

Betonösszetevők hatása a hőtűrésére

FEHÉRVÁRI SÁNDOR • BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék • Fehervari.Sandor@t-online.hu
SALEM GEORGES NEHME • BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék • sgnahme@yahoo.com

The effect of the concrete components on the temperature endurance

Last quarter's accidents turn the public attention to the danger of the tunnel fires. The evolving heat of the fires damages the tunnel linings. To moderate the effect of high temperature on the concrete it is necessary to understand the behaviour of the concrete to these extreme conditions. Present papers summarized our experimental results of the effect of the concrete components on the temperature endurance. Our results show that the decrement of the water/cement ratio increases the temperature endurance of the compressive strength. The split-tensile strength characteristics of the specimens containing only quartz aggregate show same behaviour independently of the water/cement ratio, the maximal grain size, the dosage of PP-fibre or air-entraining admixture. Replacing the sand fraction with 0/6 mm barite auspicious improvements were experienced both in the temperature endurance of the compressive strength and in the split tensile strength.

Keywords: tunnel, fire, concrete, compressive strength, temperature endurance, air-entraining admixture, PP-fibre, barite

1. Bevezetés

A felszíni közlekedés zsúfoltsága, és az egyre gyorsabb személy- és teherfuvarozás iránti igény adott esetben a forgalmat alagutakba kényszeríti. A zárt térbe terelt forgalom biztonsági kockázata jelentősen meghaladja a „nyitott” közlekedését, és ezért a biztonsági előírások is messze meghaladják szokványos rendszabályokat. Az üzemszerűtől eltérő körülmény mind az alagútban tartózkodókra, mind szerkezetére komoly fenyegetést jelent. Az elmúlt évtized statisztikai szerint továbbra is, minden, a biztonságot fokozó intézkedés ellenére – a forgalmi terhelések növekedésével párhuzamosan – a balesetek száma növekszik. A forgalom-biztonság javítása, a balesetek számának és az okozott kárnak csökkentése, valamint egy baleset túlélési esélyének növelése az egész világon több tudományágat integráló feladatot jelent az alagutakat tervezők, építők, fenntartók és használók számára.

2. Alagúttűz, tűzterhelés

A katasztrófák ráirányították a figyelmet az alagútban keletkező tüzek által okozott hatások vizsgálatára, a szerkezetnek a tüzeset után is megmaradó biztonságának növelésére. Az alagútfalazat szerkezeti anyagainak vizsgálata az elmúlt évtizedek egyik jelentős kutatási témájává vált. A műtárgyban kitört tűz jellege és baleset során felszabadult nagy mennyiségű hő hatásai jelentősen eltérnek az „egyszerű” magasépítési tüzekétől (pl. ISO 834). A szerkezeti anyagok vizsgálatához elengedhetetlen a falazatot érő hőterhelés meghatározása. Elméleti számítások, numerikus és nagyminta kísérletek eredményeképpen több európai országban meghatározták az alagúttűzre érvényes szabványos lég(gáz) hőmérsékleti görbéket. Egyes nagyműtárgyak esetében, az áthaladó szerelvények éghetőségi jellemzőinek pontosabb ismeretében egyedi hőmérséklet-idő görbéket definiáltak. Mindezen görbék általános jellemzője (amint az 1. ábrán látható) a gyors hőakkumuláció, amely a legtöbb esetben 5–10 perc alatt kialakítja az 1000 °C-os hőmérsékletet.

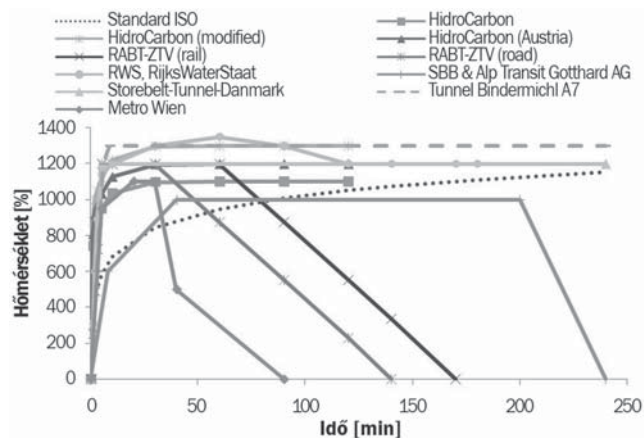
Fehérvári Sándor

(1981), okl. építőmérnök (BME 2006).
 Doktorandusz a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken. Fő érdeklődési területe az alagúttűz természet, leírása és a szerkezetre gyakorolt hatása, speciális mély- és alagútépítés módszerek, szerkezeti és háttérinjektálás, mélyépítési szerkezetek építéstechnológiai és utólagos javítási kérdései. A Magyar Alagútépítő Egyesület, a fib Magyar Tagozata, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Szilikátipari Tudományos Egyesület és az Építéstudományi Egyesület tagja.

Dr. Salem Georges Nehme

(1963) okl. építőmérnök (BME 1992), vasbetonépítési szakmérnök (BME 1996), PhD (BME 2005). Egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laborvezetője. Fő érdeklődési területei: Nagyszilárdságú betonok és habarcsok kutatása. Az öntömörödő betonok tartóssági és összefüggése a porozítási kérdéseinek összefüggés-vizsgálata. Az öntömörödő betonok és acélszálalás öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében. Betontechnológia különleges betonok területén, pl. az öntömörödő betonok tömegbetonként való alkalmazása és a felmerülő problémák (hőmérséklet-eloszlás okozta repedések) megszüntetése. Tömegbetonok minőségellenőrzése, látszóbetonok, nehéz adalékanyagokból betonok készítése, a nehézbeton vizsgálati, másodlagos (építési, bontási) építőanyagok újrahasonosítása, vasbeton szerkezetek megerősítése szénlammellával, vasbetonszerkezetek tartóssága. Acélszál-erősítésű vasbeton lemezek átszűrődési teherbírásának növelése acélszálakkal. A fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

betonok és acélszálalás öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében. Betontechnológia különleges betonok területén, pl. az öntömörödő betonok tömegbetonként való alkalmazása és a felmerülő problémák (hőmérséklet-eloszlás okozta repedések) megszüntetése. Tömegbetonok minőségellenőrzése, látszóbetonok, nehéz adalékanyagokból betonok készítése, a nehézbeton vizsgálati, másodlagos (építési, bontási) építőanyagok újrahasonosítása, vasbeton szerkezetek megerősítése szénlammellával, vasbetonszerkezetek tartóssága. Acélszál-erősítésű vasbeton lemezek átszűrődési teherbírásának növelése acélszálakkal. A fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.



1. ábra A mértékadó lég(gáz)hőmérsékletek (szabványos tűzgörbék) a tűz környezetében Blehmann és Girnau [1] valamint Schneider és Horvath [2] alapján
 Fig. 1. Authoritative air/temperature (standard fire curves) near the fire according to Blehmann és Girnau [1] and Schneider és Horvath [2]

3. Alagúti vasbetonfalazatok viselkedése tűz esetén

A hatások ismeretében lehetséges az alagútban tartózkodók és a műtárgy aktív megóvásán kívül, a tűz alatt és után is jelentős terheket viselő műtárgyszerkezet állékonyságának, vagyis a szerkezet hőtűrésének a növelése.

Ahhoz hogy a szerkezeti anyagokra gyakorolt hatást minél inkább mérsékelhessük, pontosan ismernünk kell a betonban és vasbetonban a hő hatására bekövetkező fizikai és kémiai változásokat. A vasbeton-szerkezetű alagútfalak tűzállóságának vizsgálatakor a beton, a betonacél és a köztük lévő tapadás viselkedése külön-külön is döntő jelentőségű

a falazat teherbíró-képességének szempontjából. A szokványos betonacélok szilárdsága már viszonylag kis (kb. 400 °C-os) hőmérsékletnél is rohamosan csökkenni kezd [3]. Az acél-beton tapadás elemzésekor is hasonló eredményeket kapunk. E tényezők ismeretében a szerkezetbe épített acél védelmének leghatékonyabb módja a *betonfedés növelése*, mintegy hővédő, hőszigetelő réteget képezve. Már 40–50 mm-es betonfedés is jelentős mértékben hőszigetel [4]. A szerkezeti beton tűzállóságának javítását segítheti az anyagban lezajló *fizikai és kémiai változások* tanulmányozása (1. táblázat). A kialakuló gőz-, gáz- és mechanikai nyomás a felületi rétegeket lehámlaszthatja, lefeszítheti, ami *réteges leválást (spalling)* eredményezhet [5]. A réteges leválásban rejülő legnagyobb veszély a *betonfedés folyamatos csökkenése és az acélbetétek felszínre kerülése*. A beton nyomószilárdsága a hőmérséklet emelkedésével csökken. A tűzzel érintkező felületen a *nyomószilárdsági értékek* csökkennek [3].

Hőmérséklet [°C]	Reakció, átalakulás vagy tulajdonság
30–120	a beton pórusaiban lévő víz távozása
140–180	az <i>ettringit</i> , valamint a <i>monoszulfát</i> vízvesztése [6]
250–1000	kémiaileg kötött vizek felszabadulása
300-tól	a mikropedések számának és a beton porozitásának jelentős növekedése [7] [8]
373	a víz hármaspontja, efelett a víz nem lehet folyékony halmazállapotú [7]
400–450	a $Ca(OH)_2$ dehidratációja
573 (575)	a SiO_2 kristályszerkezeti átalakulása: $\alpha \rightarrow \beta$ SiO_2 (5,7%-os térfogat-növekedés) [9]
750–850	a $CaCO_3$ hőbomlása
850–1000	a CSH hőbomlása [10]
1300–1700	beton alkotóinak olvadása [6] [11], kihűlés után amorf szerkezetű anyag marad vissza

1. táblázat Betonban hő hatására végbemenő kémiai és fizikai változások
Table 1. Chemical and physical changes in concrete under temperature

4. Vizsgált betonösszetételek és kísérleti módszerek

Kísérleteinkben meghatároztuk a maximális szemmagyság és a víz/cement tényezőnek a maradó szilárdsági jellemzőkre gyakorolt hatását. Vizsgáltuk a légbuborék-képző adalékszer és a PP-szál adagolás befolyását a maradó szilárdsági jellemzőkre. Vizsgáltuk továbbá a 0/6 mm-es baritnak (Baritmix I), mint homok-kiegészítő, illetve homok-helyettesítő anyagnak a hatását a maradó mechanikai jellemzőkre. Az alkalmazott változó és állandó vizsgálati paramétereket a 2. táblázatban foglaltuk össze. Az alkalmazott barit magas $BaSO_4$ tartalmú, *hőkezelésen* (730–740 °C) *átésett*, a sziderit ($FeCO_3$) pörkölési meddőjéből (Koch, 1985) származó *ércdúsítási melléktermék*. A Rudabánya térségében található *meddőhányó rekultivációjakor* a beton-technológiai alkalmazhatóság kísérletei (öntömörödő beton, sugárvédő nehézbeton) már kedvező eredményt hoztak [12] [13]. A $BaSO_4$ kristályvíz-mentes, nagy olvadáspontú (1580 °C [14]; vö.: bazalt 1150–1200 °C, andezit 950–1000 °C [15]) ásvány, izzítási vesztesége minimális (természetes állapotban 2%, tisztítottan 1%), 900 °C-ig nincs kristályszerkezeti átalakulás [16]. Összesen 14 különböző összetételű betont készítettünk barit adagolással.

1512 db próbatést hőtűrését vizsgáltuk. A szilárdságok összehasonlítására (150 mm élhosszúságú próbakocka; Ø100/200 mm próbahenger) valamint a beton nedvességtartalmának és látszólagos porozitásának meghatározásához további 280 db próbatestet használtunk fel. A hőterhelés vizsgálatok próbatesteinek *kis méretét* (Ø60/120 mm ill. Ø60/60 mm) az indokolta, hogy a réteges leválás, a kialakuló göznyomás, az egyenlőtlen felmelegedés az eredményeket ne befolyásolja. Hengeres próbatestekkel a szerkezetből kifűrt magminták szilárdsága jobban összehasonlítható.

Mértük a maradó *nyomószilárdságot* és a maradó *hasító-húzószilárdságot*. Meghatároztuk a *hasító-húzó- és a nyomószilárdság hányadosát*, a H/N értéket. Az összehasonlításhoz felhasználtuk a relatív szilárdság – hőterhelési hőmérséklet görbék határozott integrálját, a hőtűrés (HT; %×°C), ami a görbék összehasonlíthatóságát könnyíti meg.

A hasító-húzószilárdságok vizsgálata a *réteges leválás* miatt *elsődleges fontosságú*, mivel a beton húzószilárdságának *lokális kimerülése* eredményezi a tönkremenetelt. A betonszerkezet tüzeset utáni javíthatósága miatt vizsgáltuk, hogy a hasító-húzószilárdság mekkora hőmérsékletig haladja meg a tiszta húzószilárdsághoz ajánlott 1,5 N/mm²-es értékhez tartozó 2,0 N/mm²-es hasító-húzószilárdsági határt (Palotás, 1981).

Kísérleti szakasz	Betonkeverékek		
	I.	II.	III.
Keverék jele	E1-E6	E7-E12	E13-E14
Kísérleti állandó	cementfajta: CEM I 42,5 R; cementadagolás: 400 kg/m ³ adalékanyag: kvarc alapú d_{max} : 16 mm víz/cement tényező: 0,45		
Kísérleti változó	d_{max} (8, 16 mm) v/c (0,38; 0,45; 0,55)	LB (0,15; 0,3; 0,6 m/m _v %) PP-szál (0,1; 0,2; 0,5 V/V%)	0/6 mm barit adagolás (33% és 100% homok)
Tárolási mód	vegyes tárolás (MSZ 4798-1:2004); 1 hétig vízben, majd laborkörülmények között		
Vizsgált jellemző	nyomószilárdság (Ø=60 mm h=120 mm henger) hasító-húzószilárdság (Ø=60 mm h=60 mm henger) a hőterhelés után visszahűlt próbatesteken (kb. 20 °C)		
Felfűtési hőmérséklet	11 hőfoklépcső: 20, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 900 °C		

2. táblázat Kísérletekhez használt betonkeverékek adatai
Table 2. Data of concrete compositions used in tests

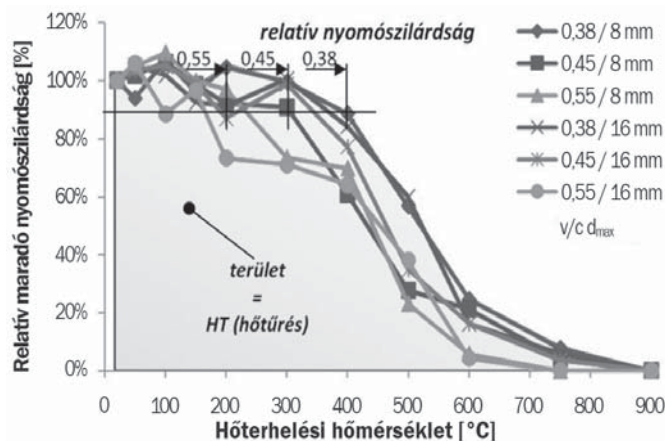
5. Vizsgálati eredmények

Megállapítottuk, hogy a 900 °C-on vizsgált próbatestek a hőterhelést követő 24–48 órán belül spontán szétestek, azonban az adalékanyag (elszíneződésétől eltekintve) sértetlen maradt. A tönkremenetel a cementköben, illetve az adalékanyag és a cementkö közötti tapadási zónában következett be.

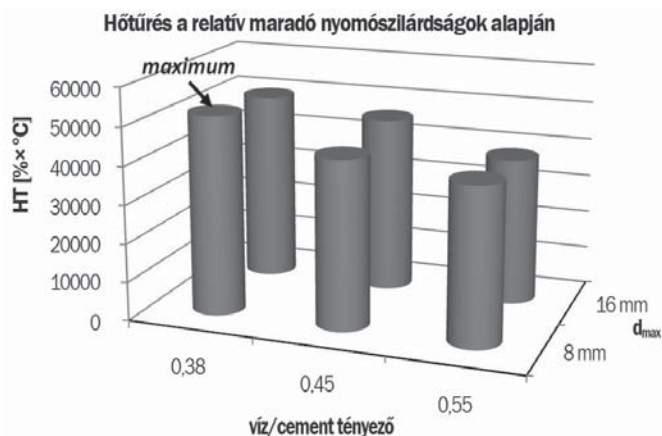
5.1 A víz/cement tényező és a maximális szemmagyság hatása a beton hőtűrésére

Megállapítottuk, hogy a beton próbatestek nyomószilárdság-változása (2. ábra) a hőterhelési hőmérséklet függvényében *három szakaszra* osztható. A *konstans*, vagy közel

konstans kezdeti szakaszt (200–400 °C-ig) gyors szilárd-ságvesztés követi. Nagy hőmérsékleten (600 °C felett) lassan csökken a maradó szilárdság. A maradó nyomószilárdság nagy (600 °C feletti) hőmérsékleten a kiinduló érték töredéke (kb. 10–20%). A relatív maradó nyomószilárdságok gyors szilárd-ságvesztési tartományának kezdete kitolódik a víz/cement tényező csökkenésével. Ezt támasztja alá a hőtűrés (3. ábra) csökkenésének mértéke is a víz/cement tényező növekedésével. Mind a relatív görbék lefutása mind a hőtűrés mértéke bizonyítja, hogy a maximális szemnagyságnak nincs hatása a relatív viselkedésre.

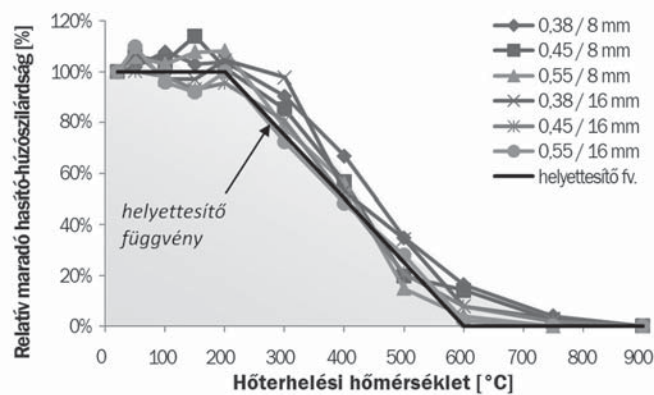


2. ábra A víz/cement tényező és a maximális szemnagyság hatása a hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdságra (jelölés: víz/cement tényező / maximális szemnagyság)
 Fig. 2. Effect of the water/cement ratio and maximal grain size on the relative residual compressive strength (notation: water/cement ratio / maximal grain size)

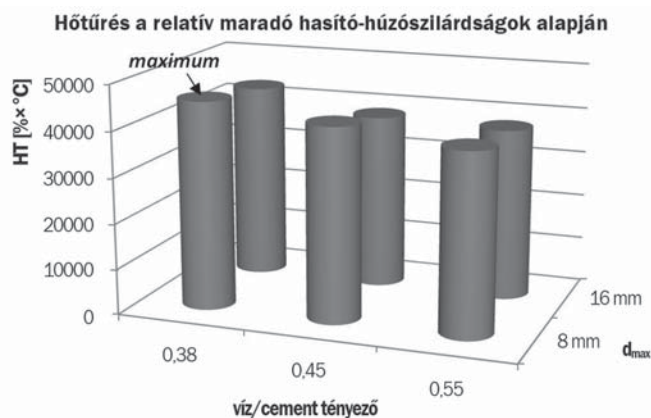


3. ábra A víz/cement tényező és a maximális szemnagyság hatása a beton nyomószilárdságának hőtűrésére
 Fig. 3. Effect of the water/cement ratio and maximal grain size on the temperature enduring of the compressive strength of concrete

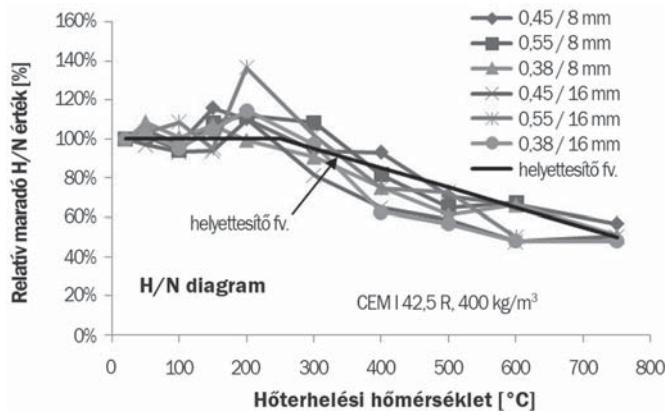
Megállapítottuk, hogy a relatív maradó hasító-húzószilárdságok (4-5. ábra) változásai közel azonosnak tekinthetők. A relatív maradó hasító-húzószilárdsági viselkedést sem befolyásolta az adalékanyag maximális szemcsemérete. A hasító-húzószilárdság leírására bilineáris közelítés alkalmazható. Víz/cement tényezőtől függően 220–420 °C-ig a szilárdság nagyobb, mint 2,0 N/mm² (javításhoz előírt minimum húzószilárdságból számított hasító-szilárdság).



4. ábra A víz/cement tényező és a maximális szemnagyság hatása a hőterhelés utáni relatív maradó hasító-húzószilárdságra (jelölés: víz/cement tényező / maximális szemnagyság)
 Fig. 4. Effect of the water/cement ratio and maximal grain size on the relative residual split-tensile strength (notation: water/cement ratio / maximal grain size)



5. ábra A víz/cement tényező és a maximális szemnagyság hatása a beton hasító-húzószilárdságának hőtűrésére
 Fig. 5. Effect of the water/cement ratio and maximal grain size on the temperature enduring of the split-tensile strength of concrete



6. ábra A víz/cement tényező és a maximális szemnagyság hatása a hőterhelés utáni relatív maradó H/N érték változására (jelölés: víz/cement tényező / maximális szemnagyság)
 Fig. 6. Effect of the water/cement ratio on the relative change on the H/N (split-tensile/compressive strength) values (notation: water/cement ratio / maximal grain size)

Megállapítottuk, hogy a H/N értékek változása (6. ábra), mind a valós mind a relatív értékeket tekintve, közel azonosak, függetlenül a víz/cement tényező változásától vagy a maximális szemcsemérettől. Kis hőmérsékleten állandónak tekinthető

értékek után a H/N érték csökkenni kezd, vagyis a beton hőmérsékleti szívóssága csökken, a ridegsége nő. A H/N érték változásának leírására bilineáris közelítés alkalmazható.

5.2 Légbuborék-képző adalékszer és PP-szál adagolásának hatása a beton hőterhelés után maradó szilárdsági jellemzőire

A speciális kiegészítőként adagolt PP-szál a beton réteges leválással szembeni ellenállásának javítása érdekében nemzetközileg elfogadott gyakorlat. A PP-szál kiegészítéssel létrejövő kapillaris rendszer csökkenti a felület közelében felgyülemelő, nagynyomású gőzt. Vizsgáltuk, hogy a kiegészítő PP-szálak hogyan befolyásolják a maradó szilárdsági jellemzőket. A kísérleteknél három PP-szál adagolást alkalmaztunk. A nemzetközi gyakorlat tűzvédelmi szempontból 0,1 és 0,2 V/V%-os (~1–2 kg/m³) PP-szál adagolást ír elő. A 0,5 V/V%-os (~5 kg/m³) adagolással a jelenségek további vizsgálatát elősegítő értéket vettünk fel. A kisméretű próbatestek miatt a PP-szál igazi hatását (gőznyomás levezetése) kifejteni nem tudja. A kísérleti cél a PP-szálnak a hőterhelés utáni mechanikai viselkedésre gyakorolt hatásának vizsgálata volt.

A légbuborék-képző adalékszer jellemzően a beton fagyállóságának javítását szolgálja, tűzállóság növelő hatását még nem vizsgálták. Mivel a tűz hatására bekövetkező réteges leválás és a fagyhámlás hasonló tönkremeneteli aprózódást mutat, érdemesnek tartottuk a légbuborék-képző adalékiszert is alkalmazni. Vizsgáltuk, hogy a bevitt, jelentős mennyiségű légbuborék hatására hogyan változik meg a beton hőtűrése. A légbuborék-képző adalékiszert a 0,15; 0,3 és 0,6 m/m₃-ban adagoltunk, ez 7–9 V/V%-os légtartalmat eredményezett. A vizsgált kiegészítőket az E4-es jelű (v/c = 0,45; d_{max} = 16 mm) betonreceptúrához adagoltuk.

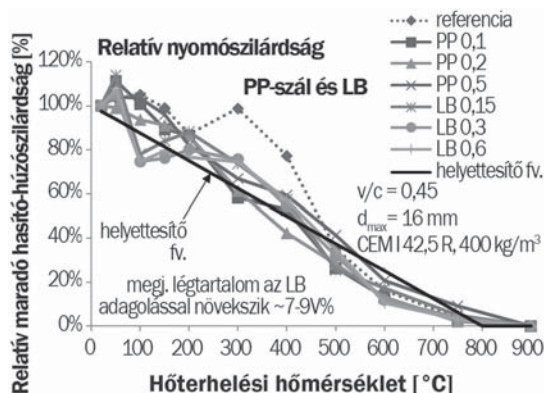
Az eredmények értékelésekor megállapítottuk, hogy a PP-szál adagolásakor a maradó szilárdságok görbéi a száladagolás mennyiségétől függetlenül, egymáshoz rendkívül közel futnak. A maradó nyomószilárdság (7-8. ábra) relatív változására a PP-szál adagolás mértéke nincs hatással (0,1–0,5 V/V% adagolás esetén), az eredménygörbék azonosnak tekinthetők. Légbuborék-képző adalékiszert adagolásakor a relatív maradó szilárdságok már 100 °C-os hőterhelési hőmérséklettől 75–80%-os szintre csökkennek. 100–300 °C hőterhelési hőmérséklet között konstansnak tekinthető szilárdságokat eredményezett mindhárom légbuborék-képző adalékiszert adagolás. A maradó nyomószilárdság relatív változására nincs hatással a légbuborék-képző adalékiszert adagolása, az eredménygörbék azonosak. PP-szál és légbuborék-képző adalékiszert adagolásakor a nyomószilárdságok hőtűrése azonosnak tekinthető. A görbesereg leírására lineáris összefüggés alkalmazható.

A PP-szál alkalmazásával a közepes hőmérsékleti tartományban (200–500 °C) a maradó nyomószilárdságok kisebbek, mint a referencia értékek. A PP-szálak kiegészése (~160 °C) után maradó „mesterséges” kapillaris rendszer rontja a beton teherviselő képességét. A műanyag-szál adagolása ugyanakkor megelőzi, vagy hátráltatja a réteges leváláshoz szükséges gőznyomás létrejöttét a szerkezetben.

Megállapítottuk, hogy sem a maradó hasító-húzószilárdság relatív változásának (9-10. ábra) jellegére, sem a hasító-húzószilárdsági hőtűrésre nincs érzékelhető hatással a kiegészítő (PP-szál, légbuborék-képző adalékiszert) adagolása. A hasító-

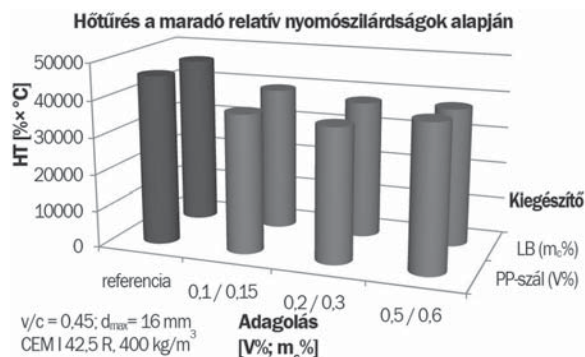
húzószilárdsági a 2,0 MPa-os határ követelményt a referencia-értéknél kisebb (250–370 °C) hőmérsékletig teljesítik.

Megállapítottuk, hogy a H/N érték relatív változásának (11. ábra) leírására alkalmas a korábbi helyettesítő függvény, vagyis a kiegészítő adagolásának nincs módosító hatása.



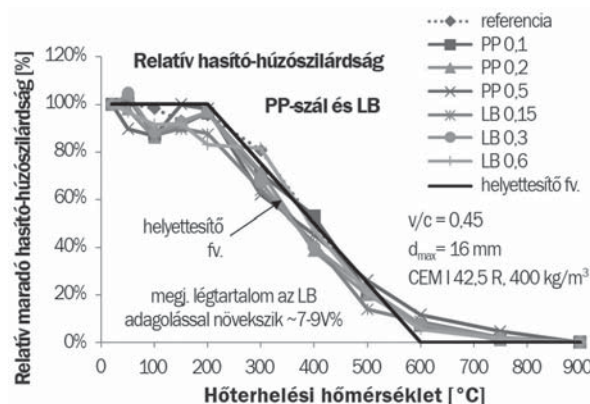
7. ábra A PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolásának hatása a beton hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdságára (jelölés: PP-szál adagolás V/V%; LB adagolás m/m₃)

Fig. 7. Effect of the dosage of PP-fibre and air-entraining admixture on the relative residual compressive strength of the concrete (notation: dosage of PP-fibre V/V% and air-entraining admixture m/m₃)



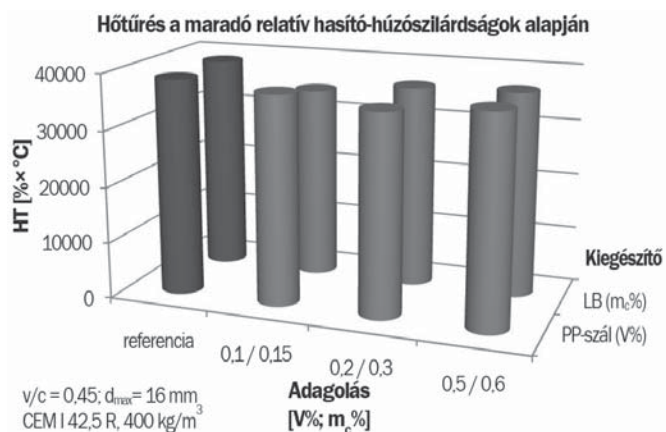
8. ábra A PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolásának hatása a beton nyomószilárdságának hőtűrésére (jelölés: PP-szál adagolás V/V%; LB adagolás m/m₃)

Fig. 8. Effect of the dosage of PP-fibre and air-entraining admixture on the temperature enduring of the compressive strength of concrete (notation: dosage of PP-fibre V/V% and air-entraining admixture m/m₃)



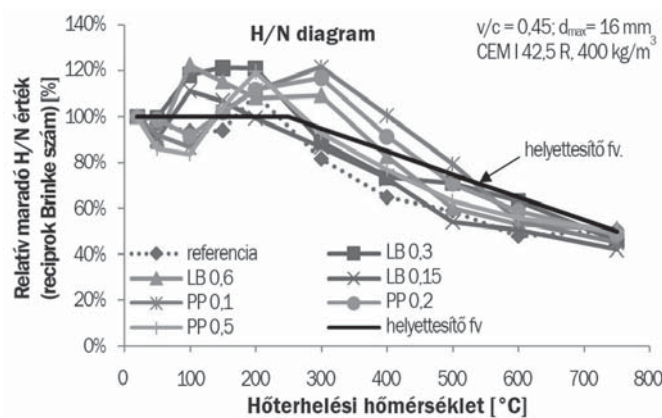
9. ábra A PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolásának hatása a hőterhelés utáni relatív maradó hasító-húzószilárdságára (jelölés: PP-szál adagolás V/V%; LB adagolás m/m₃)

Fig. 9. Effect of the dosage of PP-fibre and air-entraining admixture on the relative residual split-tensile strength of the concrete (notation: dosage of PP-fibre V/V% and air-entraining admixture m/m₃)



10. ábra A PP-szál és légbuborékképző adalékszer adagolásának hatása a beton hasító-húzószilárdságának hőtüréseire (jelölés: PP-szál adagolás V/V%; LB adagolás m/m,%)

Fig. 10. Effect of the dosage of PP-fibre and air-entraining admixture on the temperature endurability of the split-tensile strength of concrete (notation: dosage of PP-fibre V/V% and air-entraining admixture m/m,%)



11. ábra A PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolásának hatása a hőterhelés utáni relatív maradó H/N értéke változására (jelölés: PP-szál adagolás V/V%; LB adagolás m/m,%)

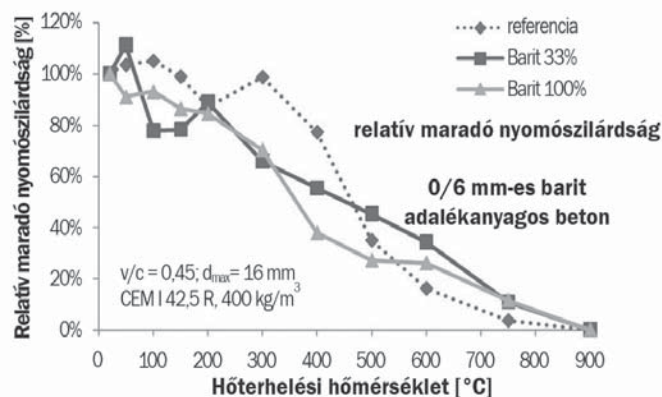
Fig. 11. Effect of the dosage of PP-fibre and air-entraining admixture on the H/N (split-tensile/compressive strength) values (notation: dosage of PP-fibre V/V% and air-entraining admixture m/m,%)

5.3 0/6 mm-es barit adagolás hatása a beton hőterhelés utáni maradó szilárdsági jellemzőire

0/6 mm-es frakciójú barit felhasználásával kísérleteket végeztünk, hogy megállapítsuk az így készült beton hőterheléssel szembeni ellenállását. Két eltérő receptúra szerinti betont vizsgáltunk. Először a 0/4 mm-es homoktartalom 33%-át helyettesítettük a 0/6 mm-es barit frakcióval. Majd a teljes homokfrakció helyett 0/6 mm-es barit frakciót alkalmaztunk. A nyomószilárdságok hőtüréseiből (12-13. ábra) látható, hogy a 0/6 mm-es barit adagolás növelésével a beton hőtürése kis mértékben csökken. Ugyanakkor nagy hőmérsékletek esetén (500 °C felett) a hőtürés kedvezőbb. Vizsgálva a relatív maradó hasító-húzószilárdságok változását (14. ábra) megállapítottuk, hogy nagy hőmérsékleteken (500 °C felett) markáns többszilárdság mérhető. A 2,0 MPa-os határt 380–400 °C-ig meghaladják az abszolút hasító-húzószilárdsági eredmények.

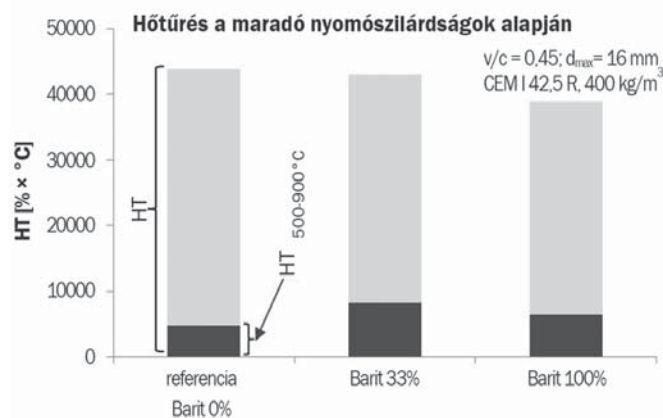
A H/N érték elemzésekor (15. ábra) az eddigiektől eltérő következtetésre jutottunk. A nyomó és hasító-húzószilárdság

aránya 0/6 mm-es barit adagolásakor 500 °C-ig közel állandó szinten marad. Csak 500 °C felett kezdődik meg a beton ridegkedése. A görbék jellemzésére bilineáris összefüggés alkalmas, melyet a 15. ábrán feltüntetünk.



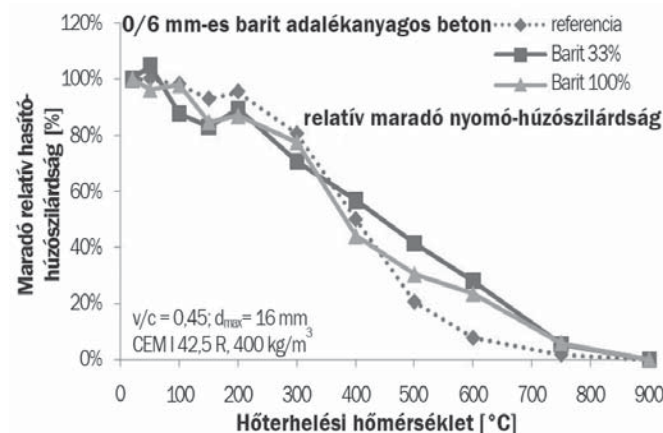
12. ábra A 0/6 mm-es barit adagolás hatása a hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdságának változására (jelölés: barit adagolás m/m_{0/4}-ban)

Fig. 12. Effect of the dosage of 0/6 mm barite on the relative residual compressive strength of concrete (notation: dosage of barite m/m_{0/4}%)



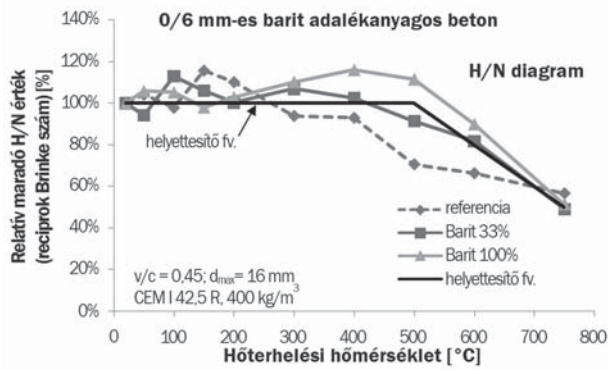
13. ábra A 0/6 mm-es barit adagolás hatása a beton nyomószilárdságának hőtürése (jelölés: barit adagolás m/m_{0/4}-ban)

Fig. 13. Effect of the dosage of 0/6 mm barite on the temperature endurability of the compressive of concrete (notation: dosage of barite m/m_{0/4}%)



14. ábra A 0/6 mm-es barit adagolás hatása a hőterhelés utáni relatív maradó hasító-húzószilárdságának változására (jelölés: barit adagolás m/m_{0/4}-ban)

Fig. 14. Effect of the dosage of 0/6 mm barite on the relative residual split-tensile strength of concrete (notation: dosage of barite m/m_{0/4}%)



15. ábra A 0/6 mm-es barit adagolás hatása a maradó H/N érték reciprokának relatív változására

Fig. 15. Effect of the dosage of 0/6 mm barite on the H/N (split-tensile/compressive strength) values

6. Összefoglalás

A különböző betontechnológiai paraméterek és beton-adalékok hőterhelés után maradó szilárdságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk.

Összesen 1512 db próbatestet vizsgáltunk. Ø60/120 mm-es hengeren a maradó nyomószilárdságot és Ø60/60 mm-es hengeren a hasító-húzószilárdságot értékeltük. További 280 próbatestet vizsgáltunk az összehasonlító szilárdság, víztartalom és látszólagos porozitás meghatározásához.

A vizsgálatoknál állandó paraméter volt a cementtartalom (400 kg/m³) és a cementtípus (CEM I 42,5 R). Vizsgáltuk a víz/cement tényező, a maximális szemmagyság, a PP-szál és a légbuborék-képző adalékszer hőtűrésre gyakorolt hatását. Kísérleteket végeztünk továbbá a 0/6 mm-es barit, mint homok-helyettesítő adalékanyag alkalmazhatóságára vonatkozóan a hőtűrésre gyakorolt hatás szempontjából.

7. Megállapítások

Ø60/120 mm ill. Ø60/60 mm-es hengereken vizsgálva a hőterhelés után maradó szilárdsági paramétereket megállapítottuk, hogy a víz/cement tényező növelésével a nyomószilárdság csökkenése egyre kisebb hőmérsékleten indul meg. A PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolású próbatestek relatív maradó nyomószilárdsága, az adagolás mértékétől függetlenül, a hőmérséklet növekedtével, lineárisan csökken.

Kvarcadalékanyagú betonok esetén a hasító-húzószilárdságok, és a H/N értékei (a hasító-húzó- és nyomószilárdsági eredmények hányadosa) a hőmérséklet emelkedésével csökken: ez a csökkenés egy-egy bilineáris közelítéssel írható le. A csökkenés független a víz/cement tényezőtől, a maximális szemmagyságtól, a PP-szál és légbuborék-képző adalékszer adagolásától. A d_{max} változás nem okozott kimutatható hatást a relatív maradó szilárdságokban. 0/6 mm-es barit adagolása esetén a maradó relatív nyomó- és hasító-húzószilárdságok, 500 °C feletti hőmérsékletek esetén a referencia értéknél kedvezőbbek. A „szívósságra” jellemző H/N érték változása jelentősen kedvezőbb a csak kvarc adalékanyagú betonokénál, mert a baritos beton 500 °C-ig megtartja kezdeti szívósságát, és csak ezután kezd ridegedni.

A javíthatósághoz szükségesnek tekinthető, 1,5 MPa-os húzószilárdsághoz tartozó 2,0 MPa hasító-húzószilárdsági

értéket a betontechnológiai paramétereiktől függően mintegy 250–450 °C hőmérsékletig megtartják a betonok.

8. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Holcim Zrt.-nek (cement), a PólusKincs Zrt.-nek (barit) és a BASF Hungária Kft.-nek (Glenium 51 adalékszer; PP-szál) a kísérleti anyagok biztosításáért. Hasznos tanácsaiért Dr. Erdélyi Attilának, a laboratóriumi műszeres mérésekben való közreműködésért Demjén Anikónak, Gál Veronikának, Szabó Csillának, Allili Hamid Richárdnak, Diriczi Dávidnak, Eipl Andrásnak és Kovács Gábornak.

Felhasznált irodalom

- [1] Blennemann, F. – Girnau, G. (eds., 2005): *Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV*, Alba Fachverlag, Düsseldorf
- [2] Schneider, U. – Horvath, J. (2006): *Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten*, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin
- [3] MSZ EN 1992-1-2 (2005. március): *Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése; 1-2. rész: Általános szabályok: Tervezés tűzre*
- [4] Putz, U.: *Brandbeanspruchung von Tunnelbeton*; 45. Forschungskolloquium des DAStb, 100. Jahrgang Beton- und Stahlbetonbau, pp. 173-176, 2005
- [5] Winterberg, R. – Dietze, R. (2004): *Efficient fire protection system for high performance shotcrete*, Proceedings of the Second International Conference on Engineering Development in Shotcrete, Cairns, Queensland
- [6] Schneider, U. – Horvath J. (2002): *Behaviour of Ordinary Concrete at High Temperature*, Vienna University of Technology, Institute of Building Material, Building Physics and Fire Protection, Vienna, Austria in Khroustailev, B. M.; Leonovich, S. N. és Schneider, U.: *Behaviour of Concrete at High Temperature and Advanced Design of Concrete Structures* Proceedings of the International Conference „Construction and Architecture”, Minsk, 2003
- [7] Alonso, C. – Andrade, C. – Castellote, M. – Khoury, G. A. (2003): *Effect of Heat on Concrete: Microstructure – Solid Phase*; Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences; 2003. június 9-13., Udine
- [8] Short, N. – Purkiss, J. (2004): *Petrographic Analysis of Fire-Damaged Concrete*; Gambarova, P. G.; Felicetti, R. – Meda, A. – Riva, P. (eds.): *Proceedings of the Workshop: Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?*, Milan University of Technology, 2004. december 2-3., pp 221-230, Milánó
- [9] Beard, A. – Carvel, R. (eds.) (2005): *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, Thomas Telford Ltd., London
- [10] Khoury, G. A. – Majorana, C. E. – Pesavento, F. – Schrefler, B. A. (2002): *Modelling of heated concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 54/2, pp 77-101
- [11] Naus, D.J. (2007): *Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures – A Review of Pertinent Factors* Division of Fuel, Engineering and Radiological Research Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission megbízásából Oak Ridge National Laboratory (NRC Job Code N6002), 2007. február; Washington, DC
- [12] Nehme, S. G. – Balázs, L. Gy. (2007): *Tanulmány a Rudabányai-II meddőhányó BARITMIX I nevű adalékanyagból nehéz beton gyártásához szükséges mérések elvégzéséről*, Kutatási jelentés, BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tsz., Budapest
- [13] Nehme, S. G. v. Szendrei, Zs. – Nagy, B. (2008): *BARITMIX-1 adalékanyag-gal készült öntömörödő beton*, Építőanyag, Vol. 60/4, 2008/4, pp 94-99
- [14] Erdei s– Grúz, T. (1963): *Vegyszerismeret*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [15] Karátson, D. (1997): *Vulkanológia I*, ELTE egyetemi jegyzet, Budapest
- [16] Bognár, L. (1987): *Ásványhatározó*, Gondolat, Budapest