

Metakaolin vizsgálata cement kiegészítő anyagként a k-érték elve szerint

DR. BOROSNYÓI ADORJÁN ■ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
 ■ borosnyoi.adorjan@epito.bme.hu

SZIJÁRTÓ ANNA ■ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem ■ pannianni11@gmail.com

Érkezett: 2015. 12. 20. ■ Received: 20. 12. 2015. ■ <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.7>

Analysis of metakaolin as supplementary cementing material by the k-value concept

Present paper studies metakaolin as a supplementary cementing material (SCM) for concrete in terms of compressive strength development and k-value concept of CEN/TR 16639:2014. Sixteen different concrete compositions are studied in the range of water-to-cement ratio of $w/c = 0.50-0.65$. Results indicate that the effectiveness of metakaolin depends on the applied w/c -ratio and the applied cement substitution ratio; the smaller the w/c -ratio, the more effective the metakaolin; the higher the cement substitution ratio, the less effective the metakaolin. The k-value decreases by the increase of w/c -ratio, independently of the age of concrete. The higher the cement substitution ratio, the smaller the k-value. The k-value tends to reach a final value in time.

Keywords: concrete, metakaolin, supplementary cementing material, strength, k-value concept

Kulcsszavak: beton, metakaolin, cement kiegészítő anyag, szilárdság, k-érték elve

1. Bevezetés

Az egyik leggyakrabban alkalmazott és legszélesebb körben felhasznált építőanyagunk a beton. A betonipar évente több mint 4 milliárd tonna cement előállítását igényli a világon. A cementgyártás környezetterhelése viszonylag nagy, amelynek oka a nagy nyersanyag- és energiaigény, illetve a szén-dioxid kibocsátás [1]. Egy tonna portlandcement előállítása átlagosan 830 kg szén-dioxid (CO_2) kibocsátással jár, amely a globális felmelegedésre hatást gyakorol. A cementgyártás az antropogén eredetű CO_2 kibocsátás mintegy 4-7%-áért felelős. Napjainkban a betontechnológiai kutatások egyik kiemelt célja olyan építőanyagok előállítása, amelyekkel csökkenthető a cementgyártás által kialakuló környezetszennyezés. A CO_2 kibocsátás csökkentésére alkalmazott egyik módszer (az újrahasznosított adalékanyagok alkalmazásán [2-6] túlmenően), hogy a cement egy részét helyettesítik más, reakcióképes anyagokkal, ún. cement kiegészítő anyagokkal. Ezek az anyagok többnyire ipari melléktermékek, gyártásuk a cementipar számára nem jár többlet CO_2 kibocsátással.

A beton egyes tulajdonságainak javítása vagy különleges tulajdonságok elérése céljából a betonban felhasznált, a portlandcement részleges helyettesítésére szolgáló, finom szemű szervesetlen alkotóanyagokat nevezzük általánosságban cement kiegészítő anyagnak. A cement kiegészítő anyagoknak két csoportját különböztetjük meg: I. típusú kiegészítő anyagok a közel inert kiegészítő anyagok, míg II. típusú kiegészítő anyagok a puccolános vagy latens hidraulikus tulajdonságú kiegészítő anyagok. Ez utóbbi csoportba tartozik az eróműi pernye, a szilikapor, az őrlött kohósalak és a metakaolin.

2. A metakaolin

A metakaolin az aluminoszilikátok csoportjába tartozó agyagásvány. Szilikátkémiai jele: AS_2 (sztöchiometriai képlete:

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, vagy $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). A kaolin agyagásvány termikus aktiválásával állítják elő. A metakaolin puccolános tulajdonságokkal rendelkező anyag, szemcsemérete általában kisebb, mint a cementé. A metakaolin átlagos szemcsemérete kb. 3 μm . A tiszta metakaolin színe fehér, de a kaolinit vas-oxid tartalma miatt rózsaszín átmenetes is lehet. A termikus aktiválás folyamatának lépései: 100–200 °C között az agyagásvány elveszíti az adszorbeált víz legnagyobb részét; 500–800 °C között a molekulák közül eltávozik a kémiaileg kötött víz is, tehát dehidratáció megy végbe; 600–850 °C között a víz távozása után a szerkezet összeomlik, a kaolin amorf állapotba alakul, ami az ún. metakaolin, egy két-dimenziós, lemezes szerkezetű, aktív, puccolános tulajdonságokkal rendelkező mesterséges ásvány. A termikus aktiválás során fontos a hőmérséklet határok betartása, mert 900 °C felett a metakaolin egy nem reakcióképes anyaggá, mullittá alakul.

A metakaolin alkalmazásának előnye, hogy növeli a szilárdságot és csökkenti az áteresztőképességet. Az áteresztőképesség csökkentése révén növeli a kémiai ellenálló képességet és a tartósságot. A metakaolin javíthatja a bedolgozhatóságot, csökkenti az alkáli-szilika reakcióképeséget, a zsugorodást, illetve a potenciális sókivirágzást. A metakaolin világos színe javíthatja a termékek megjelenését is.

A portlandcementet és metakaolint tartalmazó betonban víz jelenlétében az elsődleges reakció a metakaolin és a (cement hidratációjából keletkező) kalcium-hidroxid között lejátszódó reakció, ezáltal kalcium-szilikát-hidrát (CSH) gél és kalcium-aluminát-hidrátot (CAH) tartalmazó kristályos termékek keletkeznek. Ilyen kristályos termék például a C_4AH_{13} (tetraalkalium-aluminát-hidrát), a C_2ASH_8 (gehlenit-hidrát) és a C_3AH_6 (hidrogránát). A kristályos termék mennyisége függ a reakció hőmérsékletétől, illetve a metakaolin és a kalcium-hidroxid arányától is.

Szakirodalmi adatok alapján a portlandcement tömegének 8–20 tömeg%-a helyettesíthető metakaolinnal [7-9, 12-22].

Dr. BOROSNYÓI Adorján

Okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén.

Főbb kutatási területei: vasbetonszerkezetek használhatóság határállapota, szálerősítésű

polimer (FRP) anyagok alkalmazása

betonszerkezetekhez, tapadás betonban,

roncsolásmentes anyagvizsgálatok (NDT),

szálerősítésű betonok (FRC) tartóssága, cement

kiegészítő anyagok (SCM). Az Építőanyag-JSBCM

folyóirat főszerkesztője.

SZIJÁRTÓ Anna

Építőmérnök hallgató a Budapesti Műszaki

és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)

Építőmérnöki Karán. Főbb érdeklődési területei:

betontechnológia, cement kiegészítő anyagok

(SCM).

3. A k -érték elve

Az MSZ EN 206 szabványban [10] a k -érték elve előíró jelle-gű alapelv, amely alapelv egy kiválasztott cementet tartalmazó referencia beton tartóssági teljesítőképességének (vagy nyomó-szilárdságnak) az összehasonlításán alapul olyan vizsgálati be-tonnal szemben, amelyben az adott cementet részben kiegészítő anyaggal helyettesítik a víz/cement-tényező és a kiegészítő anyag tartalom függvényében. A k -érték elve megengedi a II. típusú kiegészítő anyagok számításba vételét a következők szerint:

- a „víz/cement tényező” kifejezést a „víz/(cement + $k \times$ kiegészítő anyag) tényező”-vel kell helyettesíteni és
- a (cement + $k \times$ kiegészítő anyag) mennyiségének nem szabad kevesebbnek lennie, mint az adott környezeti osztály által megkövetelt legkisebb cementtartalom.

A k -érték elve a v/c -tényező és a nyomószilárdság kapcsola-tában az 1. ábrán illusztrált lineáris függvénnyel történő egy-szerűsítésből indul ki, és kiegészítő anyagot nem tartalmazó, referencia betonnal hasonlít össze kiegészítő anyagot tartalma-zó betont.

Kiegészítő anyagot tartalmazó betonok esetén a referencia betonnal azonos nyomószilárdságú beton kiegészítő anyag tartalmának a hatása a v/c -tényező összefüggésében egy k -értékkel vehető figyelembe a következők szerint (CEN/TR 16639:2014 [11] alapján):

$$\omega_0 = v_a / (c_a + k \times a)$$

ahol

- ω_0 a referencia beton v/c -tényezője kiegészítő anyag nélkül
- v_a a kiegészítő anyagot tartalmazó beton víztartalma, kg/m^3
- c_a a kiegészítő anyagot tartalmazó beton cementtartalma, kg/m^3
- a a kiegészítő anyag tartalom, kg/m^3

A k -érték meghatározható a következő módon:

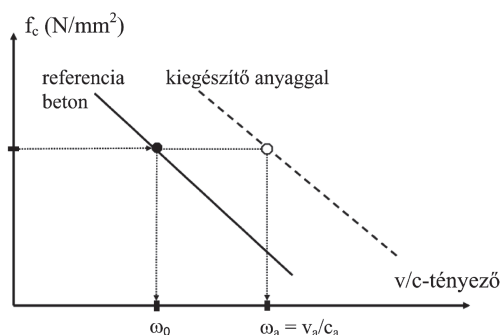
$$k = (v_a / \omega_0 - c_a) / a$$

Vagy a cementtartalomra normalizált módon:

$$k = (\omega_a / \omega_0 - c_a) / (a / c_a)$$

ahol

- ω_a a kiegészítő anyagot tartalmazó beton v/c -tényezője ($= v_a / c_a$)



1. ábra. A k -érték meghatározásához szükséges ábrázolás a CEN/TR 16639:2014 szerint
Fig. 1. Principle of k -value determination according to CEN/TR 16639:2014

A szakirodalom szerint metakaolint a víz-kötőanyag té-nyezőben és a kötőanyag-tartalomban $k = 1,0$ értékkel sza-bad figyelembe venni. A metakaolin megengedett adagolása CEM I fajtájú portlandcement esetén: metakaolin/kötőanyag

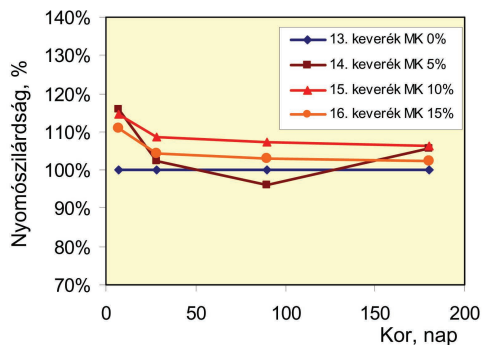
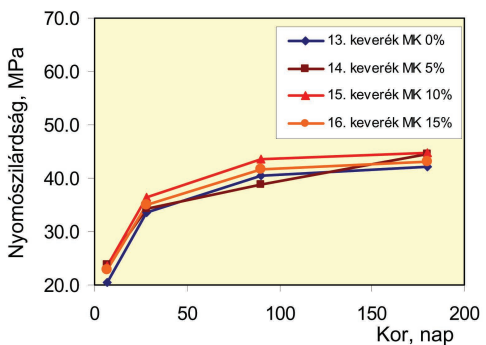
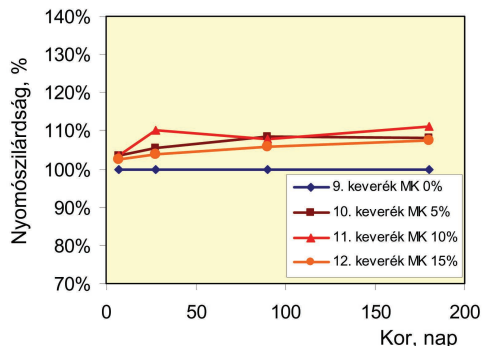
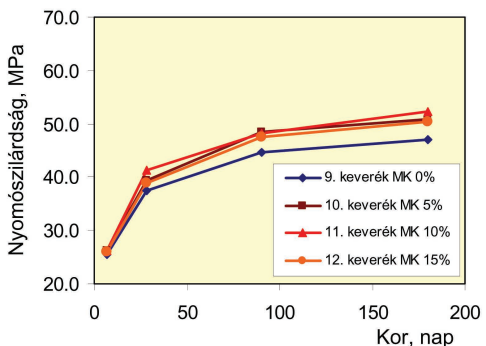
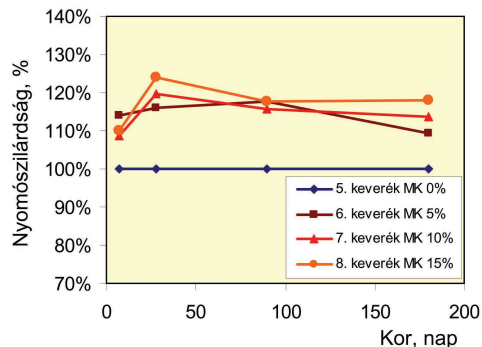
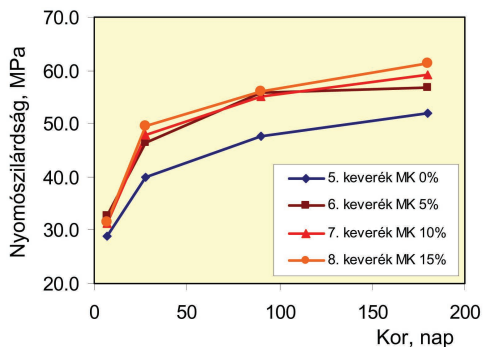
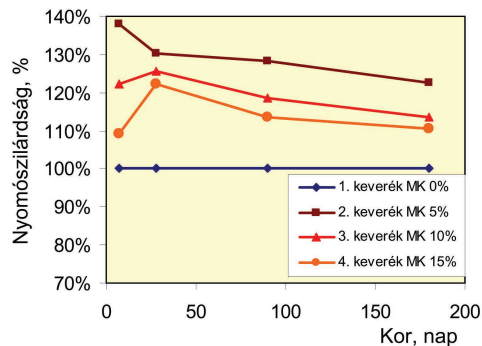
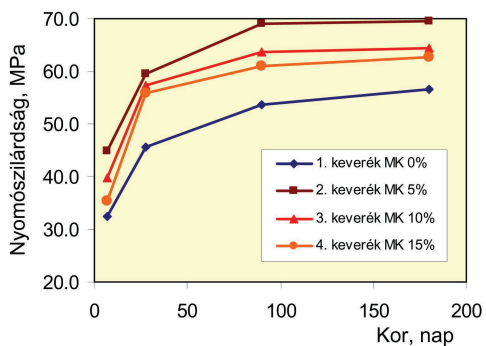
$\leq 0,15$ tömegarány; CEM II fajtájú portlandcement esetén: metakaolin/kötőanyag $\leq 0,10$ tömegarány. Metakaolint a CEM II/A-D fajtájú szilikapor-portlandcementhez, a CEM II/A-Q fajtájú kalcinált puccolán-portlandcementhez, a CEM II/A-M fajtájú kompozit-portlandcementhez, a mérsékelt szulfátálló CEM II/A-D-MSR fajtájú szilikapor-portlandcementhez és a mérsékelt szulfátálló CEM II/A-M-MSR fajtájú kompozit-portlandcementhez nem javasolt keverni.

4. A kutatás célkitűzései

A kutatás célja, hogy laboratóriumi vizsgálatok segítségével feltárja a metakaolin kiegészítő anyag hatását olyan, viszonylag nagy v/c -tényezőjű betonkeverékeken, amelyek a magyaror-szági transzportbeton piacon jelentős mennyiségben fordul-nak elő. A vizsgálatok a nyomószilárdságra gyakorolt hatásra koncentrálnak, és kitérnek a k -érték elvének elemzésére. A ku-tatás célja szándékosan nem a nagy teljesítőképességű betonke-verékek vizsgálata volt, hanem a magyarországi betoniparban gyakrabban használt, nagyobb v/c tényezőjű betonkeverékeket vizsgáltuk, és a vizsgálati próbatesteket a folyamatos víz alatt tá-rolás helyett a 7. naptól laborkörülmények között tároltuk, ez-zel is szimulálva a valós szerkezetek helyzetét. Az utóhidratáció így nem volt elősegítve, és a kiszáradás hatása nagyobb volt, mint a folyamatos víz alatt tárolás esetén. Végig víz alatt tárolás során a hidratáció teljes folyamata végbe tud menni, ezért a szakirodalomban laboratóriumi kísérletek során sok esetben a végig víz alatt tárolást alkalmazzák, amely ugyan egy részről könnyebb összehasonlítást tehet lehetővé különböző keverékek között, azonban elrejteti azt az esetenként nagyon jelentős hatást, amely a beton kiszáradásából adódik egy tényleges betonszerkezet esetén. Vizsgálataink során ezért választottuk a vegyes tárolást, amely a valós állapotot jobban közelíti. A ki-egészítő anyag adagolása az eltérő v/c -tényezőjű betonokra el-térő hatást gyakorol, amelyet a kutatás során lehetőségünk volt megfigyelni.

5. Laboratóriumi vizsgálatok

A laboratóriumi vizsgálatokat a BME Építőanyagok és Ma-gasépítés Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában végeztük. A vizsgálatokhoz 16 különböző összetételű betonkeveréket készítettünk CEM I 42,5 N cement felhasználásával és kvarcka-vics adalékanyaggal. Az alap keverékek (metakaolin kiegészítő anyagot nem tartalmazó keverékek) v/c -tényezőit 0,5-0,55-0,6-0,65 értékre vettük fel. A metakaolin kiegészítő anyagot mind a négy alap keverék esetén 5-10-15% helyettesítési arány-ban alkalmaztuk a cement tömegére vonatkoztatva. Kereske-delmi forgalomban kapható metakaolint használtunk fel. A metakaolin oxidos összetételét röntgen-fluoreszcencia analí-zissel (XRF) határoztuk meg, mely szerint a kiegészítő anyag három fő alkotó oxidjának mennyisége: 53,0% SiO_2 , 41,7% Al_2O_3 és 0,52% Fe_2O_3 volt. A betonkeverékekből acélsablon-ban szabványos méretű (150 mm) próbakockákat készítettünk, amelyeket 7 napig víz alatt, majd a vizsgálati koruk eléréséig la-borlevegőn tároltunk. A próbatesteken nyomószilárdság vizs-gálatot végeztünk az MSZ EN 12390-3:2009 szabvány előírásai szerint 7-28-90-180 napos korban.



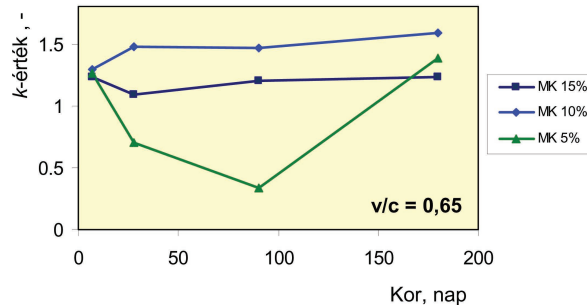
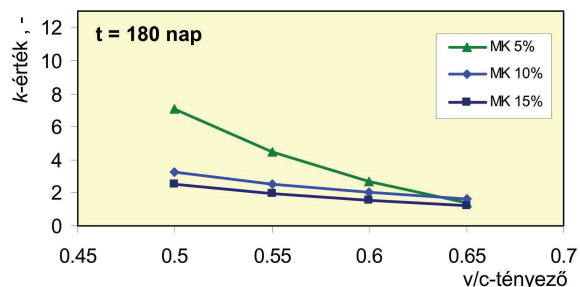
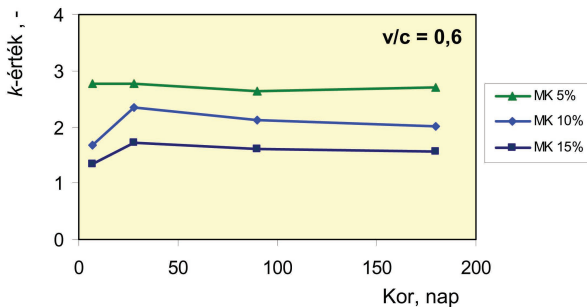
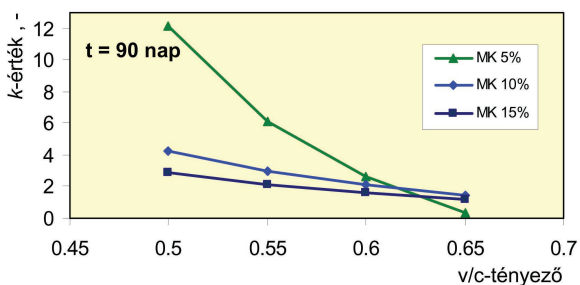
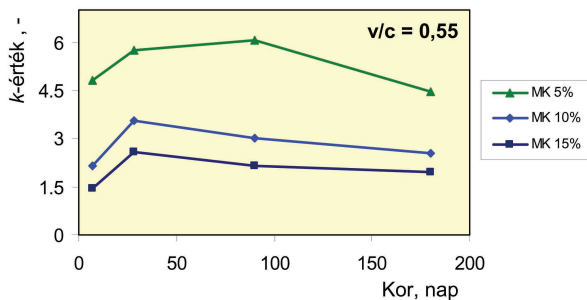
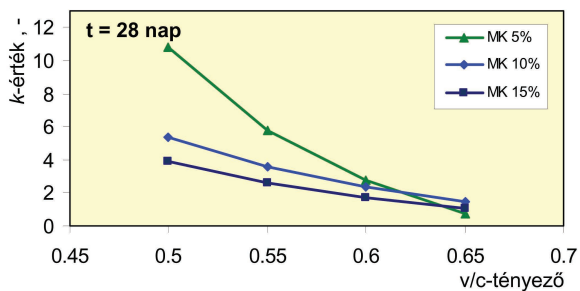
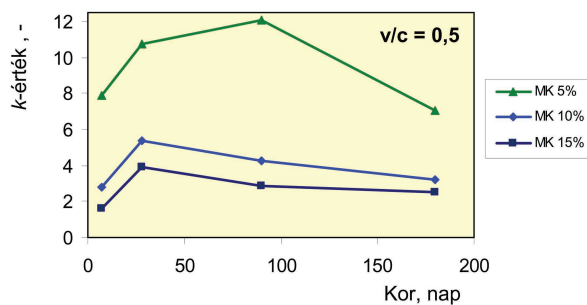
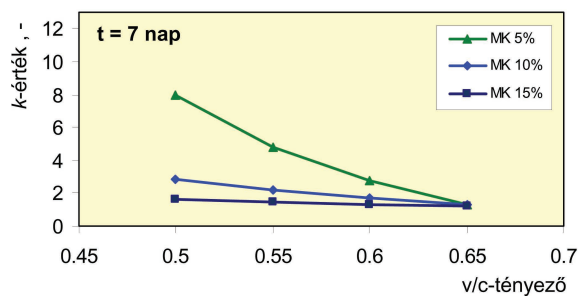
2. ábra Nyomószilárdság változása az idő függvényében
Fig. 2. Development of compressive strength in time

3. ábra Relatív nyomószilárdság változása az idő függvényében
Fig. 3. Development of relative compressive strength in time

6. Eredmények és értékelés

A nyomószilárdság vizsgálatok eredményeit az 2. és 3. ábrán mutatjuk be az alap keverékek szerinti csoportosításban. Az 2. ábrán a nyomószilárdságok abszolút értékeit láthatjuk az idő függvényében, míg a 3. ábra a nyomószilárdságok relatív értékeit illusztrálja az alap keverékek nyomószilárdságára vonatkoztatva. Megfigyelhető, hogy a metakaolin kiegészítő anyag hatékonysága eltér a különböző v/c-tényezők esetén, és a különböző helyettesítési arányok alkalmazásakor is. A vizsgált legkisebb v/c-tényező

esetén a metakaolin hatékonyabb működését tapasztaltuk, mint a vizsgált legnagyobb v/c-tényező mellett: a v/c = 0,5 alapkeverék-nél a metakaolin alkalmazásával 10-40% többlet nyomószilárdságot értünk el, míg a v/c = 0,65 alapkeverék-nél ez nem haladta meg a 10%-os mértéket. A v/c = 0,5 alapkeverékben megfigyelhető az a jelenség, amelyre a szakirodalom is rámutat, hogy 10%-nál nagyobb cement helyettesítési arány esetén a metakaolin szilárdságnövelő hatása egyre inkább csökken – esetünkben a legnagyobb nyomószilárdságokat az 5%-os helyettesítési aránnyal értük el. Ez a különbség a v/c-tényező növelésével egyre



4. ábra A k -érték változása a v/c -tényező függvényében
Fig. 4. Relationship between k -value and w/c -ratio

5. ábra A k -érték változása a kor függvényében
Fig. 5. Relationship between k -value and age of concrete

kevésbé észlelhető; az általunk vizsgált legnagyobb v/c -tényezők esetén már nem figyelhető meg. A metakaolin kiegészítő anyagot tartalmazó betonkeverékek utószilárdulása eltér az alap keverékekétől, ez különösen jól megfigyelhető kisebb v/c -tényezők mellett: a beton korának növekedésével a metakaolin kiegészítő anyag adagolás hatására kialakuló többlet nyomószilárdság egyre kisebb az alap keverék nyomószilárdságához viszonyítva. Ez felhívja a figyelmet arra, hogy a k -érték elvének alkalmazása során nem szabad figyelmen kívül hagyni a beton korát, és egyes esetekben célszerű lehet a k -értéket a v/c -tényező és a cement helyettesítési arány figyelembe vételével megadni.

Vizsgálati eredményeink alapján kiszámítottuk a négy alap keverékre a k -értékeket minden vizsgálati korban, amelyet a 4. ábrán mutatunk be. Megfigyelhető, hogy a v/c -tényező növelésével a k -értékek csökkennek minden vizsgálati korban és

minden cement helyettesítési arány esetén. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb a cement helyettesítési arány, annál kisebbek a k -értékek. A 5. ábrán alap keverékenkénti bontásban mutatjuk be a k -értékeket a beton korának függvényében. Ebben az ábrázolási módban megfigyelhető, hogy a cement helyettesítési arány hatása markánsabb, mint a beton korának a hatása, különösen a kisebb v/c -tényezők esetén. Eredményeink arra utalnak, hogy a k -értékek a beton összetételétől függetlenül egy végértéket érnek el időben, azonban ezek az értékek nagymértékben eltérnek egymástól a beton összetételétől függően.

7. Megállapítások

Laboratóriumi vizsgálataink során 16 különböző összetételű betonkeveréket tanulmányoztunk, amelyeket CEM I 42,5

N cement és kvarckavics adalékanyag felhasználásával, illetve metakaolin kiegészítő anyag 5-10-15 % cement helyettesítési arányával készítettünk, $v/c = 0,5-0,55-0,6-0,65$ értékű alap v/c -tényezők mellett. Meghatároztuk a betonok nyomószilárdságát 7-28-90-180 napos korban és kiszámítottuk a CEN/TR 16639:2014 szerinti k -értékeket. Megfigyeléseink alapján a következő megállapítások tehetők:

- a metakaolin kiegészítő anyag hatékonysága eltér a különböző v/c -tényezők esetén,
- a metakaolin kiegészítő anyag hatékonysága eltér a különböző cementhelyettesítési arányok alkalmazásakor,
- kisebb v/c -tényező esetén a metakaolin hatékonyabb működése tapasztalható,
- kisebb v/c -tényezők esetén, 10%-nál nagyobb cement helyettesítési arány alkalmazása mellett a metakaolin szilárdságnövelő hatása egyre inkább csökken, amely különbség a v/c -tényező növelésével egyre kevésbé észlelhető; az általunk vizsgált legnagyobb v/c -tényezők esetén már nem volt megfigyelhető,
- a metakaolin kiegészítő anyagot tartalmazó betonkeverékek utószilárdulása eltér az alap keverékektől, különösen a kisebb v/c -tényezők mellett,
- a v/c -tényező növelésével a k -értékek csökkennek minden vizsgálati korban és minden cement helyettesítési arány esetén,
- minél nagyobb a cement helyettesítési arány, annál kisebbek a k -értékek,
- a cement helyettesítési arány hatása markánsabb a k -értékre, mint a beton korának a hatása, különösen a kisebb v/c -tényezők esetén,
- a k -értékek végértéket érnek el időben.

8. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA) felé, az OTKA K 109233 nyilvántartási számú projekt anyagi támogatásáért.

Hivatkozások

- [1] Kara, P. (2015): Performance of lamp glass waste powder (LGWP) as supplementary cementitious material (SCM) – viscosity and electrical conductivity. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 1, pp. 12–18. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.3>
- [2] Nemes, R. (2015): Special topics in the freeze-thaw resistance of lightweight concretes. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 1, pp. 24–27. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.5> (in Hungarian)
- [3] El Mir, A. – Balczó, G. – Nehme, S. G. (2015): Effect of saturation degree of recycled aggregates on concrete properties. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 2, pp. 58–61. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.9>
- [4] Fenyvesi, O. – Jankus, B. (2015): Opportunities in recycling AAC waste as aggregate for lightweight concrete. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 2, pp. 66–70. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.11>
- [5] Nemes, R. – Török, B. (2014): Bond of steel reinforcement in different lightweight aggregate concretes. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 66, No. 1, pp. 7–12. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2014.2> (in Hungarian)

- [6] Nemes, R. (2013): Abrasion resistance of lightweight aggregate concrete. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 65, No. 2, pp. 44–47. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.10> (in Hungarian)
- [7] Agarwal, S. K. (2006): Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1735–1739. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.025>
- [8] Antoni, M. – Rossen, J. – Martirena, F. – Scrivener, K. (2012): Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 1579–1589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- [9] Barbhuiya, S. – Chow, P. – Memon, S. (2015): Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, pp. 696–702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.101>
- [10] CEN (2013) Concrete. Specification, performance, production and conformity. EN 206:2013 *European Standard*
- [11] CEN (2014) Use of k -value concept, equivalent concrete performance. CEN/TR 16639:2014 *Technical Report*, Technical Committee CEN/TC 104
- [12] Cyr, M. – Trinh, M. – Husson, B. – Casaux-Ginestet, G. (2014): Effect of cement type on metakaolin efficiency. *Cement and Concrete Research*, Vol. 64, pp. 63–72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.007>
- [13] Duan, P. – Shui, Z. – Chen, W. – Shen, C. (2013): Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075>
- [14] Güneysi, E. – Gesoglu, M. – Karaoglu, S. – Mermerdas, K. (2012): Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 120–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017>
- [15] Li, Z. – Ding, Z. (2003): Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 579–584. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01025-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01025-6)
- [16] Nehme, S. G. (2015a): Kiegészítőanyagok hatása a szokványos és az öntömörödő betonokra. 1. rész. Szakirodalmi áttekintés. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 1, pp. 28–33. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.6>
- [17] Nehme, S. G. (2015b): Kiegészítőanyagok hatása a szokványos és az öntömörödő betonokra. 2. rész. Laboratóriumi vizsgálatok. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 2, pp. 71–78. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.12>
- [18] Ramezaniyanpour, A. A. – Jovein, H. B. (2012): Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 470–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>
- [19] Rashad, A. M. (2013): Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 303–318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- [20] Siddique, R. – Juvas Klaus, J. (2009): Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, Vol. 43, pp. 392–400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- [21] Tafraoui, A. – Escadeillas, G. – Lebaill, S. – Vidal, T. (2009): Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 669–674. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018>
- [22] El Mir, A. – Nehme, S. G. – Nehme, K. (2016): In situ application of high and ultra high strength concrete. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 68, No. 1, pp. 20–23. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.4>

Ref.:

Borosnyói, Adorján – Szijártó, Anna: Metakaolin vizsgálata cement kiegészítő anyagként a k -érték elve szerint
Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 68, No. 2 (2016), 40–44. p.
<http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.7>