

A tűzterhelés utáni hűtés sebességének és módjának hatása a beton maradé nyomószilárdságára

FEHÉRVÁRI SÁNDOR ■ Debreceni Egyetem Műszaki Kar Építőmérnöki Tanszék ■ Fehervari.Sandor@t-online.hu

DR. SALEM GEORGES NEHME ■ BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék ■ sgnehme@yahoo.com

Érkezett: 2009. 04. 15. ■ Received: 15. 04. 2009.

The effect of the speed and the method of cooling down on the residual compressive strength of concrete after fire

In the last decades, despite the rigorous safety directives the number of traffic accidents in tunnels shows growing tendency. The evolving heat is dangerous to the passengers in the vehicles and to the structure itself too. Investigating the effect of the heat on the structure, important factors are not only the temperature and the duration of the fire but also the time of the cooling down phase too. Present paper summarised our series of tests which investigated the effect of the speed and the method of cooling down of concrete specimens on the residual strength. Comparing three mixtures cooled down in five different ways (slow, laboratory condition, forced air cooling, water mist and quenching) it was determined that neither the speed nor the cooling medium has so significantly different effect on the residual strength parameters as in the literature (e.g. CEB-208 Bulletin).

Keywords: tunnel, fire, thermal shock, cooling, concrete, compressive strength, air-entraining admixture, PP-fibre

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 a szokványos rendszabályokat. A normálistól eltérő körülmények mind az alagútban tartózkodókra, mind szerkezetére komoly fenyegetést jelentenek. Az elmúlt évtized statisztikai szerint továbbra is, a biztonságot fokozó minden intézkedés ellenére – a forgalmi terhelések növekedésével párhuzamosan – a balesetek száma növekszik. A forgalom-biztonság javítása, a balesetek számának és az okozott kárnak a csökkentése, valamint a balesetek túlélési esélyének növelése az egész világon több tudományágat integráló feladatot ad az alagutakat tervezők, építők, fenntartók és használók számára.

2. Alagúttüzek

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 a baleset során felszabadult nagy mennyiségű hő hatásai jelentősen eltérnek az „egyszerű” magasépítési tüzekétől (pl. ISO 834). Az ilyen speciális alagúti tűz katasztrófák által okozott hatásokkal szembeni védekezéshez a szokványostól eltérő szemléletmód kialakítása szükséges.

3. A tűzterhelés

Az alagút szerkezetének tűzvédelméhez, a tüzeset utáni maradé biztonság fokozásához meg kell érteni a hőhatás okozta jelenségeket. A szerkezeti anyagok vizsgálatához elsődleges fontosságú

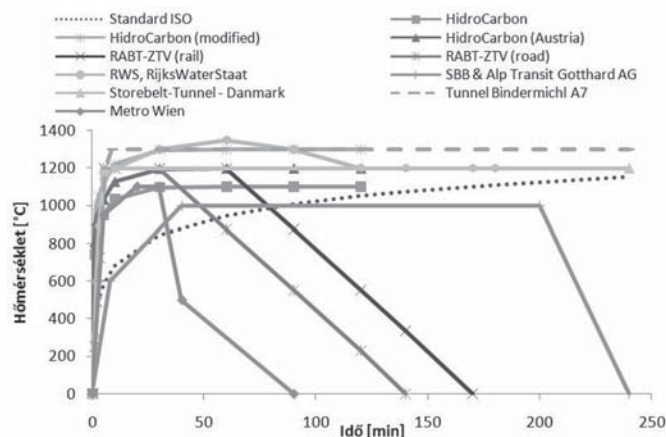
Dr. Fehérvári Sándor

(1981), okl. építőmérnök (BME 2006), okl. szerkezetépítő szakmérnök (BME 2009), PhD (BME 2009). Adjunktus a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Építőmérnöki Tanszékén, a DBR metró Projekt Igazgatóság projekt menedzsere. Fő érdeklődési területe az alagúttüzek természete, leírása és a szerkezetekre gyakorolt hatása, speciális mély- és alagútépítés módszerek, szerkezeti- és háttérjelműzés, 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 porozitási 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 nehézbetonok vizsgálatai, másodlagos (építési-, bontási) építőanyagok újrahasznosítása, vasbeton szerkezetek megerősítése szénlammalával, vasbetonszerkezetek tartóssága. Acélszálalású vasbeton lemezek átszűrődési teherbírásának növelése acélszálakkal. A fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

a falazatot érő hőterhelés meghatározása. Elméleti számítások, numerikus és nagyminta kísérletek eredményeképpen több európai országban meghatározták az alagúttüzekre érvényes szabványos lég(gáz) hőmérsékleti görbéket. Egyes ún. 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.



1. ábra A mértékadó lég(gáz)hőmérsékletek (szabványos tűzgörbék) a tűz környezetében Blehnmann és Girnau [1] valamint Schneider és Horvath [2] alapján

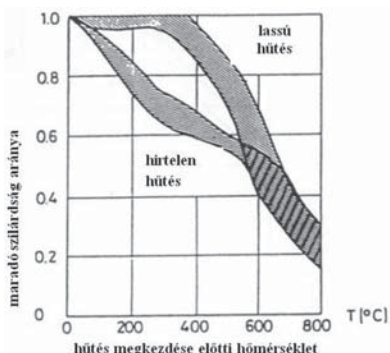
Fig. 1. Authoritative air/temperature (standard fire curves) near the fire according to Blehnmann és Girnau [1] and Schneider and Horvath [2]

4. Alagúti vasbetonfalazatok viselkedése tűz esetén

A hatások ismeretében lehet a tűzvédelem többtényezős rendszerét megtervezni. A védelemnek, az alagútban tartózkodók és a műtárgy aktív megóvásán, a biztosító, jelző és oltóberendezéseken kívül fontos területe a tűz alatt és után is jelentős terheket viselő műtárgyszerkezet állékonyságának, vagyis a szerkezet hőtürésének 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 teherbíróképességének szempontjából. A szokványos betonacélok szilárdsága már viszonylag kis (kb. 400 °C-os) hőmérsékletnél is rohamosan csökkenni kezd [3]. A szerkezetbe épített acél védelmének leghatékonyabb módja a *betonfedés növelése*, mintegy hővédő, hőszigetelő réteget képezve [4]. A szerkezeti beton tűzállóságának javítását segítheti az anyagban lezajló *fizikai és kémiai változások* tanulmányozása. A hőmérséklet emelkedésével a betonban lévő fizikailag és kémiailag kötött vizek felszabadulnak, gőzzé válnak. Magasabb hőmérsékleteken egyes alkotók (kvarc) *fázisátalakuláson*, míg mások (CaCO₃) *hőbomláson* mennek át. A kialakuló gőz-, gáz- és mechanikai nyomás a felületi rétegeket lehámlaszthatja, lefeszítheti, ami *réteges leválást (spalling)* eredményezhet [5]. A réteges leválásban rejlő legnagyobb veszély a *betonfedés folyamatos csökkenése és az acélbetétek felszínre kerülése*. A beton nyomószilárdságának csökkenése szintén követi a hőmérséklet emelkedését. A tűzzel érintkező felületen a *nyomószilárdsági értékek* csökkennek [3].

A hűtés hatását foglalja össze a CEB Bulletin 208-ban [6] közölt összefüggése (2. ábra). A lassan kihűlt és a gyorsan hűtött (vízbemerített) 150 mm átmérőjű, 300 mm magas hengereken elvégzett maradó nyomószilárdságok vizsgálata szerint markáns különbség van a két hűtési mód eredménye között. A két hűtési eljárás során szerzett tapasztalatok általánosításából kb. 450–500 °C-ig levont következtetés szerint a gyorsan hűtött betonok esetében jelentősen kisebb a maradó szilárdság (*mindenféle, a hűtési módra vonatkozó egyéb utalás csak a Bulletin szövegében található*).



2. ábra Hűtés sebességének hatása a beton maradó hengersizilárdságára a CEB Bulletin 208 szerint [6]

Fig. 2. The effect of the speed of cooling down on the residual cylinder strength of concrete according to the CEM Bulletin 208 [6]

5. Beton tulajdonságainak kísérleti vizsgálata

A beton hűtési/hűlési módtól függő tulajdonságainak megváltozását a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában vizsgáltuk. A kísérletek célja, hogy meghatározzuk a beton mechanikai paramétereinek megváltozását a lökészerű *hőterhelés (hősokk)* után a különböző sebességgel és módon hűtött betonokon.

5.1 Kísérleti receptúrák

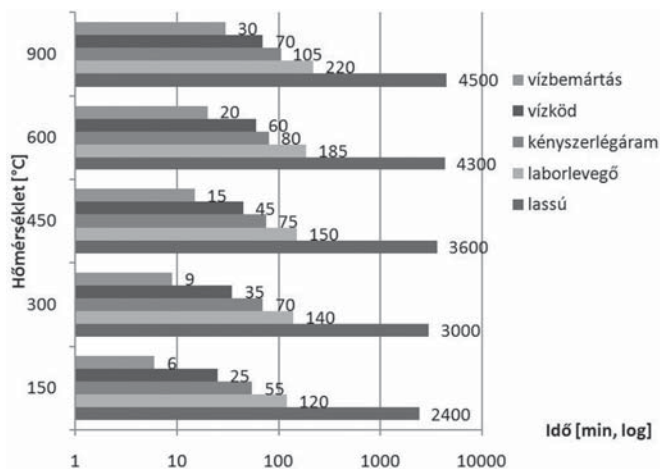
Az összetétel tervezésekor állandó paraméternek választottuk a cement típusát és adagolását (CEM I 42,5 R; 400 kg/m³), a maximális szemmagyságot (16 mm), a szemeloszlást, és a víz/cement tényezőt (0,45). Az etalon beton (ET) mellett vizsgáltuk a légbuborékképző adalékszer (BASF MicroAir LB) (0,3 m_c%) valamint a polipropilénszál (PP) adagolásának (0,1 V% ~ 1 kg/m³) hatását. A frissbeton konzisztenciáját BASF Glenium 51 adalékszerrel állítottuk be.

5.2 Hűtési módok

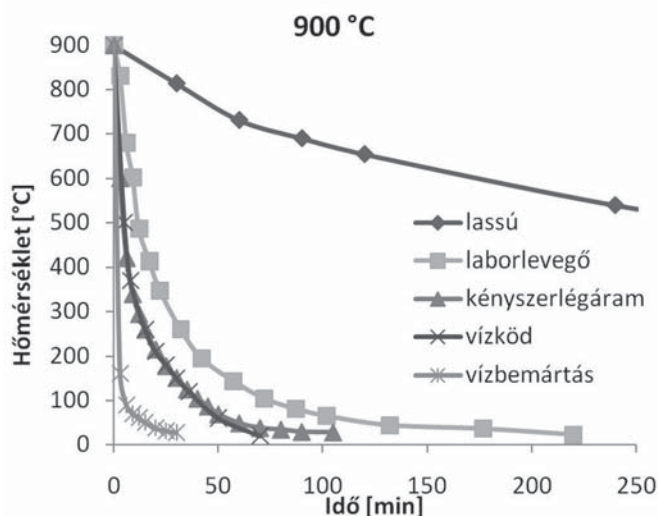
Vizsgálataink során törekedtünk mind a valóságos mind extrém hűtési helyzetek utánzására. Az öt hűtési mód során *három esetben a hűtőközeg levegő, míg két esetben víz volt*. Levegővel való hűtéskor, az általános hőterheléses kísérleteknél szokásos, *laborlevegőn* való tárolást alkalmaztunk. Az alagútban található hőfelhalmozódás és lassú kiszellőzés modellezésére a *lassú hűtés* szolgált. A lassú hűtés technikai megvalósításaként a hőterhelő kemencében tartást (zárt ajtókkal) választottuk a teljes kihűlésig. Az alagúti szellőzőrendszerek által keltett *légmozgások* (hossz- és keresztáramú szellőzési módok, [7]) *hűtő hatását* kényszer-légkeverés alkalmazásával modelleztük. A próbatetek körül átlagosan 2,5 m/s sebességgel áramlott a laborlevegő (22±1 °C). Vízrel történő hűtés esetén szintén több módszert alkalmaztunk. Az alagutakban található vízködölő (water mist; [7]) berendezések falazatra gyakorolt hűtő hatását vízködöszerű berendezés kiépítésével modelleztük. A hat fúvókából álló rendszer vízhozama fúvókánként 0,58 g/s, míg a próbatetek elhelyezésének szintjén mért felületegységre vetített átlagos vízhozam mintegy 17 g/s×m² volt. A leggyorsabb, legradikálisabb hűtési teljesítményt a vízbemártás adta, amikor is a kemencéből kikerülő próbateteket 800 l térfogatú, laborhőmérsékletű vízzel töltött kádba helyeztük.

A *teljes lehűléshez szükséges időt* a 3. ábrán látható diagramon ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy az ún. lassú („kemencés”) kihűlés esetén kb. egy nagyságrenddel több időre volt szükség a próbatetek laborhőmérsékletre való visszahűléséhez. A lehűlési görbék különböző jellegét szemléltetik a 900 °C hőmérsékletről történő *hűtések hőmérséklet-idő diagramjai* (4. ábra). Minden görbe közel azonos lefutású, a lehűlés időtartama a döntő tényező. A léghűtéses rendszereken az utolsó cca. 50 °C kihűlése igényelt jelentős időt, míg a víz hűtőközegűnél ezt a tartományt lényegesen gyorsabban hűtötte ki. Ugyanakkor ez az utolsó hőmérsékleti tartomány (100 °C alatt) a szilárdság alakulásában már nem játszik szerepet (sem kémiai sem fizikai átalakulások nem történnek), tehát ez a különbség elhanyagolható. A grafikonról leolvasható továbbá, hogy a kényszerlégárammal, illetve a vízköddel hűtött próbatetek (4. ábra) lehűlése a fent említett utolsó szakasz kivételével

gyakorlatilag megegyezik. A két típusú hűtési mód között tehát a hűtés sebessége tekintetében nem, csak a hűtőközegben van különbség.



3. ábra Teljes lehűléshez szükséges idő
Fig. 3. Time of the total cooling down



4. ábra Lehűlés sebességének alakulása 900 °C-on hőterhelt próbatetest esetén
Fig. 4. Speed of cooling down of specimens heated at 900 °C

5.3 Vizsgálatok

A beton hőterhelés után maradó („reziduális”) jellemzőinek meghatározására a szabványos 150 mm élhosszúságú próbakocka nyolcfelé fűrészelésével nyert, mintegy 72 mm élhosszúságú, vágott kockákat készítettünk. A keverékek további szilárdsági összehasonlításához 150 mm élhosszúságú próbakockákat is vizsgáltunk. A próbatesteket egy napos korrig sablonban, egy hetes korrig víz alatt tároltuk. 28 napos korrig – a vizsgálat időpontjáig – laborlevegőn tartottuk a próbatesteket. A vizsgálatokat megelőző héten fűrészeléssel munkáltuk ki a próbakockákból a vizsgálatához szükséges alakot. További próbatestek készültek a kiindulási (hőterhelés előtti) nedvességtartalom, valamint a beton látszólagos porozitásának és vízfelvételének a meghatározására. Mindösszesen 273 próbatestet vizsgáltunk a kísérletsorozat kapcsán.

Hőterhelés előtt meghatároztuk a próbatestek tömegét és geometriai méreteit, majd az adott hőmérsékletű (előfűtött)

elektromos kemencébe helyeztük. Az egységesen 120 perces hőntartás (150, 300, 450, 600 ill. 900 °C) után kemencéből kivéve tettük ki a kísérleti terv szerinti, az 5.2 pontban részletezett, hűtési módoknak. A három különböző receptúrából származó, azonos hőlépcsőhöz és hűtési módhoz tartozó próbatesteket minden esetben egyszerre vizsgáltuk. A teljes kihülés után ismét meghatároztuk a próbatestek tömegét és a geometriai méretét. Ezt követte a nyomószilárdsági vizsgálat. Az eredményeket a laboratóriumi levegőn tárolt próbatestek (20 °C-os, egységesen 10-10 db/receptúra mennyiségű próbatestet) eredményeivel vetettük össze. A grafikonokon ábrázolt pontok a nyomószilárdsági vizsgálat 3-3 eredményének átlagát jelentik meg. A maradó szilárdság meghatározására a teljes kihülés után mért szilárdságokat vettük alapul.

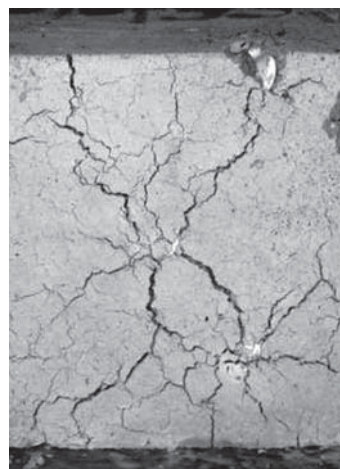
5.4 Az eredmények értékelése

5.4.1 Általános betonvizsgálatok

A frissbeton keverékeken elvégeztük a szokásos betonvizsgálatokat. Vegyes tárolás után, 28 napos korban mértük a megszilárdult beton testsűrűségét, valamint a próbatestek nyomószilárdságát. Meghatároztuk továbbá a beton próbatestek nedvességtartalmát (65 °C-on tömegállandóságig történő szárítással), valamint a látszólagos porozitását (a kiszáritott próbatestek teljes vízbemerítéssel történő, tömegállandóságig tartó víztelítésével). Az eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

5.4.2 Vizsgálatok általános megállapításai

A hűtési módtól függetlenül, még a 600 °C-on hőterhelt próbatesteken sem jelentkezett jelentős, szemmel látható szerkezeti károsodás. A 900 °C-on hőterhelt próbatesteken azonban a hűtés folyamán jelentős szerkezeti károk keletkeztek. A levegőn hűtött próbatesteken (mindhárom hűtési mód esetén) repedések jelentek meg a próbatestek felszínén (5. ábra). Vízköddel történő hűtés során a próbatesteken gyorsan növekvő repedések jelentek meg, és a repedések miatt a próbatestek darabokra estek (6. ábra). A vízbemártás során a próbatestek azonnal apró darabokra estek szét (7. ábra). 900 °C-ról a vízzel hűtött próbatestek esetén, tehát maradó szilárdságról gyakorlatilag nem beszélhetünk.



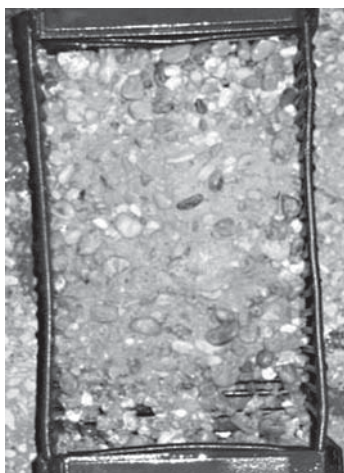
5. ábra 900 °C-ról levegőn (lassú hűtés, laborlevegő, kényszerlégáram) hűtött próbatestet
Fig. 5. Specimens heated at 900 °C cooled with air (slow, laboratory condition, forced air)

	Jel		
	ET	LP	PP
frissbeton testsűrűsége, kg/m ³	2370,00	2154,00	2334,30
tervezett légtartalom, l/m ³	20,00	75,00	25,00
konzisztencia területtel mérve, mm	450,00	450,00	470,00
frissbeton hőmérséklete, °C	26,00	29,00	27,00
léghőmérséklet, °C	28,00	29,00	25,00
tényleges számított légtartalom, l/m ³	13,70	101,00	27,90
mért légpórus-tartalom, l/m ³	15,00	90,00	27,00
testsűrűség, 28 napos korban vegyes tárolás után, 150 mm-es ref. próbatesten mérve	2339,50	2100,70	2292,30
átlagszilárdság, 28 napos korban 150 mm-es kockán mérve, vegyes tárolás után, N/mm ²	55,40	32,80	51,90
jellemző nyomószilárdság, N/mm ² és minősítés (ÚT 2-3.414 szerint)	49,5 - C35/45	27,7 - C20/25	46,1 - C30/37
nedvességtartalom, 28 napos korban, a hőterhelt próbatestekkel azonos tárolás mellett, m%	3,89	3,60	4,02
látszólagos porozitás, 28 napos korban, a hőterhelt próbatestekkel azonos, vegyes tárolás után, V/V%	13,02	15,37	13,26
vízfelvétel, 28 napos kortól, a hőterhelt próbatestekkel azonos tárolás után, m/m%	5,91	7,71	6,12

1. táblázat Friss- és megszilárdult betonjellemzők
Table 1. Parameters of fresh and solid concrete



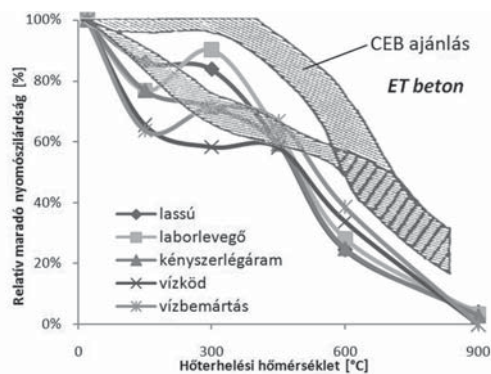
6. ábra 900 °C-ról vízköddel hűtött próbatest
Fig. 6. Specimens heated at 900 °C cooled with water mist



7. ábra 900 °C-ról vízbemártással hűtött próbatest
Fig. 7. Specimens heated at 900 °C cooled with quenching

vizsgálható a vízbemártás és a lassú hűtés hatása, mint a két szélső eset, úgyis mint a CEB eredménygörbéi alapjául szolgáló vizsgálatok – vélelmezett – megisméltése. Vizsgálható továbbá a vízköddel illetve a kényszerlégárammal hűtött próbatesteken mért relatív maradó nyomószilárdságok változása, mivel a két hűtési mód gyakorlatilag azonos lehülési sebességgel járt. Az általános jellegük és a fenti két összehasonlítás alapján jellemezhetőek a görbeseregek.

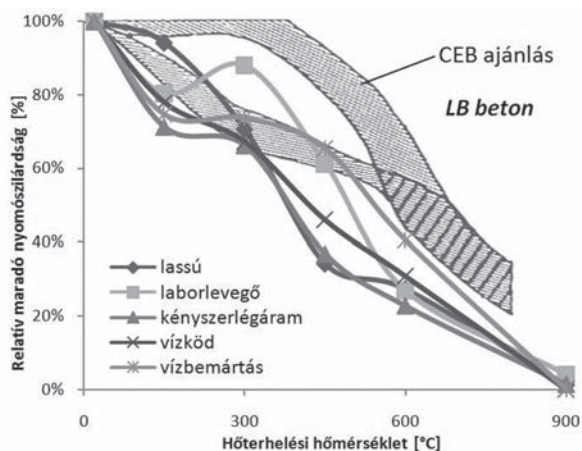
Az etalon beton (8. ábra) esetén figyelhető meg legszembetűnőbben az, hogy a 450 °C-on mért kb. 60%-os relatív szilárdságszinttől közel együtt haladnak a görbék. Megjegyzendő, hogy ez a megállapítás egybevág a CEB ajánlásaival, ugyanakkor a kisebb hőmérsékleti tartományban nem látható a fent már többször említett eltérő viselkedésbeli jelleg. A két szélsőséges hűtési mód összehasonlításából megállapítható, hogy a legnagyobb, 300 °C-os hőterhelésnél mért különbségtől eltekintve, viszonylag egymáshoz közeli maradó szilárdságot eredményeztek. Figyelemre méltó továbbá, hogy a 450 és a 600 °C-on terhelt próbatestek esetében (igaz csak kis különbséggel) a legnagyobb maradó szilárdsági eredményt a vízbemártással hűtött próbatesteken mértük. Kis hőmérsékleti tartományban is megfigyelhető eltérés a vízköddel és a kényszerlégárammal hűtött próbatesteken mért szilárdság között.



8. ábra Etalon keverék maradó nyomószilárdsága
Fig. 8. Residual compressive strength of the etalon mixture

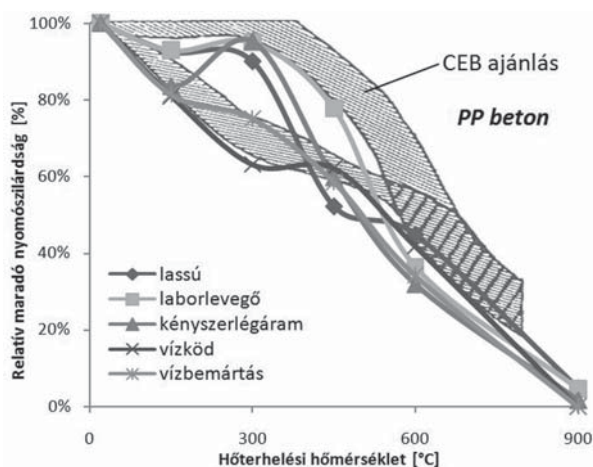
A görbeseregek összehasonlítása során az általános jelleg kívül még két, speciális értékelésre nyílik lehetőség. Egyrészt

A légbuborékképző adalékszerrel (9. ábra) készített betonok (LP) maradó nyomószilárdsága meg sem közelíti a CEB ajánlásait, annál lényegesen kedvezőtlenebb értéket eredményeztek. A szilárdság-változás görbék gyakorlatilag egyenes vonallal jellemezhetők. A két szélsőséges hűtési mód eredménygörbéje egyértelműen fordítva viselkedik, mint az előzetesen elvárható lett volna. 300–600 °C között a vízbemártással hűtött próbatestek nagyobb szilárdságúak. A vízköddel és kényszerlégárammal hűtött próbatesteknél a légbuborékképző adalékszerrel készített betonok esetében jelentős különbséget nem mértünk.



9. ábra Légbuborékképző adalékszer tartalmú keverék maradó nyomószilárdsága
Fig. 9. Residual compressive strength of mixture containing air-entraining admixture

A polipropilén szál (10. ábra) adagolásával készített beton (PP) próbatesteknél tapasztalható a legnagyobb eltérés az eredménygörbék között, egyszersmind a CEB ajánlásaiban találhatóhoz leginkább hasonló a kettős jelleg. Ugyanakkor itt nem a hűtési sebessége, hanem a hűtési módja játsza a legfőbb szerepet a 300 °C hőterhelés után maradó nyomószilárdsági értékek különbözőségében. A két szélsőséges hűtési mód közötti legnagyobb eltérés is ebben a hőmérsékleti tartományban jelentkezik, azonban értéke elmarad a legnagyobb mért különbségtől. A két azonos lehűlési sebességgel rendelkező hűtési mód között ebben az esetben azonban komolyabb különbséget fedezhetünk fel a 300 °C-os hőmérsékleti tartományban, ez azonban csak itt jelentkezik.

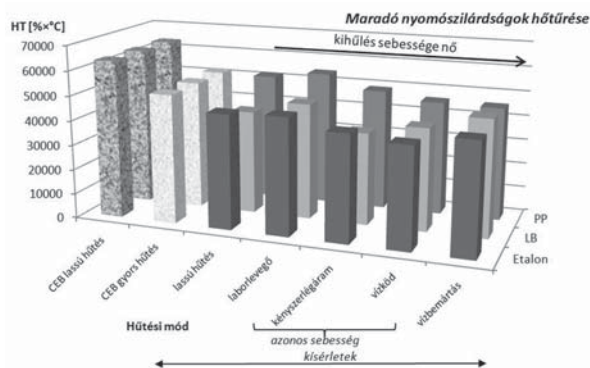


10. ábra Polipropilén szál tartalmú keverék maradó nyomószilárdsága
Fig. 10. Residual compressive strength of mixture containing PP-fibre

A vizsgálatokból megállapítottuk, hogy a CEB ajánlásai szerinti, a hűtési sebességtől függő markáns, a szilárdsági karakterisztikákban jelentkező eltérés nem egyértelmű. Vizsgálva mind a két szélsőséges hűtési módot – vízbemártás a lassú hűtéssel szemben – megállapítható, hogy a lehűlési időben tapasztalható több mint tízszeres különbség ellenére a két hűtési mód utáni maradó nyomószilárdságban lényegi eltérés nem tapasztalható. Ugyanakkor a jó közelítéssel azonosnak tekinthető lehűlési sebességű hűtési módok között (vízköd és kényszerlégáram) is megfigyelhető kisebb, de a polipropilén szál adagolása esetén már jól látható eltérés.

Fentiekből megállapítható, hogy – kísérleteink alapján – a hűtési sebességnek és módnak nincs jelentős hatása a maradó szilárdságra. Mind a kisebb mind a nagyobb hőmérsékleti tartományban, összetételtől függetlenül a hűtési eljárások jelentős, kimutatható hatással nincsenek a szilárdsági jelleg alakulására.

Meghatározva a relatív maradó nyomószilárdság – hőterhelési hőmérséklet diagramok határozott integrálját, a hőtűrés (%×°C), a görbék további összehasonlítására nyílt lehetőség. A 11. ábrán a vizsgálati eredményeinkből származtatott hőtűrés mellett feltüntetettük CEB lassú és gyors hűtési középgörbéjéből számított értékeket is. Szintén szembevetnő, hogy a CEB ajánlái által meghatározott hőtűrések felülmúlják a vizsgálatainkból meghatározott értékeket. A hőtűrés minimumát a vízköddel és a kényszerlégárammal hűtött, vagyis a gyakorlatban legnagyobb valószínűséggel alkalmazott hűtési módok adják.



11. ábra A maradó nyomószilárdságok hőtűrése a hűtési mód függvényében, összehasonlítva a CEB-208 Bulletin ajánlásaival

Fig. 11. Temperature endurance of the residual compressive strengths in the function of the cooling method compared with the recommendation of CEB-208 Bulletin

6. Összefoglalás

A hűtési sebességnek és a hűtési módnak a maradó szilárdságra gyakorolt hatásának vizsgálatával foglalkoztunk. Az alagút-tüzek speciális jellegéből adódóan következik, hogy nemcsak a gyors hőfelhalmozódás, a lökészerű hőterhelés (hősokk) és hőakkumuláció miatt kell a falazat maradó teherbírásának kérdésével foglalkozni, hanem a hőterhelt falazat visszahűlésének jellegéből adódó maradó szilárdsági eltérések is vizsgálandók.

Kutatásaink során három betonkeveréket vizsgáltunk. Állandó volt a víz/cement tényező, a cementadagolás, a maximális szemnagyság és a szemeloszlás. A beton receptúrák a hozzáadott légbuborékképző adalékszer (LP) adagolásában, illetve a polipropilén szál adagolásában (PP) tértek el az etalon

keveréktől. A hűtés-hűlés hatásainak vizsgálatok a próbatesteket 150–900 °C között, öt hőfoklépcsőn történő 120 perces hőn tartás után hűtőközegként levegőt és vizet alkalmazva hűtöttük vissza a laboratórium hőmérsékletére. A levegővel történő hűtéskor összevetettük a laborlevegőn, a kényszerlégárammal történő hűtést a lassú hűtéssel. A vízzel történő hűtési módok közül a vízbemártást és a vízköddel történő hűtést vizsgáltuk. A laborhőmérsékletre való visszahűléshez szükséges idő széles határok között mozgott.

7. Megállapítások

A visszahűlt próbatesteken elvégzett nyomószilárdsági vizsgálatokból megállapítottuk, hogy az irodalmi adatok (pl. CEB) hivatkozásai alapján vélelmezett *markáns eltérés a gyorsan és lassan hűtött próbatestek viselkedése között nem áll fenn*. Megállapítottuk továbbá, hogy a CEB-208 ajánlás a maradó nyomószilárdságokat és a hőtűrést mindkét lehűlési sebességi (lassan és gyorsan hűtött) tartományban, a *biztonság kárára túlbecsüli*.

A keverékek viselkedését a hűtési módok alapján vizsgálva megállapítottuk, hogy a *két szélsőséges hűtési mód szilárdságának változása és hőtűrése között jelentős különbség nem tapasztalható*, míg az *azonos lehűlési sebességgel rendelkező, eltérő hűtési módok között is mérhető eltérés*. A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a hűtési sebességnek és a hűtési módnak a maradó szilárdságra, valamint a hőtűrésre gyakorolt hatásában *egyértelmű összefüggés nem mutatható ki*.

A három, eltérő összetételű beton viselkedése között, *azonos hűtési/hűlési mód esetén csekély különbséget tapasztaltunk*. A polipropilén-szál adagolása esetén minimális többlétszilárdságot mutattunk ki.

Vizsgálati eredményeink alapján kijelenthető, hogy közel azonos betonösszetételek esetén a hűtési módtól függetlenül azonos maradó szilárdság mérhető. A maradó szilárdság emelésére így csak a betonösszetétel megváltoztatásával, pl. kedvezőbb hőtűrésű cementtel (pl. CEM I 32.5 R(S)) [10] vagy speciális adalékanyag alkalmazásával (pl. barit) [11] lehetséges.

8. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a *Holcim Zrt.*-nek (cement) és a *BASF Hungária Kft.*-nek (Glenium 51 adalékszer; PP-szál) a kísérleti anyagok biztosításáért. Hasznos tanácsaiért *Dr. Erdélyi Attilának* (BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék), a laboratóriumi műszeres mérésekben való közreműködésért *Kalmár Gábornak* (BME Áramlástani Tanszék) és *Tóth Patriknak*. Megköszönjük továbbá a *HanSa Kft.* és a *MetroConsult Kft.* támogatását.

Felhasznált irodalom

- [1] Blennemann, F. – Girna, 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 tűzterherre
- [4] Putz, U. (2005): *Brandbeanspruchung von Tunnelbeton*; 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 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, Australia
- [6] CEB Bulletin D'Information Number 208: *Fire design of concrete structures*, 1991
- [7] Fehérvári S. (2007): *A füstgázok keletkezése és kezelése alagúttüzek esetén*, Közúti és Mélyépítési Szemle, Vol. 57./6., pp.: 11-15
- [8] fib Bulletin 38, (2007): *Fire design of concrete structures- materials, structures and modelling*
- [9] ÚT 2-3.414 (2004): *Közúti hidak tervezési előírásai IV. Beton, vasbeton és feszített vasbeton közúti hidak tervezése*, Magyar Útügyi Társaság, 2004.10.01.
- [10] Fehérvári, S. – Nehme, S. G. (2009): *How portland and blended cements resist to high temperature of tunnel fires?*, Concrete Structures
- [11] Fehérvári, S. – Nehme, S. G. (2009): *Effect of the concrete's component on the heat shock bearing capacity of tunnel linings*, Periodica Politechnica Civil Engineering