

Duzzasztott agyagkavics adalékanyagú betonok maradó törési energiájának változása magas hőmérséklet hatására

The residual fracture energy of expanded clay aggregate concrete subjected to high temperature

Dr. HLAVIČKA Viktor, adjunktus

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

Abstract

In case of normal and high-strength concretes significant experimental background and standardized methods are already available for determining and calculating fracture parameters. However, there are still several areas in the fracture mechanics of concretes whose experimental background is incomplete or contradictory. Such area is the description of the residual fracture energy of thermally-damaged concretes. In the present study, I compare the residual fracture energy of expanded clay aggregate concretes and of commonly used quartz gravel aggregate concretes after heat loading.

Keywords: lightweight concrete, fracture energy, high temperature, CMOD, expanded clay aggregate

Kivonat

Szokványos és nagyszilárdságú betonok esetén már jelentős kísérleti háttér és szabványos leírás áll rendelkezésre törési paraméterek meghatározására és számítására. Azonban több olyan terület is található még a betonok törésmechánikai vizsgálatánál, aminek kísérleti háttere hiányos, bizonyos esetekben akár ellentmondásos. Ilyen például a hőterhelt betonok maradó törési energiájának leírása. A bemutatott kísérletsorozatban duzzasztott agyagkavics betonok hőterhelés utáni maradó törési energiáját hasonlítom össze az építőiparban leginkább elterjedt kvarc kavics alapanyagú betonok maradó törési energiájával.

Kulcsszavak: könnyűbeton, törési energia, magas hőmérséklet, CMOD, duzzasztott agyagkavics

1. BEVEZETÉS

A törési energia az anyagban a húzószilárdság kimerülése következtében kialakuló repedés megnyílásához, terjedéséhez szükséges energia befektetést írja le. A beton, mint „kvázirideg” anyag esetén a beton szívósságát jellemzi [1,2].

A hőterhelt betonok törési energiájának témakörében a legismertebb és legelfogadottabb kísérletsorozatot Zhang és Bicanic [3,4] végezte el szokványos és nagyszilárdságú betonokon, bazalt és kvarc kavics adalékanyagok felhasználásával. Méréseik során arra az eredményre jutottak, hogy a hőmérséklet emelkedésével kezdetben növekszik a törési energia értéke, majd egy bizonyos hőmérséklet felett (300 °C) rohamosan csökken. A törési energia változását azzal magyarázták, hogy a kezdeti hőmérséklet-emelkedés tovább segít a cement hidratációjában, ami javítja a cementkő és az adalékanyag együtt dolgozását és erősíti az ún. adalékanyag-záródás (aggregate interlock) hatását. Egy bizonyos hőmérséklet felett azonban a cementkő bomlása és a nedvességtartalom változása olyan mikrorepedéseket hoz létre, amik a törési energia csökkenéséhez vezetnek. A szerzők kitérnek a megfelelő adalékanyag megválasztásának fontosságára is, mivel a különböző típusú adalékanyagok önmagukban is másképp reagálhatnak a magas hőmérséklet hatására [5]. Különböző típusú adalékanyagoknál eltérő lehet többek között a lejátszódó kémiai folyamatok miatti szilárdságvesztés és az eltérő hőtágulás miatti károsodás is, ami hatással van a cementkő és az adalékanyag kapcsolatára és az adalékanyag-záródás hatására.

2. VIZSGÁLT ANYAGOK

2.1 Adalékanyagok

A kutatás során két eltérő testsűrűségű duzzasztott agyagkavicsot (D1: 1465 kg/m³; D2: 1048 kg/m³) és etalonként folyami kotrásból származó kvarc kavicsot (E) használtam. A duzzasztott agyagkavics előállítása során az agyagot megőrlik, majd 1000-1200 °C-on kiégetik [6]. Az eljárásból adódóan a duzzasztott agyagkavics kevésbé érzékeny a magas hőmérsékletre, jellemzően még 600 °C felett sem következik be benne jelentős szilárdsági változás. Kvarc kavics 573 °C-on α -fázisból β -fázisba megy át [7], ami jelentős térfogat növekedéssel jár. Ez az átalakulás a beton szilárdsági leromlását idézi elő.

2.2 Keverékek

A beton szilárdságtani vizsgálatainál a próbatestek mérete egyértelműen meghatározza a betonkeverékeknel alkalmazott maximális adalékszemcse nagyságot [8]. Jelen kutatásban a törési energia vizsgálatához 70x70x250 mm hasábokat használtam, a próbatestekhez használt betonkeverékeknel a maximális adalékszemcse átmérőt 8 mm-ben határoztam meg. A betonkeverékek esetén célom volt, hogy a különböző adalékanyagok mellett a cementváz azonos legyen, ezért mind a három keveréknél ugyan azt a cementet és víz/cement tényezőt alkalmaztam. A kutatáshoz kohósalak tartalmú cementet használtam (CEM III 32,5 R), mivel a kohósalak tartalom javítja a cementkő hőállóságát [9]. A duzzasztott agyagkavics keverékek esetén számításba véve a könnyű adalékanyagok jelentős vízfelszívását, az adalékanyagokat keverés előtt fél napon keresztül vízben áztattam, hogy a porózus szemcsék vízfelvétele ne legyen befolyással a keverékben a cementkő hidratációjára. Mind a három keverék esetén 0/4 frakció folyami kotrásból származó homok volt, és csak a 4/8 frakciók cserélődtek a választott adalékanyagok szerint. Az alkalmazott keverékek receptúráit a 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Alkalmazott betonkeverékek

		E	D1	D2
Adalékanyag [kg/m ³]	homok 0/4	782	782	782
	kvarc kavics 4/8	1037	-	-
	D1 4/8	-	574	-
	D2 4/8	-	-	411
Cement [kg/m ³] (CEM III 32,5 R)		390	390	390
Víz [kg/m ³]		175,5	175,5	175,5
v/c		0,45	0,45	0,45
Folyósítószer (cem. m%)		0,2	0,2	0,2

A próbatesteket kizsaluzás után 7 napos korukig víz alatt, majd a vizsgálatok időpontjáig klíma kamrában (20 °C, 50 % páratartalom) tároltam. A vizsgálatokat a keverékek elkészítése után 60 nappal kezdtem meg. A szokványos 28 napos kortól való eltérést az indokolta, hogy a beton próbatestek minél jobban kiszáradjanak, elkerülve ezzel a hőterhelés alatt a próbatestek robbanásszerű tönkremenetelét (spalling).

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

3.1 Hőterhelés

A beton próbatestek hőterheléséhez elektromos kemencét használtam. A kemencék felfűtési sebessége megközelítette, de alul maradt a szabványos ISO tűzgörbe [10] felfűtésától. A próbatesteket a normál hőmérséklet (20 °C) mellett 7 különböző hőlépcsőben vizsgáltam (100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 °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 4-4 db próbatest volt vizsgálva.

3.2 CMOD vezérelt hajlító vizsgálat

A törési energia meghatározásához CMOD (crack mouth opening displacement) vezérelt, hárompontos hajlítóvizsgálatokat végeztem. A vizsgálat során a repedés megnyílásának sebessége állandó 0,1 mm/perc volt. A vizsgálati összeállítást az 1. ábra szemlélteti. A próbatest mérete 70x70x250 mm, a repedés indító bevágás mélysége 12 mm, a feltámaszkodások közti távolság 200 mm volt.



1. ábra: Hajlító vizsgálat



2. ábra: Nyomószilárdság meghatározása félhasábon

3.3 Nyomószilárdság vizsgálat

A kutatás során a keverékek nyomószilárdságát két féle képen is meghatároztam. Normál hőmérsékleten 150x150x150 mm élhosszúságú kockákon, és a hajlító vizsgálat után megmaradt félhasábon, 70x70 mm területű acél nyomólapokat használva (2. ábra). A hőterhelt betonok esetén csak a félhasábon történt a nyomószilárdság meghatározása.

3.4 Egyéb kiegészítő vizsgálatok

A vizsgálatok során meghatároztam a próbatestek testsűrűségét, víztartalmát és látszólagos porozitását a kiindulási hőmérsékleten, 3-3 próbatest felhasználásával. Továbbá a hőmérséklet hatására mértem a próbatestek tömegvesztését is.

4. EREDMÉNYEK

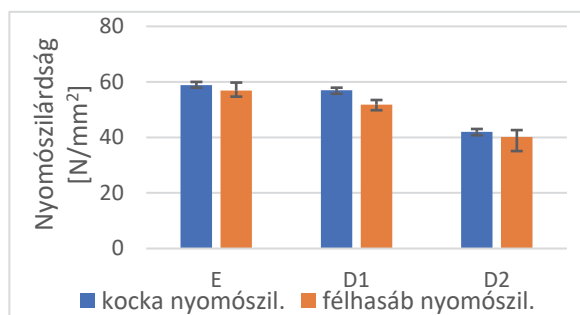
4.1 Keverékek tulajdonságai normál hőmérsékleten

A keverékek normál hőmérsékleten mért jellemzőit a 2. táblázat és a 3. ábra foglalja össze.

Az eredményekből látható, hogy a D1 és D2 keverékek testsűrűsége kisebb mint 2000 kg/m³, így mind a kettő könnyűbetonnak tekinthetők. A könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezetéből adódóan a vártnak megfelelően a látszólagos porozitás és ebből adódóan a kezdeti víztartalom értéke is meghaladja az etalon receptúra értékeit. A D1 adalékanyag nagyobb testsűrűségéből adódóan a keverék látszólagos porozitás és víztartalom értékei kisebbek, mint a D2 adalékanyagból készült keverék értékei.

2. táblázat: Keverékek tulajdonságai normál hőmérsékleten

Név	Testsűrűség [kg/m ³]	Víztartalom [m%]	Látszólagos por. [V%]
E	2230,4	3,20	13,16
D1	1764,8	5,05	16,56
D2	1715,3	5,34	17,25



3. ábra: Keverékek nyomószilárdsága

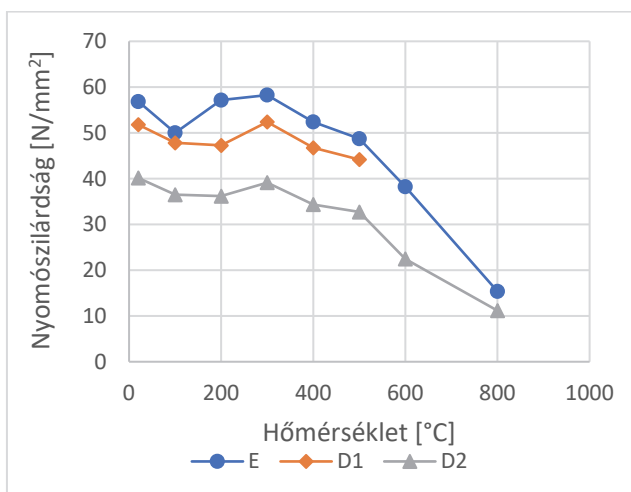
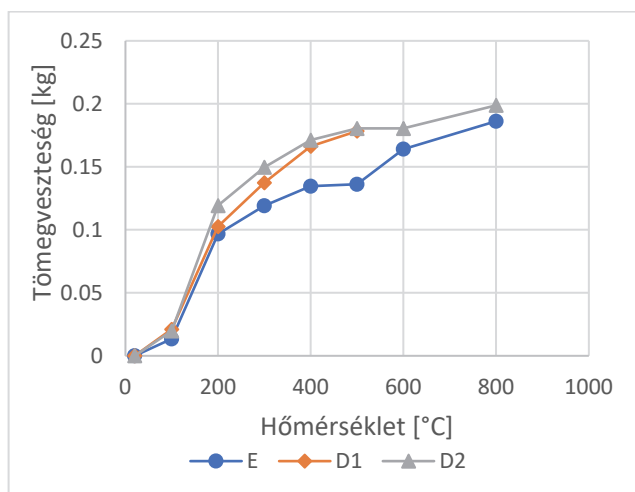
A nyomószilárdsági vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy a kockán mért nyomószilárdság értéke mind a három keveréknél nagyobb volt, mint a félhasábon mért nyomószilárdság értéke. A két vizsgálat eredményeinek aránya mind a három esetben nagyságrendileg azonos ($\approx 1,06$).

4.2 Tömegveszteség és a nyomószilárdság változása a hőmérséklet hatására

A hőmérséklet függvényében a tömegveszteség változását a 4. ábra, míg a nyomószilárdság változását az 5. ábra szemlélteti. Az eredményekből látható, hogy a tömegveszteség üteme a hőmérséklet hatására közel azonos mind a három keveréknél (4. ábra). 100 °C felett jelentős tömegveszteség tapasztalható, amit a kémiailag nem kötött víz távozása okoz, majd 300 °C felett a kémiailag kötött víz is eltávozik. Ekkor a tömegveszteség üteme lelassul. Kvarc adalékanyagú betonnál (E) 573 °C-on látható a kvarc fázisátalakulásának eredménye, ami térfogatnövekedés következtében fellazítja a cementkő struktúráját. A duzzasztott agyagkavics tartalmú betonok tömegvesztesége mind a két esetben nagyobb, mint az etaloné, ennek oka a nagyobb kezdeti víztartalom (2. táblázat).

A nyomószilárdság változása a hőmérséklet emelkedésével mind a három keverék esetén közel azonos (5. ábra). 100 °C környezetében egy lokális minimum figyelhető meg a víztartalom távozásának következménye, majd 300 °C-ig a keverékek újra felveszik a kiindulási nyomószilárdság értékét. A jelenség a szemcsék záródásának hatásával magyarázható: kevésbé magas hőmérsékleten a cementkő dehidratációjából származó szilárdságvesztést az adalékanyagok hőtágulásából származó szemcse záródás hatása kismértékben egyensúlyozni tudja [9,11]. Ezt követően a nyomószilárdság értéke jelentősen csökken.

A D1 keverék esetén 600 és 800 °C-on a próbatestek robbanásszerű tönkremenetele következett be, így ezekben az esetekben további következtetés nem vonható le.



4. ábra: Tömegveszteség a hőmérséklet hatására

5. ábra: Nyomószil. változása a hőmérséklet hatására

4.4 Törési energia változása a hőmérséklet hatására

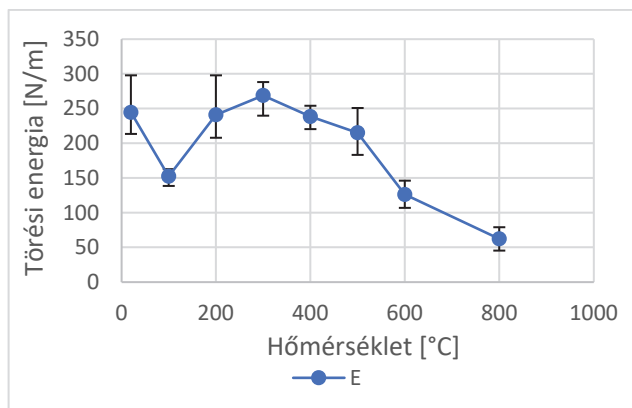
A törési energiát a következő képlettel [8] határoztam meg:

$$G_F = \frac{A_1 + M \cdot g \cdot \delta_0}{b \cdot (d - a)},$$

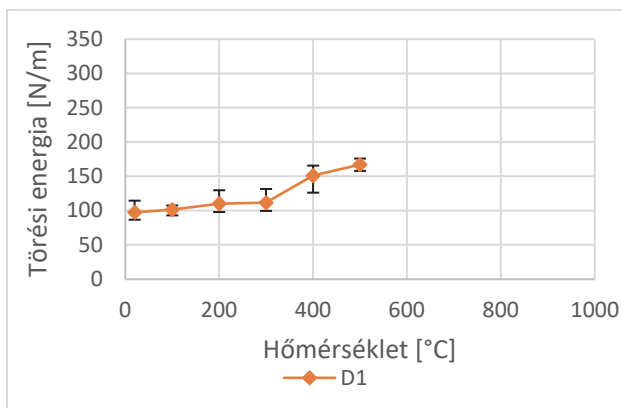
ahol:

- G_F törési energia [N/m],
- A_1 erő-elmozdulás görbe alatti terület [N*m],
- M a próbatest feltámaszkodási közre vonatkoztatott tömege [kg],
- g nehézségi gyorsulás: $g=9,81 \text{ m/s}^2$,
- δ_0 elmozdulás maximális értéke [m]
- b próbatest szélessége [m],
- d próbatest magassága [m],
- a bevágás magassága [m].

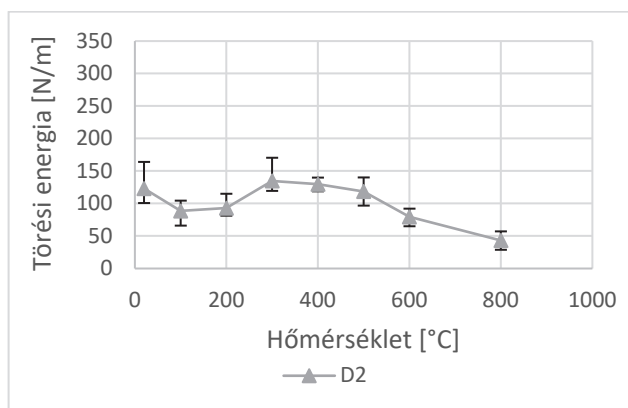
Az alkalmazott képlet leírásából látszik, hogy az összefüggés figyelembe veszi a próbatestre ható gravitációs erő hatását is. A vizsgálatok során a keverékek törési energiájának alakulását a hőmérséklet függvényében a 6.-9. ábrák foglalják össze.



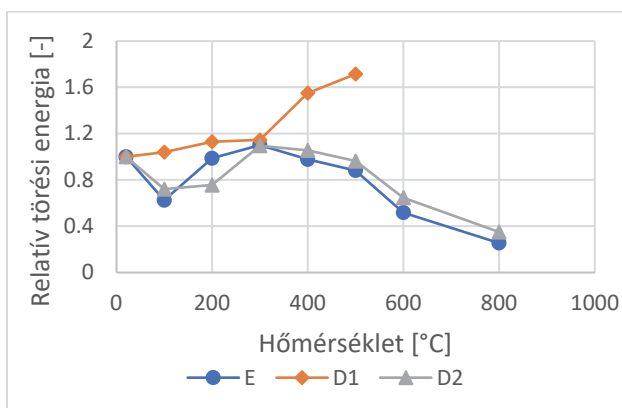
6. ábra: Etalon keverék törési energiájának változása



7. ábra: D1 keverék törési energiájának változása



8. ábra: D2 keverék törési energiájának változása



9. ábra: Keverék relatív törési energiájának változása

Az eredmények alapján két különböző tendencia különíthető el. Az egyik esetben lokális minimum figyelhető meg 100 °C környékén, majd 300 °C környezetében a törési energia újra felveszi a kiindulási értéket, majd ezt követően rohamosan csökken. Ebbe a kategóriába tartozik a mérések alapján a kvarckavics tartalmú etalon, és a kisebb testsűrűségű D2 duzzasztott agyagkavics tartalmú keverék. A másik esetben a törési energia a hőmérséklet emelkedésével kismértékben növekszik egészen 300 °C-ig, majd egy újabb nagyobb ütemű növekedés tapasztalható, ahol a maradó törési energia értéke 500 °C-ra megközelíti a kiindulási érték dupláját. Ez csak a nagyobb testsűrűségű D1 duzzasztott agyagkavics tartalmú keveréknél volt tapasztalható.

A két eltérő viselkedésre magyarázatot adhat a választott adalékszemcsék felülete és a két könnyű adalékanyag szemcse eltérő testsűrűsége. A kvarckavics adalékanyag esetén a lekerekedett szemcsék és a cement váz között nem jön létre olyan jó tapadás, mint a duzzasztott agyagkavics szemcsék érdes felületénél. Így a kvarc kavics esetén a repedés szemcséket megkerülve a károsodott kontaktzónában halad kisebb energia igényvel, míg a duzzasztott agyagkavics szemcsék esetén a repedés a szemcséken keresztül halad, ami a kisebb testsűrűségű szemcsék esetén kisebb, míg a nagyobb testsűrűségű szemcsék esetén nagyobb energia igényel jár.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott kísérletsorozatban duzzasztott agyagkavics betonok hőterhelés utáni maradó törési energiáját hasonlítom össze az építőiparban leginkább elterjedt kvarc kavics alapanyagú betonok maradó törési energiájával.

A vizsgálat alapján a következő megállapításokra jutottam:

- A D1 és D2 duzzasztott agyagkavics keverékek testsűrűsége kisebb mint 2000 kg/m³, így mind a kettő könnyűbetonnak tekinthetők. A könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezetéből

adódóan a vártak megfelelően a látszólagos porozitás és ebből adódóan a kezdeti víztartalom értéke is meghaladja az etalon receptúra értékeit.

- A tömegveszteség üteme a hőmérséklet hatására közel azonos mind a három keveréknél. 100 °C felett jelentős tömegveszteség tapasztalható, amit a kémiailag nem kötött víz távozása okoz, majd 300 °C felett a kémiailag kötött víz is eltávozik. Ekkor a tömegveszteség üteme lelassul. A duzzasztott agyagkavics tartalmú betonok tömegvesztesége mind a két esetben nagyobb, mint az etaloné, ennek oka a nagyobb kezdeti víztartalom.
- A nyomószilárdság változása a hőmérséklet emelkedésével mind a három keverék esetén közel azonos. 100 °C környezetében egy lokális minimum figyelhető meg a víztartalom távozásának következménye, majd 300 °C-ig a keverékek újra felveszik a kiindulási nyomószilárdság értékét. A jelenség a szemcsékszáródásának hatásával magyarázható: kevésbé magas hőmérsékleten a cementkő dehidratációjából származó szilárdságvesztést az adalékszemek hőtágulásából származó szemcse záródás hatása kismértékben egyensúlyozni tudja. Ezt követően a nyomószilárdság értéke jelentősen csökken.
- Az eredmények alapján két különböző tendencia különíthető el a keverékek maradó törési energiájának alakulásában. Az egyik esetben lokális minimum figyelhető meg 100 °C környékén, majd 300 °C környezetében a törési energia újra felveszi a kiindulási értéket, majd ezt követően rohamosan csökken. Ebbe a kategóriába tartozik a mérések alapján a kvarckavics tartalmú etalon, és a kisebb testsűrűségű D2 duzzasztott agyagkavics tartalmú keverék. A másik esetben a törési energia a hőmérséklet emelkedésével kismértékben növekszik egészen 300 °C-ig, majd egy újabb nagyobb ütemű növekedés tapasztalható, ahol a maradó törési energia értéke 500 °C-ra megközelíti a kiindulási érték dupláját.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm kollégáimnak Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva Eszternek, Dr. Salem George Nehmének és Dr. Gálos Miklósnak a vizsgálati anyagok beszerzésében és a szakmai kérdésekben nyújtott segítséget. A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



HIVATKOZÁSOK

- [8] EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004
- [9] fib MODEL CODE 2010. Berlin, Germany: Ernst&Sohn. 2013, ISBN: 978-3-433-03061-5
- [10] Zhang B., Bicanic N., Pearce C. J., és Balabanic G., *Residual fracture properties of normal- and high-strength concrete subject to elevated temperatures*, Mag. Concr. Res., köt. 52, sz. 2, o. 123–136, 2000.
- [11] Bicanic N. és Zhang B., *Residual Fracture Toughness of Normal- and High-Strength Gravel Concrete after Heating to 600 °C*, ACI Mater. J., köt. 99, sz. 3, o. 217–226, 2002.
- [12] Zhang B., Bicanic N., Pearce C. J., és Balabanic G., *Discussion on paper: Residual fracture properties of normal- and high-strength concrete subject to elevated temperatures*, Mag. Concr. Res., köt. 53, sz. 3, o. 221-224, 2001.
- [13] fib Bulletin 8 Lightweight Aggregate Concrete - Recommended extensions to Model, Code 90 - Case studies, Sprint-Druck Stuttgart, 2000
- [14] Waubke, N. V. *Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen*. TU Braunschweig, 1973.
- [15] Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages (RILEM) Technical Committee 50 FMC. *Draft recommendation: determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams*. RILEM Materials and Structures, 1985, 18, No. 106, 285–290.
- [16] Lublós É. *Tűz hatása a betonszerkezetek anyagaira*, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, 2008
- [17] ISO 834-1. Fire-resistance Tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements. 1999
- [18] Solyom S., Di Benedetti M., Guadagnini M., Balázs Gy. L. *Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete*, COMPOSITES PART B-ENGINEERING 183 Paper: 107602 , 10 p. 2020