Cementpéphez kevert kiegészítő anyag hatása a hőterhelés utáni nyomószilárdságra

LUBLÓY ÉVA ■ BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék ■ lubeva@web.de

NEMES RITA ■ BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék ■ rmenes@freemail.hu

BALÁZS L. GYÖRGY ■ BME, Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék ■ balazs@vbt.bme.hu

Influence of type of additive on the residual compressive strength of hardened cement paste subjected to high temperatures

An experimental study was carried out to test the residual compressive strength of hardened cement paste specimens with various types of additives subjected to high temperatures. After the temperature loading the number and size of the cracks and the residual compressive strength were determined in addition to thermo-analytic analyses. Following conclusions were drawn: number and size of surface cracks as well as loss of compressive strength due to temperature loading decreased by using slag. Limestone additive did not seem to be preferable from the point of view of high temperatures.

Kulcsszavak: magas hőmérséklet, kiegészítő anyag, maradó nyomószilárdság

Keywords: high temperatures, additive materials, residual compressive strength

1. Bevezetés

Esetenként szükség lehet a beton finomrész tartalmának növelésére (kizárólag könnyű adalékanyaggal készült, illetve öntömörödő betonok). A finomrész tartalmat növelhetjük mészköliszt, kvarcliszt, finomra őrölt kohósalak, illetve kis mennyiségben szilikapor adagolásával, amit a továbbiakban kiegészítő anyagnak nevezünk. A két leggyakrabban alkalmazott kiegészítő finomrész (kohósalak, mészköliszt), valamint a kvarcliszt hatását hasonlítottuk össze a hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság szempontjából. Nagy jelentősége lehet a kiegészítő anyag (kvarcliszt, kohósalak, mészköliszt) típus megválasztásának magas hőmérsékleti terhelések esetén, hiszen más kémiai folyamatok játszódnak le. Kísérleteink célja volt, hogy meghatározzuk a kiegészítő anyagként adagolt finomrész hogyan, és milyen mértékben befolyásolja a beton hőterhelés utáni viselkedését.

2. A cementkő kémiai átalakulása

A cementkő szerkezete és ásványtani összetétele megváltozik a hőmérséklet emelkedésének hatására. A cementkőben lejátszódó kémiai folyamatok alakulását a hőmérséklet növekedésének hatására derivatográfias és termoanalitikai módszerrel (TG/DTG/DTA) vizsgáltuk. A TG (termo-gravimetriás) és a DTG (derivált-termo-gravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése lehetséges. A DTA (differenciál-termo-analízis) görbékkel nyomon követjük az exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulását, a hőmérséklet növekedésének hatására.

A hőmérséklet emelkedés hatására a következő kémiai folyamatok játszódnak le:

- 100 °C körül tömegvesztés figyelhető meg, amit a makro-pórusokból távozó víz okoz.
- Az ettringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) bomlása 50 °C és 110 °C között következik be.

Lublóy Éva Eszter

Okl. építőmérnök, tudományos segéd munkatárs a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűz károk mérnöki tanulságai. A fib Magyar Tagozat Tagja.

Dr. Nemes Rita

Okl. építőmérnök, egyetemi adjunktus a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: könnyűbeton tervezése, könnyűbeton szerkezetek tervezése. A fib Magyar Tagozat Tagja. Az SZTE tagja.

Dr. Balázs L. György

Okl. építőmérnök, okl. matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil. egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék vezetője. Fő érdeklődési területei: beton, vasbeton és feszített szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), szálerősítésű betonok, nem acél anyagú betétek megerősítések anyagai és módjai, erőátadás a betonban, vasbeton tartó repedezettségi állapota, vasbeton szerkezetek tartóssága. A fib TG 4. 1. „Használhatósági határállapotok” munkabizottság elnöke, további fib, ACI és RILEM bizottságok tagja. A fib Magyar Tagozat elnöke. Az SZTE tagja.

- 200 °C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegvesztés kis mértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalommal vizsgált próbatesteknek eltérő tömegvesztése lesz egészen addig, amíg a pórusokból a víz és a kémiailag kötött víz távozik. 250 °C–300 °C között ez a hatás már nem érezhető (Khoury, Graiver, Sullivan, 1985).
- 450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$), ez a folyamat egy endoterm csúcsot okoz, és ezzel egyidejűleg tömegvesztést is (Schneider, Wieß, 1977).
- 700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat növekedéssel jár (Hinrichsmeyer, 1989).
- 800 °C-os hőmérséklet hatására a beton szerkezetének szinte teljes szétesése következik be (Janotka, Mojumdar, 2005).

3. Kísérleti program

A kísérletekhez 30 mm-es élhosszúságú kockákat készítettünk. A víz-cement tényező minden esetben 0,43 volt. A próbatesteket 1 napos korban zsaluztuk ki, majd 7 napos korig vízben és 28 napos korig labor levegőn tároltuk. A kísérleti mátrixot az 1. táblázatban adtuk meg. A CEM I 42,5 N-es cementből készült cementpéphez típusonként külön a cement tömegegységére vonatkoztatott 25%-os arányban mészkölisztet, finomra őrölt kohósalakot illetve kvarclisztet adagoltunk. A kockákat 28 napos koruk után kemencében felmelegítettük, majd 2 órán át az adott hőmérsékleten tartottuk (20 °C, 50 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C és 800 °C). A próbatesteket a hőterhelés után laborhőmérsékletre lehűtöttük, majd labor levegőn vizsgáltuk.

Kiegészítő vizsgálatként termo-analitikai vizsgálatot végeztünk.

Összetétel	A hőterhelés maximális hőmérséklete					
	20 °C	50 °C	150 °C	300 °C	500 °C	800 °C
100 m% CEM I 42,5 N	3	3	3	3	3	3
75 m% CEM I 42,5 N 25 m% mészkőliszt	3	3	3	3	3	3
75 m% CEM I 42,5 N 25 m% kohósalak	3	3	3	3	3	3
75 m% CEM I 42,5 N 25 m% karcliszt	3	3	3	3	3	3

1. táblázat A kísérleti mátrix
Table 1. Test variables

4. Kísérleti eredményeink

4. 1. Szemrevételezés, repedéskép

w/c = 0,43 25 m% kvarcliszt	w/c = 0,43 25 m% mészkőliszt	w/c = 0,43 25 m% kohósalak	w/c = 0,43 100 m% CEM I 42,5 N	a hőterhelés maximális hőmérséklete
75 m% CEM I 42,5 N	75 m% CEM I 42,5 N	75 m% CEM I 42,5 N	100 m% CEM I 42,5 N
500 °C
800 °C

1. ábra A kiegészítő anyag típusának hatása a felületi repedéskép alakulására
Figure 1. Effect of the type of additive on the development of surface cracks as a result of the elevated temperature (hardened cement paste specimens, w/c=0,43)

A hőterhelés után a próbatesteket szemrevételeztük (1. ábra), ami alapján megállapítható, hogy:

- 300 °C-ig nem észleltünk felületi repedéseket, függetlenül az összetételtől.
- Az 500 °C-os hőterhelést követően a mészkőliszt adagolással készült kocka szabad szemmel látható repedések nem voltak láthatóak. Kevés repedés látható a kvarcliszt és a kohósalak adagolással készült kockák esetén. A repedések száma és mérete a portlandcementből készült kockák esetén a többi kockához képest nagy volt.
- A 800 °C-os hőterhelés következtében mindegyik próbatesten szabad szemmel látható repedések voltak megfigyelhetőek. A repedések mérete és száma a portlandcementből készült próbatestek esetén volt a legnagyobb. A kvarcliszt adagolás esetén szintén nagyméretű repedések alakultak ki. A kohósalak adagolás lényegesen csökkentette a repedések méretét és számát is. Hasonló megfigyeléseket tettünk kohósalak-portland illetve kohósalak cementek esetén (Lublóy, Balázs, 2007). A repedések mérete és száma a mészkőliszt adagolással készült próbatestek esetén volt a legkisebb. Azonban, ha ezt a próbatestet a hőterhelés után laborlevegőn hagyjuk,

akkor néhány nap múlva repedések keletkeztek a felületén. Hasonló megfigyeléseket tett Fehérvári Sándor is (Fehérvári, 2008).

Mészkőliszt adagolás esetén a próbatesteken néhány nap múlva megjelenő repedéseket a következőkkel magyarázhatjuk: magasabb hőmérsékletű hőterhelés ($T > 600\text{ °C}$) hatására a próbatestekben levő mészkő hőbomlást szenved:

A visszamaradó CaO a levegő nedvességtartalmával reagál és a portlandit képződése 44%-os duzzadással jár (fib bulletin, 38, 2007):

2. ábra A mészkő tartalmú próbatestek felületi repedésképe három nappal a 800 °C-os hőterhelés és lehűlés után
Figure 2. The development of surface cracks in case of limestone additive three days after the temperature loading with 800 °C

4. 2. A maradó nyomószilárdság alakulása

A próbatestek maradó nyomószilárdságát 30 mm-es élhosszúságú kockákon határoztuk meg. A hőterhelést követően a nyomószilárdság vizsgálatot szobahőmérsékletre lehűtött állapotban végeztük el. A nyomószilárdság vizsgálat eredményeit (3 mérés átlagából számolva) a 20 °C-os értékeit az 2. táblázatban adtuk meg.

kiegészítő anyag	nélkül	kohósalak	mészkőliszt	kvarcliszt
$f_{c,m,20\text{ °C}}$ (N/mm ²)	103,1	81,5	90,6	90,8

2. táblázat A 20 °C-on mért nyomószilárdság értékek
Table 2. Compressive strength at 20 °C

A 3. ábrán a maradó nyomószilárdság értékeit adtuk meg a 20 °C-on mért értékhez viszonyítva. A 3. ábra alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- Tiszta portlandcement felhasználásával készült próbatestek esetén a maradó, relatív nyomószilárdság 500 °C-os hőterhelés után 35%, 800 °C-os hőterhelés után már csak 10% volt.
- Kvarcliszt adagolással készült próbatestek esetén a maradó relatív nyomószilárdság 500 °C-os hőterhelés után 38%, 800 °C-os hőterhelés után már csak 16% volt.

- Mész-köliszt adagolással készült próbatestek esetén a maradó relatív nyomószilárdság 500 °C-os hőterhelés után 55%, 800 °C-os hőterhelés után már csak 31% volt.
- Kohósalak adagolással készült próbatestek esetén a maradó relatív nyomószilárdság 500 °C-os hőterhelés után 41%, 800 °C-os hőterhelés után 36% volt.
- A maradó nyomószilárdság minden keverék esetén 300 °C és 800 °C között jelentősen lecsökkent. Ennek az okát a cement-kő kémiai átalakulásában kereshetjük: 450 °C körül a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bomlik, 750 °C körül a kalcium-szilikát-hidrátok átalakulása és a mész-kő (CaCO_3) bomlása következik be.
- 800 °C-os hőterhelés eredményeit feltüntetve a kohósalak és a mész-köliszt adagolás kedvezőnek bizonyult, a maradó nyomószilárdság mintegy 2-3,5-szorosára lett a kvarcliszt adagolással és a tiszta cementből készült próbatestek maradó nyomószilárdságának, ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy a mész-köliszt adagolású próbatestek laborlevegőn tárolva, néhány nap alatt jelentősen tovább repedeztek a $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ duzzadással járó reakció miatt.
- A nyomószilárdság vizsgálat eredményei és repedésképek alakulása összhangban vannak egymással: az etalon (tiszta portlandcementből készült) próbatestek esetén figyeltük meg a legtöbb repedést, és itt volt a legnagyobb mértékű a szilárdságcsökkenés is.

A kísérleti eredmények alapján jól látszik, hogy a kohósalak tartalom növelése kedvezően hat a repedésképek és a nyomószilárdság alakulására is. Tehát a megfelelő cement kiválasztása a beton hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság szempontjából döntő szerepet játszik.

3. ábra A maradó nyomószilárdság csökkenése a 20 °C-on mért értékhez viszonyítva a hőmérséklet függvényében

Figure 3. Residual compressive strength of hardened cement paste with different additives (strength values are related to strength values of 20 °C)

4. 3. DTG

Az alkalmazott fázisanalitikai vizsgálati módszer az ún. derivatográfia volt. Ez szimultán termoanalitikai módszer, mely egyidejűleg hoz létre TG (termogravimetriás), DTA (differenciál termoanalízis) és DTG (derivatív termogravimetriás) jelet. A minta kis mennyiségét megporítva, inert anyagú (korund vagy platina) tégelybe helyezve, kemencetérben egyenletes felfűtési sebességgel (ún. dinamikus üzemmódban) kiizzítjuk. Eközben analitikai mérleg méri a minta tömegében

bekövetkező változásokat (TG-görbe), valamint termoelemek mérik a mintában bekövetkező entalpiaváltozásokat egy inert anyag kemencetérbeli hőmérsékletéhez képest (DTA-görbe). A TG-görbe első deriváltját, a DTG-görbét analóg módon állítja elő a készülék, mely a tömegváltozással járó folyamatok helyét és mértékét határozza meg a hőmérséklet skálán. A fenti három görbét, valamint a hőmérséklet (T °C) jelet is tartalmazó, mérési idő (t min) függvényében felvett vizsgálati eredményt derivatogramnak nevezzük. A derivatogram megjeleníthető a hőmérséklet (T °C) függvényében is. A mérésekhez a Derivatograph Q-1500 D készüléket használtam.

A DTG- és DTA-görbéken (4. ábra) egyértelműen láthatóak az ettringit, a portlandit, a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) és a mész-kő (CaCO_3) fázisátalakuláshoz tartozó csúcsok. A kohósalak adagolású minta (2) esetén a mintegy 500 °C-on végbemenő dehidratáció kisebb tömegvesztéssel járt, mint a tiszta portlandcementtel készített (1) minta esetében, tehát a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mennyisége kohósalak adagolású mintában kevesebb. A kvarcliszt adagolású (3) minta esetében a DTA görbén a kvarc átkristályosodása jelentkezik igen gyenge intenzitással 573 °C-on. A kvarc részt vesz a cement-kő szilárdulási folyamatában. A mész-köliszt adagolású (4) minta esetén a 720–900 °C közötti hőmérséklet tartományban megfigyelhető fázisátalakulások a CSH-fázis dehidratációjából és a kalcium-karbonát hőbomlásából származnak.

A DTG csúcsokhoz tartozó tömegváltozások eltérő nagysága alátámasztja a szilárdságvizsgálat eredményeit.

4. ábra A derivatográfiai vizsgálat eredményei
Figure 4. Results from thermogravimetry

5. Összegzés

Esetenként szükség lehet a beton finomrész tartalmának növelésére (kizárólag könnyű adalékanyaggal készült, illetve öntömörödő betonok). A két leggyakrabban alkalmazott kiegészítő finomrész (kohósalak, mész-köliszt), valamint a kvarcliszt hatását hasonlítottuk össze a hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság szempontjából. Kísérletünk célja volt, hogy meghatározzuk a kiegészítő anyagként adagolt finomrész milyen mértékben, és hogyan befolyásolja a beton hőterhelés utáni viselkedését.

A kísérlethez 30 mm-es élhosszúságú kockákat készítettünk. A víz-cement tényező minden esetben 0,43 volt A CEM I 42,5 N-es cementből készült cementpéphez típusonként külön a cement tömegegységére vonatkoztatott 25%-os arányban mészkőlisztet, finomra őrölt kohósalakot illetve kvarclisztet adagoltunk. A kockákat kemencében felmelegítettük, majd 2 órán át az adott hőmérsékleten tartottuk (20 °C, 50 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C és 800 °C). A próbatesteket a hőterhelés után szobahőmérsékletre lehűtöttük, majd labor levegőn vizsgáltuk. Kiegészítő vizsgálatként termo-analitikai vizsgálatot végeztünk.

A 800 °C-os hőterhelés következtében mindegyik próbatesten szabad szemmel látható repedések voltak megfigyelhetők. A repedések mérete és száma a portlandcementből készült próbatestek esetén volt a legnagyobb. A kvarcliszt adagolás esetén nagyméretű repedések alakultak ki. A kohósalak adagolás lényegesen csökkentette a repedések méretét és számát is. A repedések mérete és száma a mészkőliszt adagolással készült próbatestek esetén volt a legkisebb. Azonban, ha ezt a próbatestet a hőterhelés után laborlevegőn hagytuk, akkor néhány nap múlva repedések keletkeztek a felületén.

A nyomószilárdság vizsgálat eredményei és repedéseképek alakulása összhangban vannak egymással: az etalon (tisztá portlandcementből készült) próbatestek esetén figyeltem meg a legtöbb repedést, és itt volt a legnagyobb mértékű a szilárdságcsökkenés is.

A termoanalitikai módszerrel kapott DTG csúcsokhoz tartozó tömegváltozások eltérő nagysága alátámasztja a szilárdág vizsgálat eredményeit.

6. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Duna-Dráva Cement Kft.-nek a kísérlethez nyújtott anyagi támogatásért.

Irodalomjegyzék

- [1] Fehérvári, S. (2008): „Az alagúttűzek által okozott hőszökkenések hatása a cement-kő reziduális tulajdonságaira” Ipari Nyílt Nap, 2007
- [2] fib bulletin 38, (2007): „Fire design of concrete structures- materials, structures and modelling”, ISBN: 978-2-88394-078-9
- [3] Hinrichsmeyer, K., (1989): „Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton”, IBMB, Braunschweig
- [4] Khoury, G., A., Grainger, B. N., Sullivan P. J. E. (1985): „Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents”, Magazine of Concrete Research, Vol 12, pp. 45-49
- [5] Lublóy, É., Balázs, Gy. L. (2007): „Concrete properties in fire depending on type of cement, aggregate and fibre”, CCC2007 Visegrád Proceedings (Eds: Balázs, L. Gy., Nehme, S. G.), ISBN 978-963-420-923-2, pp.: 327-332
- [6] Schneider, U., Weiß, R., (1977): „Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen”, Cement and Concrete Research, Vol 11, pp. 22-29
- [7] Janotka, I., Mojumdar, S., C., (2005): „Thermal analysis at the evaluation of concrete damage by high temperatures”, IBMB, Braunschweig