Alagúttűzek hatása az alagútfalazat és kőzetkörnyezet teherbírására

CSANÁDY DÁNIEL ■ BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék ■ csanady.daniel@epito.bme.hu
FENYVESI OLIVÉR ■ BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék ■ fenyvesi.oliver@epito.bme.hu
LUBLÓY ÉVA ESZTER ■ BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék ■ lubloy.eva@epito.bme.hu
MEGYERI TAMÁS ■ Mott MacDonald Magyarország Kft. ■ tamas.megyeri@mottmac.com

Érkezett: 2018. 01. 05. ■ Received: 05. 01. 2018. ■ <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.11>

Effects of tunnel-fire on load bearing capacity of tunnel-lining and surrounding rock mass

The effect of tunnel-fire can causes significant changes in strength of the tunnel-lining and the rock environment. Different concrete specimens which modelled the closer and further part of the lining from the fire were tested after different heating and cooling treatments. Diagrams and reducing factors recommended by the standard MSZ EN 1991-1-2:2005 were investigated by different conditions according to hydrocarbon fire curve. The reason of differences between the test results and standard curve were investigated. The reasons of failures were analysed due to the breaking surfaces and failure shape of specimens and processes during heating and cooling. The resulted differences were investigated to apply particular numerical model which can handle the temperature changes. The change of compressive strength and Young's modulus were measured and compared with the standard values. The Young's modulus which was calculated from measured compressive strength was also compared with the measured values. Temperature has been determined where the measured and calculated curves fit correctly and the required reducing factors also.

The test results showed that in case of tunnel fires the reducing factors depends on heating and cooling rates. The calculated Young's modulus values are accurate until a certain limit and beyond this limit Young-modulus can be considered as zero. Starting from the test results, the possibility of creating a fast and efficient routine method was investigated. This method is able to predict the conditions of load-bearing structure of fire-loaded tunnels, after fire.

Keywords: Tunnel-fire, standard fire curve, high temperature, concrete, compressive strength, modulus of elasticity

Kulcsszavak: Alagúttűz, szabványos tűzgörbe, magas hőmérséklet, beton, nyomószilárdság, rugalmassági modulus

1. Bevezetés

Cikkünk a Szilikátipari Tudományos Egyesület által 2016-ban meghirdetett diplomapályázaton II. helyet elnyert diplomamunka témáját mutatja be.

Az alagúttűzekből származó hőhatás jelentős változásokat eredményezhet az alagútfalazat és a kőzetkörnyezet szilárdsági és merevségi tulajdonságaiban, esetlegesen teljesen tönkre is teheti a szerkezeti elemeket (*Sarma, Ramana, 1979, Rideg, 2014*). Külön-külön már számos vizsgálat készült a kőzetkörnyezet (Görög 2007a, Görög 2007b) és az alagútfalazat vizsgálatáról (Parkinson, Ékes 2008). E mellett több szerző foglalkozott a falazat és kőzetkörnyezet egymásra hatásával is (Gál, Görög 2013, Oreste 2003). A hő hatására történő szilárdságváltozás mind a kőzetkörnyezet, mind a falazat szempontjából fontos. Gránitos kőzetek esetén a hő hatására történő szilárdságváltozásról *Török et al (2015)* írt, alagútfalazat betonjának vizsgálatát tűz hatására például Hertz (2003) végezte. A tűzből és tönkrement szerkezetből való mentés és a helyreállítás során az életvédelem a legfontosabb szempont. Az anyagi kár nyilvánvalóan annál nagyobb minél tovább van üzemben kívül egy alagút. Az említett veszélyek és károk minimalizálása érdekében vizsgáltuk azt, hogy a szabványban megadott szilárdságszökkenő tényezők alagúttűzek esetén való alkalmazása megfelelően pontos eredményeket adnak-e a tervezéshez.

2. Célkitűzések

Munkánk során alapvetően a tűz anyagjellemzőkre gyakorolt hatásával foglalkoztunk, kiemelve a vasbeton alagútfalazatban a beton anyagjellemzőinek változását visszahúlt állapotban. A diplomamunkában, a kőzetkörnyezetben hő hatására bekövetkező változásokra is kitértünk, de ez nem képezi jelen cikk témáját. Egy gyors és egyszerű eszközökkel végrehajtható, hőterhelés utáni maradó szilárdság/merevség becslési módszer megalkotásának lehetőségét is vizsgáltuk. Alagúttűz esetén, ha a tűz időtartama, maximális hőmérséklete ismert és azonos maximális hőmérsékletig, azonos időtartamig tartó hőterheléssel előállíthatók a sérült beton tulajdonságaival közel azonos tulajdonságú próbatestek, megállapítható, hogy körülbelül milyen mértékű károsodást szenvedett az alagútfalazat. Eltérő fűtési sebességgel a tűzfészekhez közeli vagy távolabbi falazatrészek modellezhetők és az eltérő hűtési módokkal szimulálható a különbség a falazat oltásakor hirtelen, vízzel lehűtött, illetve oltást követően a levegőn lehűlt részei között. A próbatestek csökkent szilárdságából következtetni tudunk arra, hogy a falazat különböző átmelegedésű zónáiban mekkora a szilárdságszökkenés. A hőterhelt és az etalon (hőterhelés nélküli) próbakockák szilárdsági értékeinek viszonyozásából következtetni lehet a rugalmassági modulus változására is.

CSANÁDY Dániel

Okl. építőmérnök, doktorandusz a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési körök: építőanyagok (kiemelten beton) tűzzel szembeni viselkedése, környezetbarát építőanyagok, biomimetika, hőszigetelés, hangszigetelés, új építőanyagok fejlesztése.

Dr. FENYVESI Olivér

Dr. Fenyvesi Olivér (1981), okl. építőmérnök (BME 2005), PhD (BME 2012), műemlékvédelmi szakmérnök (BME 2017), adjunktus a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő kutatási területei: betonok korai (autogén+száradási) zsugorodása, korai zsugorodási repedések normál és könnyűbetonokban, szálerősített betonok, szálerősített könnyűbetonok, könnyűbetonok tartóssága, önterülő könnyűbetonok, épületdiagnosztika, épített örökség védelme. A Szilikátipari Tudományos Egyesület Beton Szakosztályának titkára illetve Kő és kavics szakosztályának tagja, a *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozatának tagja, a Magyar Mérnöki Kamara tagja.

Dr. LUBLÓY Éva

Dr. Lublói Éva (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), adjunktus a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A *fib* Magyar Tagozatának tagja.

MEGYERI Tamás

Okl. Építőmérnök (Mott MacDonald Magyarország Kft. 2007), alagutak és földmegtámasztó szerkezetek tervezésével foglalkozó geotechnikus mérnök.

3. Tűz hatása beton/vasbeton falazatra

A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak (1. ábra). A beton a lehűlés során részlegesen sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében irreverzibilis folyamatok mennek végbe, a beton anyagszerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy (Lublóy, 2008).

1. ábra A beton nyomószilárdságának változása a hőmérséklet függvényében (fib bulletin 38, 2007.)

Fig. 1. Compressive strength of concrete on different temperatures

2. ábra Száladagolás nélkül készült alagúttelep 1200°C-os hőterhelés után (fent) és 2 kg/m³ polipropilén száladagolással készült alagúttelep 1200°C-os hőterhelés után (lent) (Mörth, et al., 2005)

Fig. 2. Tunnel element made without fibres after fire loading on 1200 °C (above) and tunnel element made with 2 kg/m³ of polypropylene fibres after fire loading on 1200 °C (below)

Alagutak esetén fontos, hogy a betonfelületek réteges leválása tűz esetén ne következzen be. Számos kísérlet igazolta, hogy ennek veszélye műanyagszálak alkalmazása esetén lényegesen kisebb, mivel a szálváz kiégése során létrejövő pórusszerkezet a szétrepedés veszélyét csökkenti. (Mörth, et al., 2005). Alagúttelepekkel végzett kísérletek igazolták, hogy a polipropilén szálerősítésű betonok felületének réteges leválása a tűz hatására (1200 °C) nem következett be (2. ábra). Ausztriában egy kutatócsoport (Walter, et al., 2005) vasbeton födémeket tesztelt, melyeket gépekkel terheltek, majd kétórás tűzterhelésnek vetettek alá. A betontakarás rétegesen levált a szálerősítés nélküli födémeknél, azonban az 1-3 V% polipropilén szállal készült tábláknál réteges leválás nem volt tapasztalható. Általánosságban kijelenthető, hogy a kis átmérőjű, kis hosszúságú polipropilén szálak kedvező hatással vannak a betonra tűzterhelés esetén, mivel a réteges leválást akadályozzák (Horiguchi, Suhaendi, 2005, Lublóy, 2016).

A réteges leválás egyik kiváltó oka a megnövekedett párosugár-nyomás. A gőz és gázok által kifejtett nyomás a keresztmetszet mentén változik, de nem a tűzzel terhelt felület környezetében a legnagyobb. A felületközeli rétegekben a nyílt pórusrendszer a nyomást hatékonyan csökkenti. Ugyanakkor kis mélységben, ahol már a pórusok kiegyenlítő hatása nem érvényesül, létrejön egy „vízgőz-gát” (3. ábra).

3. ábra A betonfelület réteges leválása gőznyomás hatására (Winterberg, Dietze, 2004)

Fig. 3. Spalling of concrete surface due to vapour pressure

A betonacélok szilárdsága 400 °C-os hőmérséklet felett kezd rohamosan csökkenni. 1000 °C környezetében a vasalás teherbírása gyakorlatilag nullára csökken. Különbséget kell tenni a melegen hengerelt és a hidegen húzott betonacélok hőhatásra való méretezése között (MSZ EN-1992-1-2).

4. Közetkörnyezet viselkedése magas hőmérsékleten

Gránitoknál a kezdeti hőmérséklettartományban (~300 °C-ig) a nyomószilárdság 80%-kal megnő, majd magasabb, 600°C-os hőmérsékleten 15%-os szilárdságcsökkenés tapasztalható a 22 °C-os állapothoz képest (Török, Török, 2013).

A húzószilárdság értéke a magas hőmérséklet hatására csökken, 550 °C -nál a húzószilárdság értékében hirtelen esés ész-

lelhető (Sarma, Ramana, 1979). A vizsgálati tapasztalatok szerint a húzószilárdság a nyomószilárdság értékének 10%-a körül van. A pillanatnyi rugalmassági modulus értéke a hőmérséklet és a nyomás függvénye. A hőmérséklet emelkedésével a gránit minták rendre veszítenek a rugalmasságukból, 300 °C-nál pedig a rugalmassági modulus (közettömb) a felére csökken (Sarma, Ramana, 1979). Ezeket az eredményeket Török, Török (2013) ausztriai gránitokon végzett vizsgálatai is alátámasztották. Rideg (2014) számítással igazolta, hogy alagutakban már csekély hőmérsékletváltozás is okozhat elmozdulásokat.

5. Laboratóriumi vizsgálatok

A vizsgálatok során két betonösszetételt alkalmaztunk (1. táblázat). A betonok mindkét esetben kvarckavics és kvarchomok adalékanyaggal és CEM I 42,5 N típusú cementel készültek, szilárdsági osztályuk C55/67. A két betonösszetételnek a víz-cement tényezője tért el (és ebből adódóan a folyósító adalékszer mennyisége). Meg kell jegyeznünk, hogy a CEM III heterogén cementek kedvezőbben viselkednek a tűzzel szemben, de jelen esetben nem a teljesítmény maximalizálása hanem a teljesítmény változásának vizsgálata volt a cél. Mindkét összetétel esetén két fajta próbatest készült, 150 mm élhosszúságú, szabványos próbakocka és 70 mm x 70 mm x 250 mm-es kisméretű hasáb.

Minden próbatest tömörítése vibroasztalon történt, (beton lövellő gép nem áll rendelkezésünkre) kiszaluzás után a próbatesteket az MSZ EN 1992-1-1:2010 szabványnak megfelelően tároltuk. A próbakockákat 8 darab részre vágtuk, így átlagosan 75 mm élhosszúságú, kisméretű kockákat kaptunk (később „kisméretű kocka”). A kisméretű kockák alkalmazását indokolta, hogy ezekből egyszerre több helyezhető a kemencébe és gyorsabban érik el teljes térfogatukban a kívánt hőmérsékletet, így a vizsgálat gyorsabb. A kisméretű kockákon mért értékek átszámíthatók szabványos nyomószilárdsági értékekre, a hőterhelt kisméretű kockákon mért szilárdsági értékeket, azonos méretű, 20°C-on mért szilárdsági értékekhez viszonyítottuk, így kiejthető a próbatest méretének hatása. A kapott hányadossal beszorozva a szabványos próbatestek 20 °C-on mért szilárdsági értékét megkapjuk a szabványos (MSZ EN 1992-1-1:2010) szilárdságot. A kísérleteket a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában végeztük.

4. ábra Próbatestek hőterhelés (fent) és nyomószilárdság vizsgálat után (lent)
Fig 4. Specimens after heat (without naked flame) load (above) and compressive strength test (below)

A kemencét szabadon fűtöttük fel (megelőző hőmérsékleti lépcsők nélkül) és a benne lévő próbatesteket hőn tartottuk 1 óráig keresztül, a próbatesteket láng hatás nem érte, kizárólag a

C 55/67							
Anyag	Fajta vagy frakció	Tömeg [kg/m³]	Térfogat [l/m³]	Keverés 50 l [kg]	Víz tartalom [kg]	Korrektúra	
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	833,40	315,09	41,67	1,67	43,34
	4/8 mm frakció	25%	463,00	175,05	23,15	-	-
	8/16 mm frakció	30%	555,60	210,03	27,78	0,41	28,19
	Összesen	100%	1852,00	700,19	92,60	-	-
Cement	CEM I 42,5 N		390,00	125,80	19,50	-	-
Víz	m/mc=	0,41	160,00	160,00	8,00	-	5,92
Adalékszer cem m %	Glenium 323	1,00%	3,90	3,90	0,20	-	-
Levegő			-	10,00	-	-	-
Összesen			2406	1000	-	-	-

1. táblázat Az első betonösszetétel
Table 1. The first concrete mixture

kemencében lévő magas lég hőmérséklet hatására melegedtek fel (4. ábra).

A kisméretű kockákat és a hasábokat négy hőmérsékleten terheltük, 300 °C, 500 °C, 800 °C, 1000 °C -on. Az első keverékből származó hasábok és próbakockák hőterhelése négy fajtára bontható:

- **LL jelű:** 20 °C-os hasáb és kisméretű kocka 20 °C-os kemencébe helyezve, T °C-ra felfűtve, 1 órán át hőn tartva, majd laborlevegőn lehűtve. Ezen próbatetek a falazat tűzfészekről távolabb lévő, lassabban felmelegedő és oltás közben vízzel nem érintkezve, lassan lehűlő részeit modellezzik.
- **HS jelű:** 20 °C-os hasáb és kisméretű kocka 20 °C-os kemencébe helyezve, T °C-ra felfűtve, 1 órán át hőn tartva, majd vízbe lehűtve. Szintén a lassabban felmelegedő falazatrészeket modellezi, amelyek oltás közben vízzel érintkezve gyorsan hűlnek le.
- **LL+ jelű:** 20°C-os hasáb és kisméretű kocka T °C-os kemencébe helyezve, 1 órán át hőn tartva, majd laborlevegőn lehűtve. Ezek a próbatetek a tűzfészek közelében lévő, szénhidrogének égése esetén fellépő, nagyon gyors lég hőmérséklet emelkedésnek kitett és oltás közben vízzel nem érintkezve, lassan lehűlő falazatrészeket modellezzik.
- **HS+ jelű:** 20 °C-os hasáb és próbakocka T °C-os kemencébe helyezve, 1 órán át hőn tartva, majd vízbe lehűtve. Ezek a próbatetek a tűzfészek közelében lévő, szénhidrogének égése esetén fellépő nagyon gyors lég hőmérséklet emelkedésnek kitett és oltás közben vízzel érintkezve, hirtelen lehűlő falazatrészeket modellezzik.

Az első keverésből készült próbateteket az összes említett hőterhelési módon vizsgáltuk, majd kiválasztottuk azt a két esetet, melyeknél a legnagyobb szilárdságcsökkenést tapasztaltuk, és ami a valósághoz legközelebb áll. Ez a két eset az LL+ és a HS+ jelű hőterhelési mód volt, ahogy az 5. ábrán is látható, ez a két hőterhelési mód ronszolja legjobban a próbateteket. A második kísérleti sorozatból származó próbateteket már csak a két választott módon hőterheltük.

5. ábra Próbakockák 1000°C-os hőterhelés után (jel szerint balról jobbra: felső sor: LL, HS, alsó sor: LL+, HS+)

Fig. 5. Specimens after heat load on 1000 °C (signs from left to right: top row: LL, HS, bottom row: LL+, HS+)

Az alagútfalazat modellezésének és erőtani méretezésének szükséges, de nem feltétlenül elégséges bemenő adata a beton hőterhelés utáni maradó nyomó, hajlító-húzó szilárdságára és rugalmassági modulusa.

Hőmérsékleti lépcsőnként, minden hőterhelés típusból kapott eredményt három próbatest vizsgálatával határoztunk meg. A nyomószilárdsági vizsgálatokat a próbatest kis mérete miatt 2,7 kN/s terhelési sebességgel végeztük Form+Test Alpha4 típusú hidraulikus törőgép használatával.

A beton rugalmassági modulusának változása arányos a nyomószilárdság megváltozásával, így a rugalmassági modulus számítható. Az MSZ EN 206-1:2002 az

$$E_{cm} = 22 * [(f_{cm})/10]^2$$

képlettel adja meg ezt az összefüggést. A képlet 150 mm-es próbakockára vonatkozik és jelen esetben a következőképpen módosul,

$$E_{cm} = 22 * [(f_{cm} * \frac{f_{cmT}}{f_{cm20}})/10]^2.$$

ahol:

f_{cm} a beton 20 °C-on meghatározott nyomószilárdságának átlagértéke 20 °C-on tárolt, 150 mm élhosszúságú próbakocka esetén, (N/mm²)

f_{cmT} a beton 20 °C-on meghatározott nyomószilárdságának átlagértéke azonos sebességű felfűtésnek és ez után 1 órás T °C-os hőterhelésnek alávetett, majd lehűlt 75 mm élhosszúságú próbakocka esetén (N/mm²)

f_{cm20} a beton 20 °C-on meghatározott nyomószilárdságának átlagértéke 20 °C-on tárolt 75 mm élhosszúságú próbakocka esetén (N/mm²).

A második kísérletsorozatból származó kockákon mért nyomószilárdságokból átszámított értékeket ellenőrzésként összehasonlítottuk az azonos keverésből származó, hőterhelt hasábokon mért rugalmassági modulussal. Ha az eltérés megfelelően kismértékű, akkor feltételezhetően elegendő az egyszerűbb és kevésbé időigényes vizsgálatokat elvégezni (ez egyértelműen még nem jelenthető ki jelen kísérletsorozat alapján, ehhez további nagyszámú vizsgálatra van szükség, mely meghaladja egy diplomamunka terjedelmét). A mért és számított értékek adott hőmérsékleti határig megfelelően közelítették egymást, illetve konstans csökkentő tényező bevezetésével az említett határon túl is biztosítható a jó közelítés.

A réteges leválás oka alapvetően a beton húzószilárdságának lokális kimerülése. A hajlító-húzószilárdág vizsgálatokat központos hajlítással végeztük. A kapott húzószilárdsági értékek összevethetők az alagúttűz numerikus modelljéből kapott húzófeszültség értékekkel, így lehet következtetni a réteges leválás bekövetkezéséhez szükséges feszültségekre. Emellett a kevésbé ronszolódtó próbatetek törési felületének szemrevételezésével információ szerezhető a beton hő hatására megváltozott struktúrájáról, ilyen például az átkristályosodott kvarc, a kontaktzóna tönkremenetele, a beton elszíneződése a keresztmetszet mentén.

A rugalmassági modulus méréseket, 70*70*250 mm-es hasábokon végeztük videoextenzométeres technológiával Instron 5989 típusú univerzális törőgépen (6. ábra). Minden eredményt három próbatest mérési átlagaként határoztunk meg.

6. ábra Rugalmassági modulus mérése videoextenzométerrel (mérési pontok a kék körökben)

Fig. 6. Testing of modulus of elasticity by video-extensometer (measuring points in blue circles)

6. Kísérleti eredmények

A próbatestek és törési felületük szemrevételezéséből következtetni lehet a tönkremenetel módjára, a nem tönkrement beton károsodásának mértékére, illetve a végbement kémiai és fizikai változásokra. Az 1000 °C-on hőterhelt hasábok (összes típus) teljes szilárdságukat elvesztették, a cementkő kézzel morzsolhatóvá vált, a cementkő és az adalékanyag váz közti kapcsolat megszűnt, a kvarc adalékanyag szemek eltörték. Az 1000 °C-on hőterhelt próbakockák erősen megrepedeztek, sarkaik lepattantak, a felületen lévő adalékszemek kiperegtek. Ezek oka, hogy 1000 °C-ig több szilárdságcsökkentő folyamat lejátszódik, a maradék szilárdság zérusnak tekinthető. A 800 °C-on hőterhelt LL és HS jelű próbatesteknél nyomó illetve hajlító-húzó szilárdsági vizsgálatok után az adalékszemek kifordultak a cementkőből. Ennek oka a kontaktzóna tönkremenetele, ami az adalékanyag és a cementkő magas hőmérsékleteken eltérő hőtágulása és a kvarckavics α -ból β módosulatba való kristályátalakulása miatt következik be. A kristályátalakulás 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár (Koch, Sztrókay, 1994). A hasábok törési felületén majdnem a teljes keresztmetszet mentén elszíneződött a cementkő, tehát a hő hatására átalakult a kristályszerkezet.

A 800 °C-os LL+ és HS+ jelű próbatesteknél vegyesen találtunk cementkőből kifordult és eltört adalékszemeket a szilárdsági vizsgálatok után. Ezek a próbatestek 800 °C-os hőterhelés után nagyobb maradék szilárdsággal rendelkeztek mint az LL és HS jelű próbatestek. A 20 °C-ról felmelegített próbatesteknél a kémiai átalakulások jobban végbe tudtak menni, mivel a próbatest adott hőmérsékleti intervallumok közt több időt töltött. Az a jelenség hogy az LL+ és HS+ jelű hőterhelési módon terhelt próbatestek nagyobb maradék szilárdsággal rendelkeznek mint a másik két terhelési mód esetén, csak 800°C-os hőterhelésnél volt tapasztalható, alacsonyabb és magasabb hőmérsékleteken nem. A 800 °C-on terhelt LL és HS próbakockák enyhén megrepedeztek, a sarkok és élek kis mértékben sérültek, néhány felületi adalékszem kipergett a próbatestekből, a felület elszíneződött. Ennek oka a kvarc átalakulása, az adalékanyag és cementkő eltérő hőtágulása és a cementkőben 800 °C-ig lejátszódó folyamatok összessége.

Az 500 és a 300 °C-on hőterhelt LL és HS jelű hasábok törésekor az adalékszemek kifordultak a cementkőből, ennek oka az lehet, hogy egyenletes felfűtés során az adalékszemek nem repedtek el, így az eltérő hőtágulásból származó feszültségek a cementkő és az adalékanyag határán összpontosultak, tönkretéve a tapadást. Az LL+ és HS+ hasáboknál szintén láthatóak a hirtelen hőmérsékletemelkedés hatására elpattant adalékszemek, ami csökkenti a beton próbatest integritását. A hasábok törési felületén látszik, hogy a keresztmetszet kisebb része színeződött el, mint magasabb hőmérsékleteken, tehát csak a felülethez közeli részeken alakult át a cementkő kristályszerkezete. A próbakockák felületén nem látható nagyobb mértékű elváltozás, néhány, a kontaktzóna környezetében lévő, kisebb repedésen és kisebb felületi elszíneződésen kívül.

A mérési eredmények igazolták, hogy a négy hőmérsékleti lépcsőből három esetén a legkedvezőtlenebb hatást a betonra a gyors lehűtés gyakorolja egy esetben azonban, a 800°C-on elvégzett terhelések esetén az LL és HS hőterhelési módokból származtak a legkisebb mért értékek (7. ábra). A hőterhelési lépcsőkön a maradék szilárdság értékeket összehasonlítottuk az MSZ EN 1991-1-2:2005 által javasolt csökkentő tényezőkkel (7. ábra), alacsonyabb hőmérsékleti tartományban (300 °C) a szabvány szerinti csökkentő tényező túlbecsli a valós értéket, így szabvány szerinti szilárdságcsökkenés mellett, akár még a felületen hagyható a sérült beton. Ezt a nagyobb, valós szilárdságcsökkenés miatt nem érdemes a felületen hagyni, mert csökkenti a megerősítő beton vastagságát, és nagy valószínűséggel a sérült beton tapadószilárdsága is nagyobb mértékben csökken, ezzel rontva a megerősítés minőségét. Az eltérés oka az lehet, hogy ezek a csökkentő tényezők szabványos tűzgörbére (nem szénhidrogén tűzgörbére) lettek meghatározva, jelen esetben viszont a felfűtés sebessége gyorsabb volt mindkettő fajta felfűtési módnál. Ezen felül eltérést okozhat az, hogy az EC felhevült állapotban vizsgálja a szilárdságcsökkenést, esetemben viszont lehűlt próbatestekről van szó, amelyeknek általában nagyobb a szilárdságcsökkenése, mint a még nem visszahűlt próbatesteké, amit a lehűlés során kialakuló repedések magyaráznak. 300 °C felett a szabvány által megadott csökkentő tényezők a biztonság javára közelítenek.

7. ábra Az első betonösszetételből származó próbakockák relatív nyomószilárdsága a hőmérséklet függvényében

Fig. 7. Relative residual compressive strength of specimens from the first concrete mixture as a function of temperature of heat loading

A második betonösszetételből kapott relatív szilárdsági értékeket szintén összehasonlítottuk a szabvány által javasolt csökkentő tényezőkkel. Itt a mért és javasolt maradó szilárdságok valamivel jobban közelítették egymást, mint az első betonkeverék esetén. Az előbbieken említett okok mellett a szabvány és a kísérleti görbék eltérése abból is adódik, hogy a beton struktúrája erősen roncsolódik a hőszokk miatt. Az 1000 °C-on hőterhelt próbatestek már a kemencében felrobbantak, erősen megrepedeztek vagy a lehűtés során veszítették el teljesen a szilárdságukat, így ezeknél a próbatesteknél 0-nak tekinthetjük a szilárdságot (8. ábra).

8. ábra A második betonösszetételből származó próbakockák relatív nyomószilárdsága a hőmérséklet függvényében
Fig. 8. Relative residual compressive strength of specimens from the second concrete mixture as a function of temperature of heat loading

Az első betonkeverék rugalmassági modulusának változását mind a négy fajta próbatesten vizsgáltuk (9. ábra). A második keverékből származóknak csak az LL+, HS+ változatain mértünk rugalmassági modulusot. A hasábokon mért rugalmassági modulus eredmények 300 °C és 500 °C estében az LL+ jelű próbatesteknél 94-96%-ban megegyeztek a próbakockák nyomószilárdságából számított értékekkel, a HS+ jelű próbatesteknél ez az arány csak 85-87%-os. Itt a hőszokk során a hirtelen térfogatváltozások miatt sérül a cementkőváz és a kontaktzóna szerkezete, amit a szabvány képlete jelenlegi formájában nem tud figyelembe venni. Az LL+ jelű testeknél így az eltérés 10%-on belül marad, ez megengedhető pontatlanság, viszont a HS+ jelű próbatestek számított eredményeire érdemes bevezetni egy 0,85-ös korrekciós tényezőt (az általunk modellezett hőterhelés esetén).

800°C-on hőterhelt próbatesteknél a nyomószilárdságból számított rugalmassági modulus és a mért értékek között nagyságrendi eltérések voltak. Mire a próbatestek elérik a 800 °C-ot addigra a cementkőben végbemenő kémiai átalakulások teljesen lezajlanak, ami jelentősen gyengíti azt, ezenfelül a kvarckavics adalékanyag térfogatváltozáson megy keresztül, ami nagymértékben roncsolja a kontaktzónát. A rugalmassági modulus 800°C-on a kezdeti értékhez képest (20 °C) 10% alá esik vissza, ezeket az értékeket érdemes (a biztonság javára) zérusnak tekinteni. A rugalmassági modulusokat a kezdeti értékhez viszonyítottuk (relatív rugalmassági modulus), így jobban érzékelhető a beton folyamatos tönkremenetelének mértéke (10. és 11. ábra).

9. ábra Az első keverékből származó próbatestek mért relatív rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében
Fig. 9. Relative residual Young's modulus of specimens from the first concrete mixture as a function of temperature of heat loading

10. ábra A második keverékből származó HS+ jelű próbatestek relatív rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében, számított, korrigált és mért értékek
Fig. 10. Relative residual Young's modulus of HS+ specimens from the second mixture as a function of temperature, calculated, corrected and measured values

11. ábra A második keverékből származó LL+ jelű próbatestek relatív rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében, a számított, korrigált és mért értékek
Fig. 11. Relative residual Young's modulus of LL+ specimens from the second mixture as a function of temperature, calculated, corrected and measured values

A laborvizsgálatokból kapott eredményeket később felhasználtuk erőtani számításokhoz alagútfalazat numerikus 2D és 3D modelljeihez. Ezek alkalmazását és eredményeit cikkünk 2. részében tárgyaljuk.

7. Megállapítások

Vasbeton alagútfalazatot modellező beton próbatetek anyagtulajdonságainak változását mértük hőteher hatására, visszahűlt állapotban. Két, CEM I 42,5 N típusú cementből és kvarckavics adalékanyaggal készült, C55/67 szilárdsági osztályú betonkeveréket vizsgáltunk. Felfűtés és lehűtés szempontjából négy eltérő hőterhelési módot alkalmaztunk. A próbatetek nyomószilárdságát, hajlító-húzó szilárdságát és rugalmassági modulusát mértük. A kapott relatív nyomószilárdsági értékeket összehasonlítottuk a MSZ EN 1991-1-2:2005 által javasolt különböző hőmérsékleti lépcsőkhöz tartozó csökkentő tényezőkkel. Majd azt vizsgáltuk, hogy a hőterhelt, kisméretű próbakockákon mért nyomószilárdsági értékekből (relatív nyomószilárdság használatával) az MSZ EN 206-1:2002 által megadott képlettel számított rugalmassági modulusok milyen mértékben közelítik meg a hőterhelt hasábokon mért, valós rugalmassági modulus értékét. Mind a szilárdsági, mind a rugalmassági modulus görbék közti eltéréseknél elemeztük azok lehetséges okait. Megfigyeléseink és a kísérleti eredmények alapján a következő megállapítások tehetők:

- a négy hőmérsékleti lépcsőből három esetén nyomószilárdság és rugalmassági modulus csökkenés szempontjából is a gyors felmelegítésű és lehűtésű próbatetekből származtak a legkisebb értékek.
- Ez alól a 800 °C-os hőlépcső kivétel, itt a lassabban, 20°C-ról felmelegített próbateteknél nagyobb szilárdság és rugalmassági modulus csökkenést tapasztaltunk, mint a gyors felmelegítésű és lehűtésű próbateteknél. Ezek a próbatetek adott hőmérsékleti intervallumok közt több időt töltöttek, így a kémiai átalakulások és az ezzel járó térfogatváltozások jobban végbe tudtak menni és kifejtetni károsító hatásukat.
- Az MSZ EN 1991-1-2:2005 szabványban megadott diagramok és csökkentő tényezők csak korlátozottan alkalmasak a szilárdságcsökkenés becslésére az általunk modellezett alagúttűz esetén. Ennek oka, hogy több tényezőt nem vesznek figyelembe (lehűlés során keletkező repedések, hőszokk (oltás) közben sérülő kontaktzóna, stb.) és, hogy szabványos tűzgörbére lettek meghatározva.
- Vizsgálataink alapján nem elég egyfajta csökkentő tényező-hőmérséklet görbét alkalmazni tüzesetek utáni modellezéshez, hanem több eltérő görbe használata indokolt, felmelegítési és lehűtési sebességek kombinációjától függően, vagy összetettebb, a hőmérsékletváltozásra és annak sebességére érzékenyebben reagáló tapasztalati összefüggések szükségesek. Ezek megfelelő minőségű elkészítéséhez nagy volumenű vizsgálatokra van szükség.
- A laborlevegőn lehűlt próbatetek nyomószilárdságaiból számított rugalmassági modulus értékek 500 °C-os

hőterhelésig közel esnek (az eltérés 10%-on belüli) a mért értékekhez. A hőszokkolt próbateteknél egy 0,85 értékű csökkentő tényezővel szintén hasonló egyezés érhető el.

- 800 °C eléréseig az általunk vizsgált beton már olyan átalakulásokon és roncsolódáson megy keresztül, amit a képlet nem tud figyelembe venni, ezért a mért és számított értékek eltávolodnak egymástól. Több hőmérsékleti lépcső esetén pontosabban megállapítható az a pont, ahol a számított és mért görbék különbsége már túl nagy lesz.
- 800 °C feletti hőterhelés esetén a maradó rugalmassági modulus 0-nak tekinthető, ezért a számított és mért rugalmassági modulus eltérése nincs hatással a későbbi erőtani számításokra.

Megemlíthető, hogy a kis mintaszám miatt a jelen kutatási eredményeket, nagyobb próbatetszám mellett ellenőrizni kell a megfelelő pontosság elérése érdekében.

Irodalomjegyzék

- [1] Gál, E. – Görög, P. (2013): Löttbetonos alagútfalazat és kőzet kapcsolatának vizsgálata gránitos kőzetkörnyezetben, In: Török Á, Görög P, Várhelyi B (szerk.), *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika* 2013. 366 p. Budapest: Hantken Kiadó, 2013. pp. 165-176., Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár; 16., ISBN:978-615-5086-06-9
- [2] Görög, P. (2007a): Characterization and the mechanical properties of the eocene buda marl, *CENTRAL EUROPEAN GEOLOGY* 50:(3) pp. 241-258., Print ISSN: 1788-2281 Online ISSN: 1789-3348, <https://doi.org/10.1556/CEuGeol.50.2007.3.4>
- [3] Görög, P. (2007b): Engineering geologic properties of the Oligocene Kiscell Clay, *CENTRAL EUROPEAN GEOLOGY* 50:(4) pp. 313-329. Print ISSN: 1788-2281 Online ISSN: 1789-3348, <https://doi.org/10.1556/CEuGeol.50.2007.4.2>
- [4] Hertz, K. D. (2003): Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal*, 38, pp103–116, ISSN: 0379-7112, [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6)
- [5] Horiguchi, T. – Suhaendi, S. L. (2005): Fiber-reinforced High-strength Concrete Under Elevated Temperature, Effect Of Fibers On Residual Properties (Conference), *Fire Safety Science*, pp. 271-278., <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-271>
- [6] Koch, S. – Sztrókay, K. I. (1994): „Ásványtan II.”, Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó, 5. kiadás, 566–581.o., ISBN 963 18 5973 8
- [7] Lublőy, É. (2008): Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira, Doktori disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
- [8] Lublőy, É. (2016): „Szálerezősítésű betonok alkalmazása a tűzvédelemben”, *Védelem tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, I :2., pp. 518-535., ISSN 2498-6194
- [9] 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*, Graz, pp. 41-50.
- [10] MSZ EN 1991-1-2:2005, (2005), Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1-2. rész: Általános hatások. A tűznek kitett szerkezeteket érő hatások
- [11] MSZ EN 1992-1-1:2010, (2010), Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok
- [12] MSZ EN 1992-1-2:2013, (2013) Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-2. rész: Általános szabályok. Szerkezetek tervezése tűzhatásra
- [13] MSZ EN 206-1:2002, (2002) Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség
- [14] Oreste, P. P. (2003): Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence–confinement approach, *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, pp347–363. ISSN: 0886-7798, [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00004-X)

- [15] Parkinson, G. – Ékes, Cs. (2008): Ground Penetrating Radar Evaluation of Concrete Tunnel Linings, *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 16-19, 2008, Birmingham, UK, ISBN: 978-1-4244-2111-4
- [16] Rideg, D. (2014): „Hőmérsékletváltozás hatása a Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló vágataira”, Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
- [17] Sarma, L. P. – Ramana, Y. V. (1979): „Thermal expansion of a few indian granitic rocks”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 22, Issue 1, April 1980, pp 36-41, [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(80\)90098-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(80)90098-9), ISSN: 0031-9201
- [18] Török, A. – Török, Á. (2013): Gránitos kőzetkörnyezetben hő hatására bekövetkező közetfizikai változások, *Mérnökgeológia-Közetmechanika konferencia*, pp. 205-210, BME, Budapest, ISBN 978-963-420-933-1
- [19] Török A. – Török Á. – Görög P. (2015): „The effect of temperature on the physical properties of Mauthausen Granite (Austria)”, In: MG Winter, DM Smith, P.J.L Eldred, DG Toll (szerk.), *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4800 p., Edinburgh, Skócia, 2015.09.13-2015.09.17. London: ICE Publishing, 2015. pp. 3401-3406., ISBN: 9780727760678
- [20] Walter, R. – Kari, H. – Kusterle, 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, (Ed. Pauser, M.), Graz, pp. 54-59., ISBN 963 420 837
- [21] Winterberg, R. – Dietze, R. (2004): Efficient passive fire protection systems for high performance, *More Engineering Developments: Proceeding for the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete*, Cairns, Australia, pp. 275-290., <https://doi.org/10.1201/9780203023389.ch31>

Ref.:

Csanády Dániel – Fenyvesi Olivér – Lublőy Éva Eszter – Megyeri Tamás: *Alagúttüzek hatása az alagútfalazat és kőzetkörnyezet teherbírására*
Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 70, No. 2 (2018), 54–61. p.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.11>

ESFSS
2018

SECOND ANNOUNCEMENT and CALL FOR PAPERS

3rd ESFSS / European Symposium on Fire Safety Science

<http://www.esfss2018.com/>

NANCY (FRANCE) 12TH-14TH SEPTEMBER, 2018

The 3rd European Symposium on Fire Safety Science will be held on September 12-14, 2018 at the University of Lorraine, in Nancy, France.

Following the conference held in Cyprus (2015), the 3rd ESFSS, will be the third edition of a series of symposia organized in Europe, with the participation of the International Association for Fire Safety Science (IAFSS). The aim is to gather researchers from and beyond Europe to have exchanges and discussions about fire safety science.

The program will have oral and poster sessions for the presentation of fully peer-reviewed papers over the three days. Invited lectures will be given by Barbara Lane (Arup), Guillermo Rein (Imperial College London) and Thomas Rogaume (University of Poitiers).

The 3rd ESFSS will be hosted by the LEMTA, a French laboratory affiliated to the University of Lorraine and the CNRS in Nancy, with the support of the *GDR Feux* – the French Research Group on Fire.