

Zúzott beton adalékanyag hőállóságának hatása az újrahasznosított beton hőállóságára

Effect of the thermal resistance of recycled concrete aggregate on the thermal resistance of recycled aggregate concrete

Dr. HLAVIČKA Viktor, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőanyagok és Magasépítés tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3.
hlavicka.viktor@emk.bme.hu

Abstract

In the present study, we investigated the effect of the strength and heat resistance of recycled concrete aggregate (RCA) on the strength and heat resistance of recycled aggregate concrete (RAC). RCAs produced from fresh concrete and 3D printed concrete were used for the experiments. The strength and heat resistance of the RCAs were determined using Hummel testing. For recycled aggregate concretes, the change in residual compressive strength of the mixes after thermal loading was measured.

Keywords: recycled aggregate concrete (RAC), MAPEI RE-CON ZERO, 3DCP, Hummel test, high temperature, fire

Kivonat

Jelen kutatásunkban azt vizsgáltuk, hogy az újrahasznosított beton adalékanyag szilárdsága és hőállósága milyen hatással van az újrahasznosított adalékanyagú betonok szilárdságára és hőállóságára. A kísérletekhez frissbetonból előállított és 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított beton adalékanyagokat használtunk. Az újrahasznosított beton adalékanyagok szilárdságát és hőállóságát Hummel-mozsaras vizsgálattal határoztuk meg. Az újrahasznosított adalékanyagú betonok esetén mértük a keverékek a hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság változását.

Kulcsszavak: újrahasznosított beton, MAPEI RE-CON ZERO, 3DCP, Hummel teszt, magas hőmérséklet, tűz

1. BEVEZETÉS

Az építőipar napjainkban is zajló modernizációja egyre nagyobb hangsúlyt szentel az alkalmazott anyagok körforgásának biztosítására. Ezért a beton esetén is egyre nagyobb az elvárás a beton anyagának újra felhasználására. Ennek két módja a legelterjedtebb:

- A megszilárdult beton aprítása, majd a betonzúzalék adalékanyagként való újra felhasználása. Ebben az esetben a beton érkezhetsz meglévő épületek bontásából, ahol a minőség változó vagy előregyártó üzemek selejtes termékeinek feldolgozásából, ahol a beton minősége jobban vissza követhető.
- Transzportbeton visszaszállítása esetén a még képlékeny frissbetonból mosással visszanyerik az adalékanyagot. Amit frakciókra való osztás után újra felhasználnak a betongyártásban.

Transzportbeton visszaszállítása történhet nemmegfelelőség vagy többletrendszer miatt. A visszaszállított beton negatív hatással van a környezetre és a betonüzemek többlet üzemeltetési költségeihez is vezet. Azonban a Global Cement and Concrete Association adatai alapján ez a mennyiség így is évi 50 millió m³ betont jelent [1]. Ezért az építőipar képviselői folyamatosan keresik az alternatívát a frissbeton újra felhasználásának lehetőségeire.

Megfelelő válogatás, és adalékanyag vizsgálat mellett hazai és nemzetközi tapasztalatok alapján ma már képesek vagyunk újrahasznosított beton adalékanyag felhasználásával az eredetihez képest legalább ugyan olyan, de akár jobb szilárdságú betont is előállítani [2]. Az erőtani szilárdság mellett azonban a betonnak a

tartóssági követelményeknek is meg kell felelnie, mint pl. a szélsőségesen magas vagy alacsony hőmérsékleten, vagy kémiaiag agresszív közegben való ellenállás.

A vasbeton szerkezetek magas hőmérsékleten való ellenállásának fontosságára az utóbbi évek jelentős tüzesetei is felhívták a figyelmet: Gotthard alagút (2001); Grenfell Tower, London (2017); Torch Tower, Dubai (2017).

A vasbeton szerkezetek tűzállóságát elsősorban a választott cement és különböző kiegészítő anyagok határozzák meg (metakaolin, kohósalak, műanyag szál) [3]. Azonban korábbi kutatások alapján az is látható, hogy beton magas hőmérséklet hatására történő szilárdságváltozására az adalékanyag típusának is jelentős hatása van [4]. Újrahasznosított beton adalékanyag használata esetén az eredeti beton paraméterei hatással lesznek az újrahasznosított beton tűzállóságára. Azonban ezek a hatások teljeskörűen még nem ismertek.

2. PROBLÉMAFELVETÉS

Újrahasznosított beton adalékanyag használata esetén az eredeti beton paraméterei hatással lesznek az újrahasznosított beton tulajdonságaira, így a tűzállóságára is. Ezért fontos lehet az újrahasznosított beton adalékanyag előzetes hőállóság vizsgálata, hogy a mért adatok alapján következtethessünk az újrahasznosított adalékanyagú beton magas hőmérsékleten való viselkedésére.

Korábban is folytak kutatások azzal kapcsolatban, hogy természetes adalékanyagok hőállósága hogyan befolyásolja a beton tűzállóságát [5], [6]. A Mikro Deval és a Los Angeles vizsgálatok bár széleskörűen alkalmazott beton adalékanyag vizsgálatok, ebben esetben a koptató és dinamikus terhelés kevésbé jellemzi a vizsgálni kívánt állapotát az adalékanyagoknak. Ezért az említett kutatások végül az adalékanyagok minősítéséhez a hőterheléssel kiegészített Hummel vizsgálatot [7] alkalmazták. A Hummel vizsgálat egy statikus terhelési vizsgálat, ami megfelelően alkalmazható az adalékanyagok teherbírás csökkenésének kimutatására.

Jelen kutatásunkban a következőkre kerestük a választ:

- Újrahasznosított beton adalékanyagok esetén miként alkalmazható a hőterheléssel kiegészített Hummel vizsgálat a hőállóság megállapítására?
- Az újrahasznosított beton adalékanyagok hőállósága milyen hatással van az újrahasznosított adalékanyagú betonok hőállóságára?

3. KÍSÉRLETEK BEMUTATÁSA

3.1 Vizsgált újrahasznosított beton adalékanyagok

A kutatás során két különböző úton előállított újrahasznosított beton adalékanyagot vizsgáltunk.

A MAPEI által gyártott *Re-Con Zero* egy kétkomponensű por, amellyel a betonüzembe visszaszállított beton teljes mértékben újrahasznosítható a környezet szennyezése és a betonüzemek üzemeltetési költségeinek növekedése nélkül. A por frissbetonhoz való adagolásának következtében a beton cementpép tartalma az adalékanyag szemcsék felületén köt meg. Így a visszaszállított beton legnagyobb részét néhány perces keverés után szemcsés anyaggá alakítja, amely a talajon deponálható, és megkötése után felhasználható a betonban adalékanyagként. A kutatás során három különböző receptúrájú frissbetonból előállított újrahasznosított beton adalékanyagot vizsgáltunk. A keverékek tervezett szilárdsága C25/30, C35/45 és C50/60 volt. A kutatás során alkalmazott jelölések: M25; M35; M50.

A 3D betonnyomtatás napjaink egyik legmodernebb építőipari eljárása. A betonnyomtatásban használt beton egy olyan speciális keverék, aminek több szempontból is meg kell felelnie: pumpálhatóság, állékonyság, szilárdulási ütem stb. A kutatásban a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Laboratóriumában található betonnyomtató által készített próbatestekből készítettünk zúzott újrahasznosított beton adalékanyagot. A 3D nyomtatott beton próbatestek két különböző keverékből készültek. Az előre bezsákolt szárazkeverékek típusa *VERTICO* és *SIKA Sikacrete-751 3D* volt. A kutatás során alkalmazott jelölések: 3DV és 3DS. Mind a két keverék esetén a cementtartalom elérte a 40%-ot, és a maximális adalékanyag méret mindössze 2 mm volt.

3.2 Újrahasznosított beton adalékanyag vizsgálatok

Minden esetben az újrahasznosított beton adalékanyagokat méret alapján, sziták segítségével 0/4 és 4/11,2 frakcióka bontottuk. Majd meghatároztuk a frakciók szemeloszlását.

A kutatás során megmértük az újrahasznosított beton adalékanyagok vízfelszívását és testsűrűségét.

Az újrahasznosított beton adalékanyagok hőtűrését hőterheléssel kiegészített Hummel-mozsaras aprózódás vizsgálattal határoztuk meg. A vizsgálat során megmértük 2 l térfogatú adalékanyag szemeloszlását és finomsági modulusát. Ezt követte az adalékanyag hőterhelése (hőlépcsők: 150, 300, 450, 600 °C). Egy órás hőtartás után az újrahasznosított beton adalékanyag lassan, a kemencével együtt hűlt vissza laboratóriumi hőmérsékletre (20 °C). A visszahűlés után újra meghatároztuk az adalékanyag szemeloszlását és finomsági modulusát. Majd az adalékanyagot Hummel-mozsárban 400 kN-ig terheltek 1,5 perc alatt. A tehermentesítés után újra meghatároztuk az adalékanyag szemeloszlását és finomsági modulusát.

3.3 Újrahasznosított adalékanyagú betonkeverékek

A kutatás során vizsgáltuk a víz/cement (v/c) tényező hatását is. Ezért a keverékeket 0,35 és 0,45 v/c tényezővel is elkészítettük. A *Re-Con Zero* felhasználásával készült újrahasznosított beton adalékanyagot 35 m% és 55 m% adagolással míg a 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított beton adalékanyagot 40 m% és 60 m% adagolással vizsgáltuk. A betonkeverékek receptúráit a 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Az etalon és az újrahasznosított betonkeverékek (az értékek 1 m³ betonkeverékre vonatkoznak)

		E_0,35	E_0,45	M25_0,35_35%	M25_0,35_55%	M25_0,45_35%	M25_0,45_55%	M35_0,35_35%	M35_0,35_55%	M35_0,45_35%	M35_0,45_55%	M50_0,45_35%	M50_0,45_55%	3DV_0,35_40%	3DV_0,35_60%	3DV_0,45_40%	3DV_0,45_60%	3DS_0,35_40%	3DS_0,35_60%	3DS_0,45_40%	3DS_0,45_60%
Adalékanyag [kg/m ³]	homok 0/4	855,0	855,2	545,8	545,8	545,9	545,9	545,8	545,8	545,9	545,9	545,9	545,9	491,2	491,2	491,3	491,3	491,2	491,2	491,3	491,3
	kvarc kavics 4/8	964,2	964,4	636,7	272,9	636,8	272,9	636,7	272,9	636,8	272,9	636,8	272,9	600,3	236,5	600,4	236,5	600,3	236,5	600,4	236,5
	M25 0/4	-	-	309,1	309,1	309,1	309,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M25 4/11,2	-	-	231,8	540,9	231,9	541,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M35 0/4	-	-	-	-	-	-	321,9	321,9	321,9	321,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M35 4/11,2	-	-	-	-	-	-	241,5	563,3	241,5	563,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M50 0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	316,4	316,4	-	-	-	-	-	-	-	-
	M50 4/11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	237,3	553,8	-	-	-	-	-	-	-	-
	3DV 0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	273,1	273,1	273,1	273,1	-	-	-	-
	3DV 4/11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	273,1	546,2	273,1	546,2	-	-	-	-
	3DS 0/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	271,0	271,0	271,0	271,0
	3DS 4/11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	271,0	542,0	271,0	542,1
Cement (CEM I 32,5 N-LH) [kg/m ³]		448,0	390,0	448,0	448,0	390,0	390,0	448,0	448,0	390,0	390,0	390,0	390,0	448,0	448,0	390,0	390,0	448,0	448,0	390,0	390,0
Víz [kg/m ³]		156,8	175,5	156,8	156,8	175,5	175,5	156,8	156,8	175,5	175,5	175,5	175,5	156,8	156,8	175,5	175,5	156,8	156,8	175,5	175,5
v/c		0,35	0,45	0,35	0,35	0,45	0,45	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45	0,45	0,35	0,35	0,45	0,45	0,35	0,35	0,45	0,45

3.4 Újrahasznosított adalékanyagú beton vizsgálatok

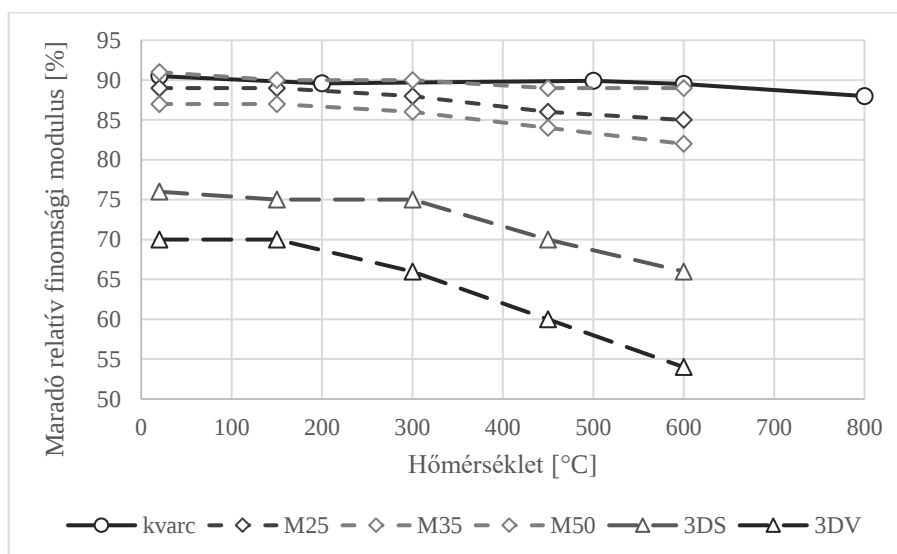
Az újrahasznosított betonkeverékek és a referencia keverékek próbatestjeit 28 napos korban hőterheltek. A hőterheléséhez elektromos kemencéket használtunk. A kemencék felfűtési sebessége megközelítette, de alul maradt a szabványos ISO tűzgörbe [8] felfűtésától. A próbatesteket a normál hőmérséklet (20 °C) mellett 4 különböző hőlépcsőben vizsgáltuk (150, 300, 450, 600 °C). Minden hőlépcsőben az adott hőmérséklet elérése után két óra hőtartás következett, majd a próbatestek lassan, a kemencével együtt hűltek vissza a kiindulási, 20 °C-os hőmérsékletre. Hőlépcsőnként 3-3 db próbatest volt vizsgálva. A betonkeverékeken nyomószilárdság és hajlító-húzószilárdság vizsgálatokat végeztünk a hatályos szabványok alapján [9], [10]. A kutatás során a keverékek nyomószilárdságát két féle képen is meghatároztuk. Normál hőmérsékleten 150x150x150 mm élhosszúságú kockákon, és a hajlító vizsgálat után megmaradt félhasábokon, 70x70 mm területű acél nyomólapokat használva. A hőterhelt betonok esetén csak a félhasábokon történt a nyomószilárdság meghatározása.

4. EREDMÉNYEK

4.1 Újrahasznosított beton adalékanyagokon végzett vizsgálatok eredményei

A kutatás során mértük az újrahasznosított beton adalékanyagok hőterhelés előtti és hőterhelés utáni finomsági modulusát is. Azonban az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a hőterhelés következtében nem változott az adalékanyagok finomsági modulusa, így a hőterhelés következtében nem

történt aprózódás. Azért a hőterhelést követő Hummel vizsgálat utáni finomsági modulusokat közvetlenül a kiindulási finomsági modulusokkal hasonlítottuk össze. A Hummel vizsgálat utáni maradó relatív finomsági modulus értékeket a 1. ábra szemlélteti. Az eredmények összehasonlíthatóságát segítve az 1. ábrán feltüntettük a kvarc kavics maradó relatív finomsági modulus változását is. A kvarc kavics értékeit korábbi kutatások [5], [6] alapján vettük fel ezért a hőlépcsők eltérnek az általunk alkalmazott hőlépcsőktől.



1. ábra. Az adalékanyagok maradó relatív finomsági modulusa a hőterhelés függvényében

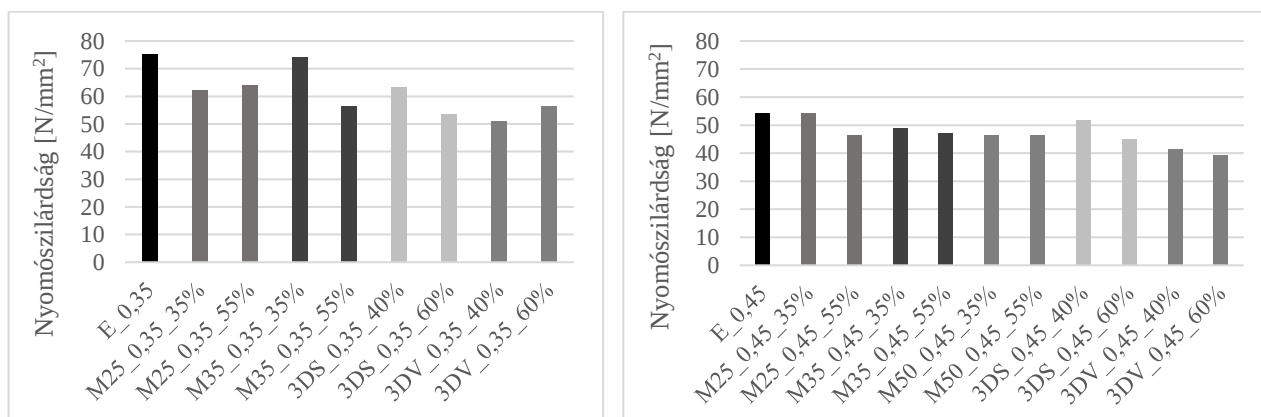
Az eredmények alapján látható, hogy a Hummel vizsgálat következtében a kvarc kavics finomsági modulusa a kiindulási érték 90%-ra esik vissza, majd a hőterhelés következtében csak kissé változik. Ennek oka, hogy a kvarcban csak 573 °C felett megy végre átkristályosodás.

A MAPEI Re-Con Zero felhasználásával készített újrahasznosított beton adalékanyagok esetén a Hummel vizsgálat következtében finomsági modulus kezdetben csak 86-90%-ra esik vissza. Ez csak kissé maradt alul a kvarc kavicsnál tapasztaltaknak. Ennek oka, hogy a Re-Con Zero hatására a cementpép a nagyobb szemcsék felületén köt meg. Így a Hummel vizsgálat során a porózus, kis szilárdságú cementpép kéreg gyorsan letörik, de az adalékanyag szemcse magját alkotó korábbi adalékanyag a nagyobb szilárdsága miatt jobban ellenáll.

Ezzel szemben a 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított adalékanyag szemcsék sokkal nagyobb mennyiségben tartalmaznak cementkövet. Így a Hummel vizsgálat következtében a szemcsék morzsolódása is nagyobb (70-75%). Az eredményekből az is jól látható, hogy a 3D nyomtatásból származó újrahasznosított beton adalékanyag szemcsék a nagy cementtartalom miatt sokkal érzékenyebbek a magas hőmérsékletre. Aminek következtében 300 °C felett már jelentős szilárdságvesztés tapasztalható.

4.2 Újrahasznosított adalékanyagú betonokon végzett vizsgálatok eredményei

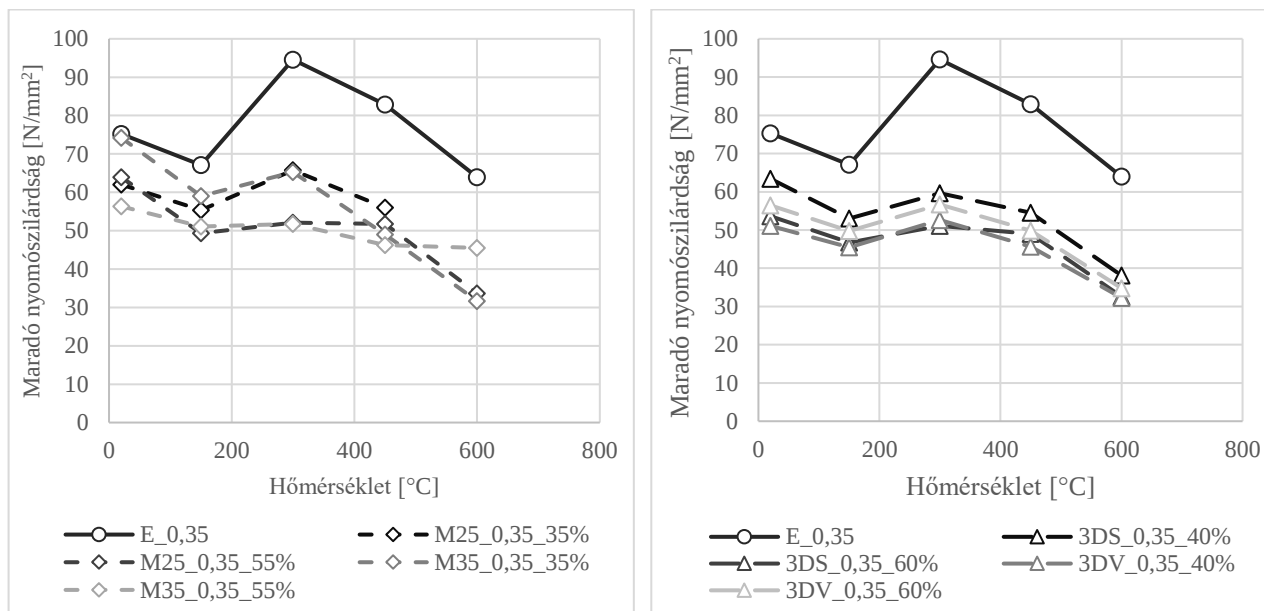
A normál hőmérsékleten mért nyomószilárdsági eredményeket a 2. ábra foglalja össze.



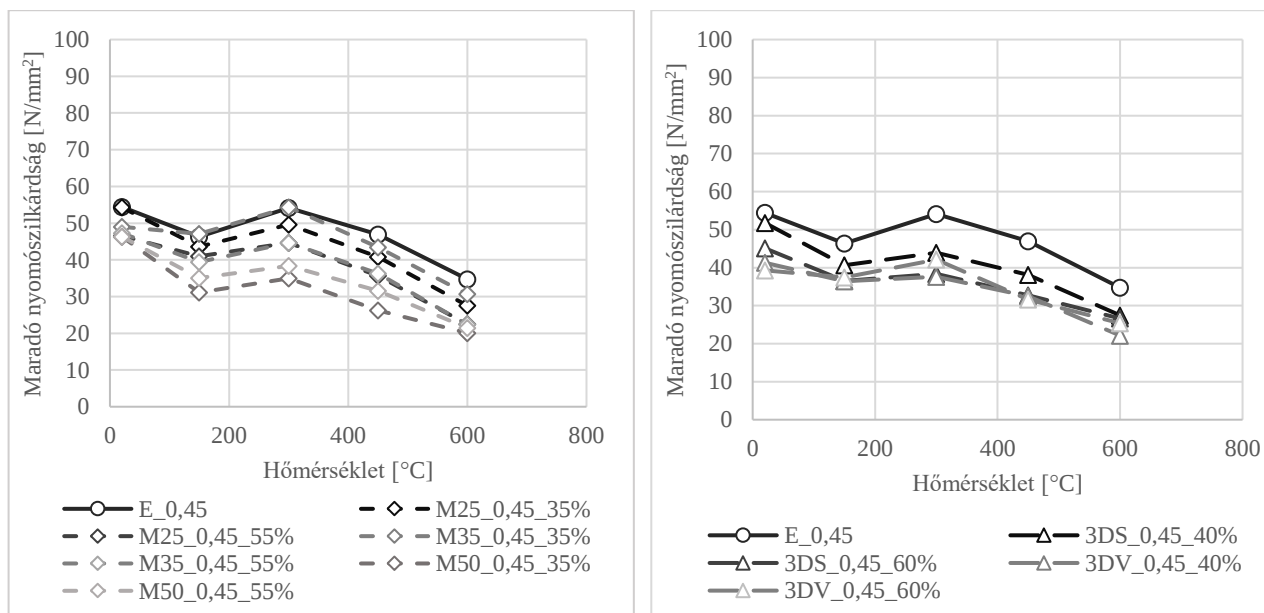
2. ábra. Normál hőmérsékleten mért nyomószilárdsági eredmények a v/c tényező szerinti bontásban

Az eredményekből látható, hogy minden esetben az újrahasznosított beton adalékanyagot tartalmazó betonok nyomószilárdsága alulmarad az etalon keverékek nyomószilárdságához képest. A Hummel vizsgálat eredményivel megegyezően a 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított adalékanyag felhasználásával készült keverékek nyomószilárdsága kisebb lett, mint a *MAPEI Re-Con Zero* felhasználásával készült újrahasznosított beton adalékanyagokat tartalmazó betonkeverékek nyomószilárdsága. A 0,45 v/c tényezőjű keverékek esetén jól látható, hogy az újrahasznosított adalékanyag arányának növelésével csökken a keverékek nyomószilárdsága. Ezzel szemben a 0,35 v/c tényezőjű keverékek esetén ez a tendencia nem egyértelmű.

A keverékek hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság változását a 3. ábra és a 4. ábra szemlélteti.



3. ábra. 0,35 v/c tényezőjű keverékek maradó nyomószilárdsága a hőmérséklet függvényében



4. ábra. 0,45 v/c tényezőjű keverékek maradó nyomószilárdsága a hőmérséklet függvényében

Az eredményekből látható, hogy minden esetben 150 °C-nál egy lokális minimum értéket 300 °C-nál egy lokális maximum követ. Majd a 300 °C után a maradó nyomószilárdság értéke csökkenő tendenciát mutat. A 300 °C-nál mért lokális maximum értéke a 0,35 v/c tényezőjű etalon keveréknél volt a legmagasabb. Látható, hogy azonos v/c érték esetén az újrahasznosított adalékanyagú keverékeknél ez a lokális maximum érték nem éri el az etalonnál tapasztalt értéket.

A leromlási tendenciákból látható, hogy a referencia keverékek hőtűrése jobb, mint az újrahasznosított beton adalékanyagú keverékeké. A leromlás üteme a referenciák esetén lassabb.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kutatásunkban arra kerestük, hogy az újrahasznosított beton adalékanyag szilárdsága és hőállósága milyen hatással van az újrahasznosított adalékanyagú betonok szilárdságára és hőállóságára. A kísérletekhez frissbetonból előállított és 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított beton adalékanyagokat használtunk. A vizsgálatok alapján a következő megállapításokra jutottunk:

- A MAPEI Re-Con Zero felhasználásával készített újrahasznosított beton adalékanyagok esetén a Hummel vizsgálat következtében finomsági modulus kezdetben csak 86-90%-ra esik vissza. Ennek oka, hogy a Re-Con Zero hatására a cementpép a nagyobb szemcsék felületén köt meg. Így a Hummel vizsgálat során a porózus, kis szilárdságú cementpép kéreg gyorsan letörik, de az adalékanyag szemcse magját alkotó korábbi adalékanyag a nagyobb szilárdsága miatt jobban ellenáll. A 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított adalékanyag szemcsék sokkal nagyobb mennyiségben tartalmaznak cementkövet. Így a Hummel vizsgálat következtében a szemcsék morzsolódása is nagyobb (70-75%).
- A Hummel vizsgálat eredményivel megegyezően a 3D betonnyomtatásból származó újrahasznosított adalékanyag felhasználásával készült keverékek nyomószilárdsága kisebb lett, mint a MAPEI Re-Con Zero felhasználásával készült újrahasznosított beton adalékanyagokat tartalmazó betonkeverékek nyomószilárdsága.
- A leromlási tendenciákból látható, hogy a referencia keverékek hőtűrése jobb, mint az újrahasznosított beton adalékanyagú keverékeké. A leromlás üteme a referenciák esetén lassabb.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani diplomázóimnak Balogh Botondnak és Mérő Domonkosnak a vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségét. Továbbá szeretném megköszönni Cseri Viktornak és a Duna-Dráva Cement Kft-nek a vizsgálatokhoz szükséges cement biztosítását. A PD 146109 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az OTKA PD_23 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Global Cement and Concrete Association, „CEMENT AND CONCRETE AROUND THE WORLD”. Elérés: 2023. április 10. [Online]. Elérhető: <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>
- [2] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, és B. Kasal, „A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete”, 2021. augusztus 1., Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [3] fib BULLETIN 38, *Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling*. Sprint-Digital-Druck, 2007.
- [4] V. Hlavička, L. E. Hlavicka-Laczák, és É. Lublőy, „Residual fracture mechanical properties of quartz and expanded clay aggregate concrete subjected to elevated temperature”, *Constr Build Mater*, köt. 328, ápr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126845.
- [5] A. Biró és É. Lublőy, „Classification of aggregates for fire”, *Constr Build Mater*, köt. 266, sz. 1, o. 121024, okt. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121024.
- [6] Biró András, Hlavička Viktor, és Lublőy Éva, „Betonadalékanyagok viselkedése magas hőmérsékleten”, in XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO, Csíksomlyó: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), 2020, o. 20–25. Elérés: 2025. május 11. [Online]. Elérhető: <https://ojs.emt.ro/EPKO/article/view/228/174>
- [7] MSZ 18287-3:1983, „Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon – Hummel vizsgálat”, 1983.
- [8] ISO 834-1, „Fire-resistance Tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements”, 1999.
- [9] MSZ EN 12390-3, „A megszilárdult beton vizsgálata – A próbatestek nyomószilárdsága”, 2009.
- [10] MSZ EN 12390-5, „A megszilárdult beton vizsgálata - A próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálata”, 2009.