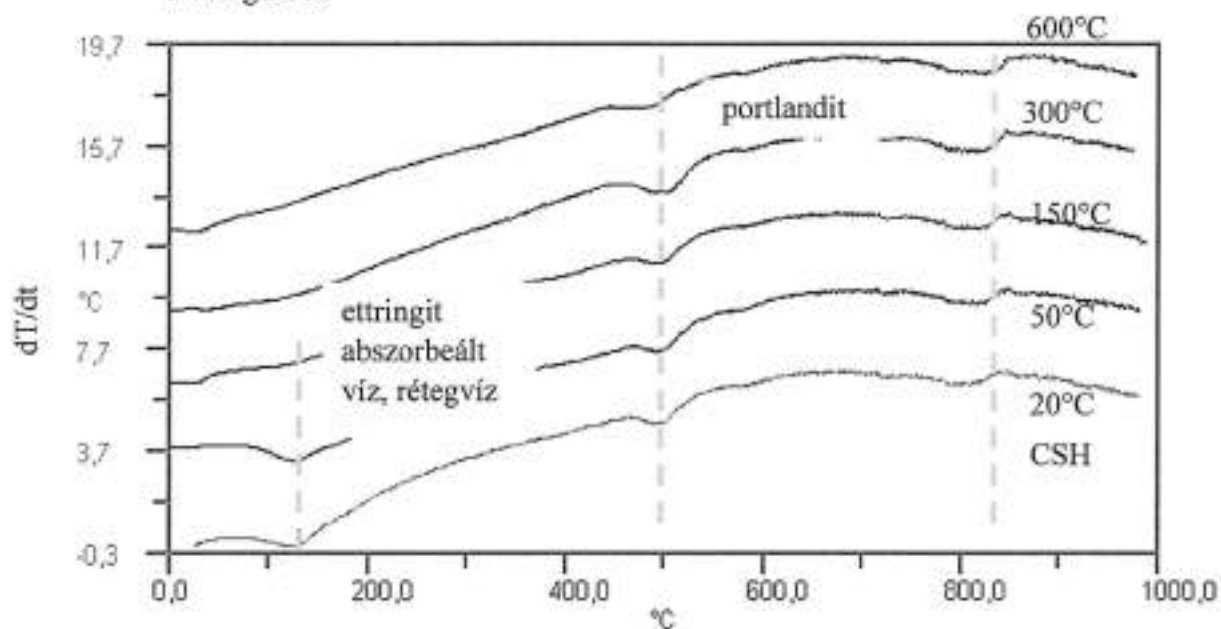
A vizsgálatok során bekövetkező fázisátalakulások is bizonyítják (2.16 ábra). A termonalítai vizsgálatok alapján jól látható DTG csúcsok jelentkeznek az ettringit (100°C), a monoszulfát (190 °C), a portlandit (500 °C), a kalcit (760 °C) és a kalcium-szilikát-hidrátok (820 °C) átalakulásánál. Az ettringitnél jelentkező csúcs nagyságát magyarázza az abszorbeált víz, illetve a rétegvíz távozáskor bekövetkező tömegvesztés. A kvarc átkristályosodása nem jár tömegváltozással, ezért az csak a DTA görbéken figyelhető meg. A kvarc jelenléte a beton homoktartalmával magyarázható.

Általánosságban megállapítható, hogy a könnyű adalékanyagos betonok 500 °C-os hőmérsékletig kedvezőbben viselkednek mint a kvarckavics adalékanyagú betonok. Az adalékanyagok tekintetében megállapíthatjuk, hogy az 5N-es (kisebb szilárdság adalékanyaggal) viselkedett a legkedvezőbben (M1, M3) a legkedvezőtlenebb a 8F-es (legnagyobb adalékanyag szilárdság) (M2) volt.

DTG-görbék ($dm/dt, mg/^\circ C$)



DTA-görbék



2.16. ábra: Duzzasztott agyagkavics adalékanyag (5N) készült beton DTG- és DTA-görbéi

3. KÍSÉRLETI MÓDSZER

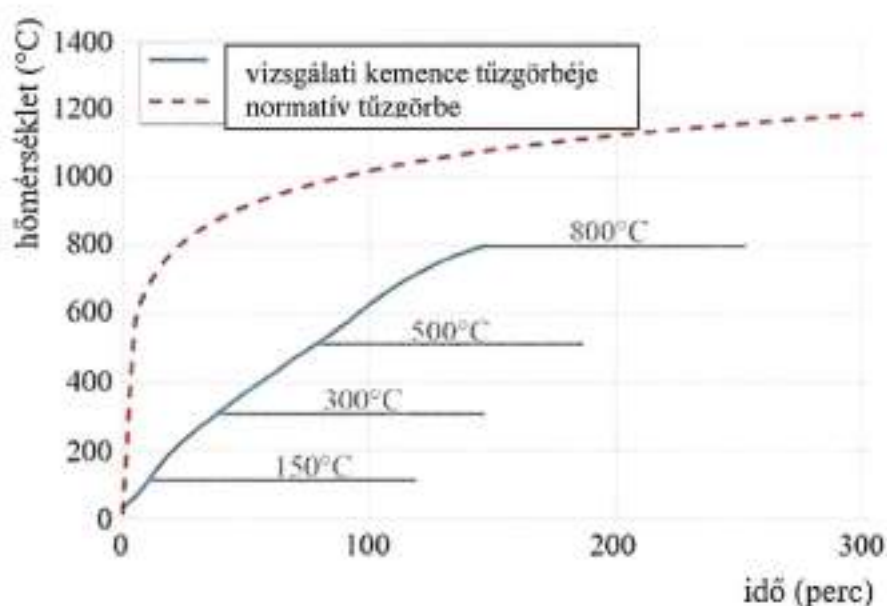
3.1 Tűzállóság

A hőterhelés előtt a próbatesteket 7 napig vízben, majd további 21 napig laborlevegőn tároltuk, ezután a próbatesteket elektromos kemencében hőterheltük. Az elektromos kemence felfűtési görbéje a 3.1. ábrán látható. Mérési eredményeink alapján a kemence tűzgörbéje eltér a normatív tűzgörbétől (*ISO 834 tűzgörbe, MSZ EN 1991:1-2*), de mivel a kemence felfűtése többszöri ellenőrzés során azonos volt, így alkalmazható a beton hőterhelést követő jellemzőinek összehasonlítására (*Pákozdi, Lublói, Czoboly, 2015*).

A vizsgálatok során a próbatestek minden esetben a kihűlt kemencébe kerültek elhelyezésre. A próbatestek elhelyezését követően a hőterhelés két szakaszra osztható:

- *felfűtési szakasz*: a 3.1. ábrán ismertetett felfűtési sebességgel;
- *maximális hőmérsékleten tartás*: a tervezett maximális hőmérséklet elérését követően a próbatesteket 2 órán keresztül azonos hőmérsékleten tartottuk, ahhoz, hogy az egész keresztmetszet teljes egészében átmelegedjen, a hőterhelés időtartamát derivatogramos vizsgálattal igazoltuk (*Majorosné Lublói, 2008*).

A hőterhelést követően a próbatesteket laborlevegőn hagytuk kihűlni. A próbatestek kihűlését követően végeztük el a vizsgálatokat. A vizsgálatokat megelőzően a kemencéből kivéve szemrevételeztük a próbatesteket.



3.1. ábra: A normatív tűzgörbe (MSZ EN 1991:1-2) és a vizsgálati kemence felfűtési görbéjének összehasonlítása a 2 órás hőn tartással (*Pákozdi, Lublói, Czoboly, 2015*)

Az alkalmazott hőlépcsők: 20 °C, 60 °C, 150 °C, 500 °C, 800 °C voltak.

3.1 Nyomószilárdság

A nyomószilárdság-vizsgálatokat az *MSZ 4798* szerint végeztük el.

A beton nyomó szilárdságát 150 mm élhosszúságú kockákon határoztuk meg. A nyomószilárdság-vizsgálatot ALPHA-3-3000 S törőgéppel végeztük el 11,25 kN/s sebességgel.

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

4.1 Szemrevételezés a tűzterhelés után

A próbatestek felületén 500 °C-os hőterhelésig nem jelentek meg repedések.

A próbatesteket a hőterhelés után szemrevételeztük. A szemrevételezés során megállapítottuk, hogy a 800 °C-os hőterhelést követően a próbatestek felületén repedések keletkeztek (4.1 ábra) és a próbatestek a polisztirol kiégése miatt elszíneződöttek.



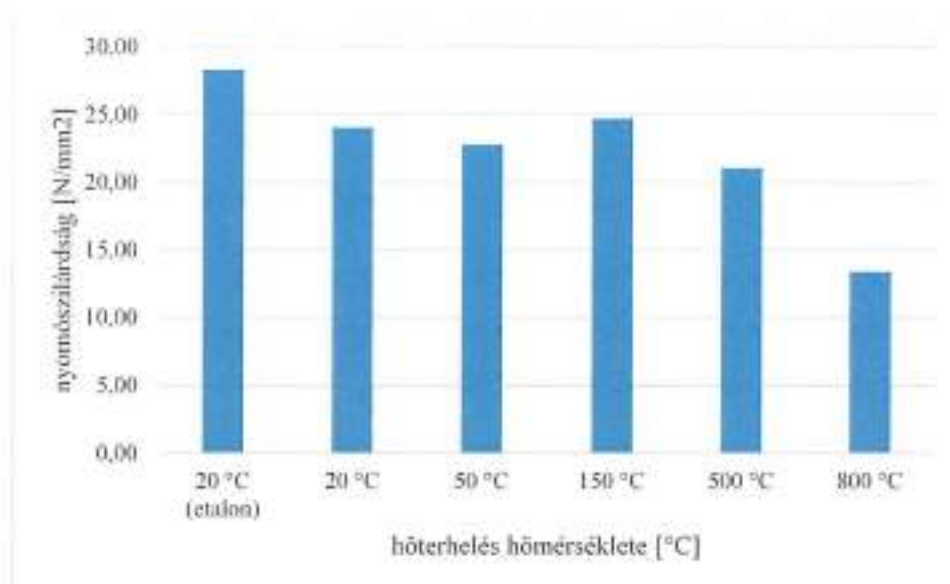
4.1 ábra: A próbatestek a 800 °C-os hőterhelést követően

4.2 Nyomószilárdság alakulása a hőterhelés után

A nyomószilárdság alakulását a 4.2 ábrán adjuk meg. A méréshez tartozó egyedi értékeket a 4.1 táblázat tartalmazza.

A 4.2 ábra alapján a következő megállapításokat tesszük:

- 150 °C -os hőterhelést követően nem következett be jelentős szilárdságcsökkenés,
- a 800 °C-os hőterhelést követően csak 50 % volt, ami a hagyományos betonét meghaladja, ahol a szilárdság csökkenés 80 % körül szokott lenni.



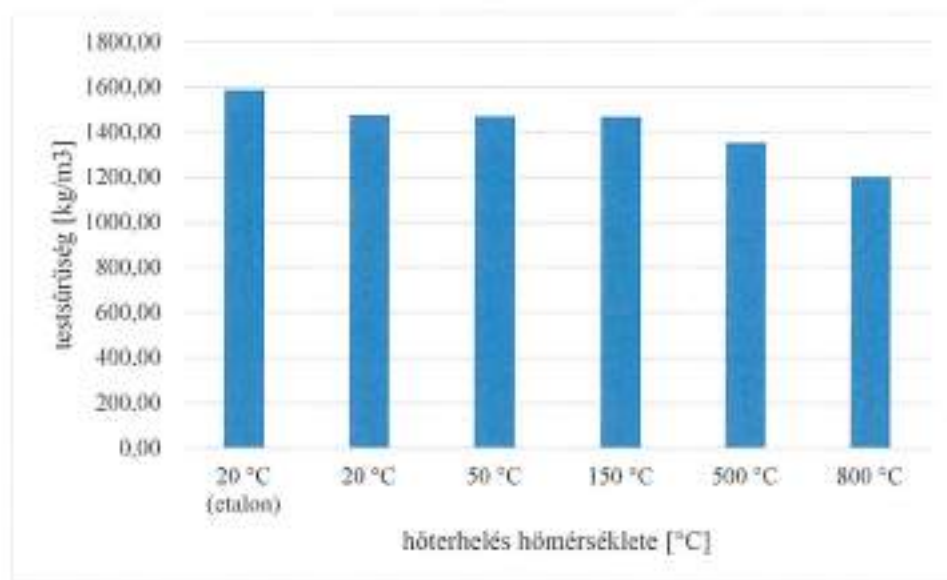
4.2 ábra: A nyomószilárdság alakulása a hőmérséklet függvényében

A nyomószilárdság vizsgálat után a törés képet elemeztük (4.4. ábra). A próbatestek törése során a hagyományos betonokra jellemző kúp szerű törésképet figyelhetjük meg. A hőmérséklet emelkedésével a törésvonalak egyre jobban közelítenek a függőlegeshez, a 800 °C-os hőterhelést követően majdnem megközelítik.

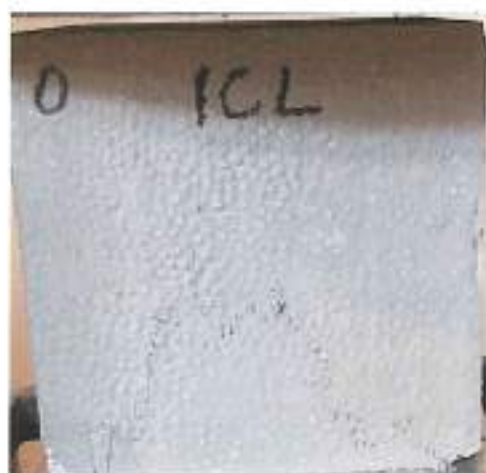
A nyomószilárdság alakulása mellett fontos a testsűrűség alakulása is ezt a 4.4 ábrán adjuk meg. A méréshez tartozó egyedi értékeket a 4.1 táblázat tartalmazza.

A 4.3 ábra alapján a következő megállapításokat tesszük:

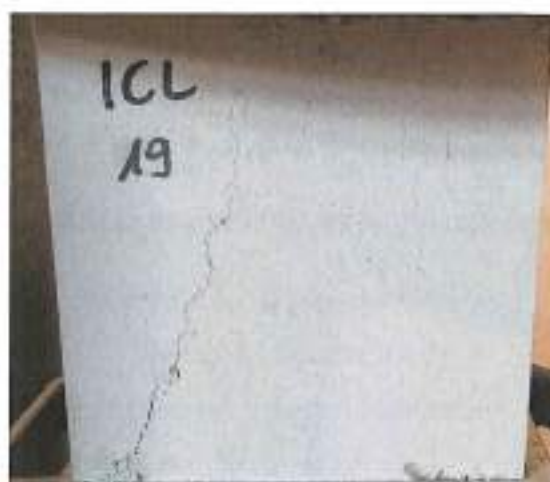
- 150 °C -os hőterhelést követően nem következett be jelentős testsűrűség csökkenés,
- a 800 °C-os hőterhelést követően csak 25 % volt, ami a hagyományos betonét kis mértékben meghaladja.



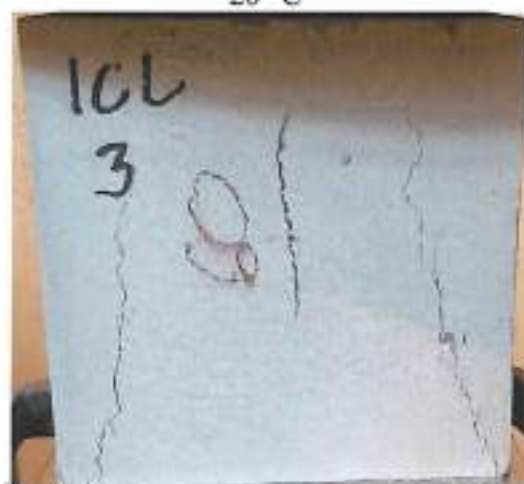
4.3 ábra: A testsűrűség alakulása a hőmérséklet függvényében



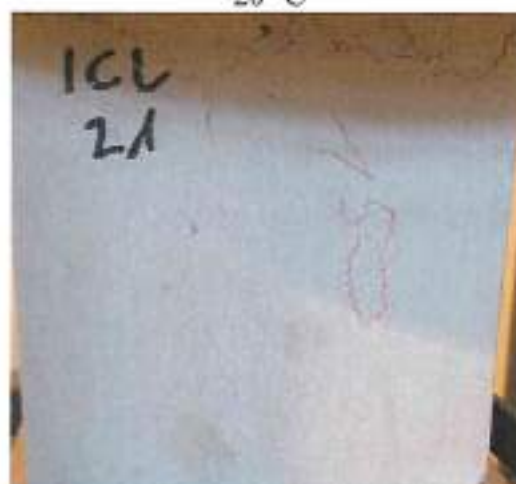
20 °C



20 °C



60 °C



150 °C



500 °C



800

4.4 ábra: A törések a hőterhelést követően

5. ÖSZEFoglalás

Az ICL Kft. megbízta a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékét, hogy elvégezze a cég által gyártott polisztirolbeton tűz, hő- és páratechnikai laborvizsgálata.

A feladat során a következő részfeladatokat végeztük el:

- próbatétesek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata,
- hővezetési tényező mérése,
- szorpciós izoterma meghatározása.

A próbatétesek kemencés hőterhelése próbatétesek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata alapján, megállapíthatjuk, hogy a vizsgált összetételű polisztirol beton jobban viselkedik, mint a hagyományos betonok, ezért **az MSZ EN 1992-1-2 szerint szabad a belőle épült szerkezeteket méretezni.**

6. IRODALOM

- Dorn, T. (1993): Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Trager-Stützen Anschlüsse, Heft 99, Braunschweig
- Faust, T. (2000) Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation, *Universität Leipzig*
- Faust, T. (2003): Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst und Sohn, 2003
- Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig
- Horiguchi, T. (2005): Combination of Synthetic and Steel Fibres Reinforcement for Fire Resistance of High Strength Concrete, Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering, 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp.: 59-64
- ISO 834:2014 Fire resistance tests -- Elements of building construction -- Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements
- Khoury, G. A., et al. (2001): Fire Design of Concrete Materials structures and modelling, 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001
- Khoury, G. A., Grainger, B. N., Sullivan P. J. E., (1985): Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol 37, No. 132
- Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgeschützter Stahlbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Majorosné, Lublós, É. (2008): Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira, PhD értekezés, BME Építőmérnöki Kar, (tudományos vezető: Balázs L. Gy.), Budapest, p. 110.
- Mörth, W., Haberland Ch., Horvath J., Mayer A., (2005): Behaviour of Optimized Tunnel Concrete with Special Aggregates at High Temperature, Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp.: 41-50
- MSZ 4798-1:2004 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon.
- MSZ EN 1992-1-2: 2005 Betonszerkezetek tervezése, Általános szabályok, Tervezés

tűzterhelésre

- Nemes R. (2006): Habüveg adalékanyagok könnyűbetonok, PhD értekezés, Budapest
- Niels H. P. (2005): Fire Design of Concrete Structures, proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, edited by Gy. L. Balázs, A. Borosnyói, 23-25 May 2005, Budapest, pp.: 1097-1105
- Pákozdi, Cs., Lublós, É., Czoboly, O. (2015): Kombinált tűzvédelmi burkolatok, Építőanyag, vol. 67. No 3 pp. 94-97.
- Richtlinie (2005): Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke, Wien, ÖVBB
- Romić S., Lazić M., (1985): Armirani lakoagregati beton» IRO Gradevinska knjiga, Beograd
- Schneider U., (1986): Properties of Materials at High Temperatures, Concrete RILEM Publ., 2nd Edition, Gesamthochschule Kassel, Universität Kassel, 1986
- Schneider U., Weiß R. (1977), „Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen, Cement and Concrete Research, Vol 11, pp. 22-29
- Silfwerbrad J. (2004): Guidelines for preventing explosive spalling in concrete structures exposed to fire, Proceedings of Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib. 23 25
- Thielen, K., Ch.(1994): Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung□Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Ujhelyi J. (1995) Mesterséges adalékanyagok felhasználásával készülő könnyűbetonok technológiájának kidolgozása ÉTI-jelentés 6. Budapest, 1959
- Ujhelyi J. (2005): Műszaki előírás – Beton és vasbeton készítése (MÉÁSZ ME-04.19:1995) 14. fejezet Könnyűbetonok, Magyar Építőanyagipari Szövetség, Budapest
- Walter, R., Kari H., Kutserle W., Lindlbauer W. (2005): Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire, proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering, 8.-9. Sept. 2005 Graz, pp.: 54-59

- Waubke, N. V. (1973): Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig
- Winterberg R., Dietze, R., (2004): Efficient passive fire protection systems for high performance shotcrete, Proceeding for the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Cairns, Australia, October, 2004 ISBN: 0415358981
- Zhang, M., H Gjørv O. E. (1990): Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research, Vol 20, pp. 32-38



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM (BME)
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK
ÉPÜLETFIZIKA LABORATÓRIUMA

1111 Budapest, XI, Műegyetem rkp. 3.
Tel.: 06/1 463-1175 * WEB: <http://em.bme.hu/lelek/epuletfizika> * E-mail: nagy.balazs@eplo.bme.hu

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV
Hővezetési tényező vizsgálata

Megrendelő: ICL Innovation Concrete Laboratory KFT
6000 Kecskemét, Mátyás király körút 52. 3. em. 9.

Iktatószám: 2020-ICL-1
Ezen jegyzőkönyv 1 számozott oldal tartalmaz.

Minta megnevezése: ICL könnyűbeton
A próbatetek állapota beérkezéskor: Ép, (300 x 300 x ~100) mm
Mintavétel időpontja, helye és módja: Megrendelő hatáskörében
Próbatetek előkészítése és kondicionálása: 168 óra laborlevegőn való tárolás (23°C, 50% RH)
Nyomóerő a próbatetek vizsgálatánál: 200 N
Minta beérkezésének dátuma: 2020.10.01
Minta vizsgálatának dátuma: 2020.10.09-2020.10.20.
Vonatkozó előírás: MSZ EN 12667:2001

Eszköz típusa:
Taurus TLP 300 DTX

Vizsgálati eredmények

Próbatetek sz.	Vastagság, mm	Hőáram, W	Alsó oldal felületi hőmérséklete, °C	Felső oldal felületi hőmérséklete, °C	Hőmérséklet-különbség, K	Minta közép-hőmérséklete, °C	Hővezetési tényező, W/mK
1	100.25	0.559	5.5	14.2	8.7	9.8	0.6419
2	99.62	0.549	5.6	14.1	8.6	9.8	0.6389
4	98.29	0.585	5.7	14.3	8.6	10.0	0.6662

Hővezetési tényező átlagértéke (10 °C, $u_{23,50}$), W/mK: 0.6490
k₂ együttható (n = 3, p = 90%, 1- α = 0.9): 4.26
A minta szórása, s: 0.0122
Közölt hővezetési tényező (10 °C, $u_{23,50}$), W/mK: 0.70

- Megjegyzés:
- 1) A minta közölt hővezetési tényezője MSZ EN ISO 10456:2008 szabvány szerinti l.b) környezeti állapotban $\lambda = 0,7$ W/mK.
 - 2) Az alábbi táblázatban az MSZ EN ISO 6946:2017 szabvány szerint számított hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező értékeket közöljük 10-60 cm falvastagság alkalmazása esetén:

	Alkalmazott falvastagság, cm					
	10	20	30	40	50	60
Hővezetési ellenállás, $R_{e,sp}$, m ² K/W:	0.14	0.29	0.43	0.57	0.71	0.86
Hőátbocsátási tényező*, U , W/m ² K:	3.20	2.19	1.67	1.35	1.13	0.97

*A táblázatban felbontott hővezetési ellenállások az MSZ EN ISO 6946:2017 szabvány 7. melléklete szerint vízszintes irányú hőáramlás esetén $R_{e,sp} = 0.13$ m²K/W és $R_{e,sp} = 0.04$ m²K/W.

Budapest, 2020.10.26.


Dr. Nagy Balázs
témavezető


Dr. Dunai László
tanszékvezető



A Vizsgálati jegyzőkönyvben szereplő eredmények csak a megvizsgált próbatetekre vonatkoznak.
A Vizsgálati jegyzőkönyvet csak teljes terjedelmében szabad másolni!

