

# RÖGZÍTŐELEMENEK KÚPOS KISZAKADÁSA TŰZKÁROSODOTT BETONBAN

## ABSZTRAKT

Kutatásunk során tűzkárosodott betonba elhelyezett rögzítőelemek teherbírását elemeztük. A vizsgálatainkkal célunk volt a tüzesetekben károsodott vasbeton szerkezeti elemek megerősítési munkálatainak segítése. A laboratóriumi vizsgálatokhoz epoxi ragasztóval rögzített 8 mm átmérőjű menetesszárat alkalmaztunk, 50 mm rögzítési mélységgel. A menetes szárat hőterhelés után kihűlt próbatestekbe ragasztottuk be. A beton próbatestek hőterhelése három lépcsőben történt (200, 300, 400 °C), a rögzítési mélységre vonatkozóan.

**Kulcsszavak:** tűzkárosodott beton, rögzítéstechnika, ragasztott rögzítőelem, alámetsző rögzítőelem szakadókúpos tönkremenetel

## CONCRETE CONE FAILURE OF BONDED ANCHORS IN THERMALLY DAMAGED CONCRETE

### ABSTRACT

In our paper we analysed the load bearing capacity of bonded anchors installed in thermally damaged concrete. Our primary goal was to facilitate the reinforcing techniques of reinforced concrete structural elements damaged in fire events. In our experiments, we tested the load bearing capacity of bonded anchors in thermally damaged concrete as a function of thermal load (200, 300, 400 °C). By our research we also aimed to follow our results by development of a calculation method that helps the work of engineers during design of anchors installed in thermally damaged concretes.

**Keywords:** concrete at high temperatures, thermally damaged concrete, fastening systems, concrete cone failure

## 1. BEVEZETÉS

### 1.1 Beton viselkedése magas hőmérsékleten

A megszilárdult beton két fő komponensből (adalékanyag, cementkő) álló, összetett anyag. Hőmérséklet emelkedésének hatására mindkettőben változások következnek be.

A hőmérséklet emelkedésével romlanak a beton szilárdsági jellemzői. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy.

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele alapvetően két okra vezethető vissza [1, 2]:

- a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve
- a betonfelület réteges leválására.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ [3]:

- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete megváltozik. A különböző hőmérsékleti tartományokban a betonban lejátszódó legfontosabb fizikai és kémiai folyamatokat foglaljuk röviden össze:

100 °C körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ) bomlása 50 °C és 110 °C között következik be [4, 5]. 200 °C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegveszteség újabb, kismértékű növekedéséhez vezet. A víztartalom (víz-cement tényező), a cement típusa és a beton kora befolyásolja az eltávozó pórusvíz és a kémiailag kötött víz mennyiségét. A kiinduló nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség 250-300 °C között már nem érzékelhető.

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 endoterm (hőelnyelő) csúcsot, és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz [6]. A portlandit dehidratációja okozza a legnagyobb szilárdságvesztést a betonban [7].

A közönséges betonok esetén a kvarc  $\alpha$  -ból  $\beta$  módosulatba való kristályátalakulása 573 °C-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7% os térfogat-növekedéssel jár [8], ami a beton lényeges károsodását eredményezi. Ezen hőmérséklet fölött a beton nem rendelkezik jelentős teherbírással.

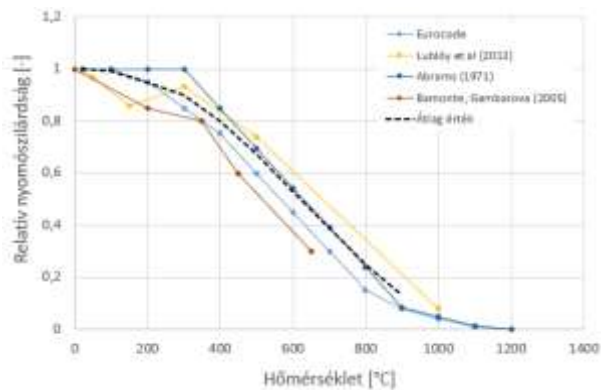
700°C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár [9].

A beton kémiai, illetve fizikai szerkezetváltozásának hatására a beton szilárdsági jellemzői is megváltoznak.

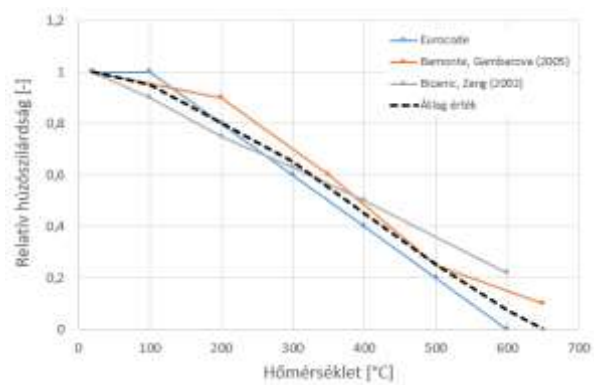
Korábbi kísérleti eredmények [10, 11, 12, 13] alapján elmondható, hogy a beton nyomószilárdsága 300 °C-ig csak kis mértékben, 300 °C fölött viszont jelentősen csökken (*I. ábra*). A jelenség a szemcsék záródásának jelenségével magyarázható. Ugyanis alacsonyabb hőmérsékleten a cementpaszta dehidratációjából származó szilárdságvesztést az adalék szemek hőtágulásából származó szemcse záródás hatása kis mértékben egyensúlyozni tudja. Magasabb

hőmérsékleten ez az ellenhatás kimerül. Ekkor a beton nyomószilárdságának csökkenése egyenesen arányos a hőmérséklet emelkedésével.

A korábbi kísérletek eredményeiből [11, 13, 14, 15] látható, hogy a beton húzószilárdsága a hőmérséklet emelkedésével közel lineárisan csökken (2. ábra). A beton húzószilárdsága a nyomószilárdsághoz képest sokkal érzékenyebben reagál a hőmérséklet emelkedésére, ami a betonban kialakuló mikro-repedések eredménye.



1. ábra - A beton relatív nyomószilárdságának változása a hőmérséklet függvényében



2. ábra - A beton relatív húzószilárdságának változása hőmérséklet függvényében

Beton esetén a maradó szilárdság értékére hatással van a lehűtés típusa és sebessége is. A CEB [16] alapján meg kell különböztetnünk gyors és lassú lehűtést. Más vizsgálatok [17] ezt tovább bővítették a különböző hűtési típusokkal (laborlevegő, kényszerlégáram, vízköd, vízbemártás).

A betonszerkezetek tűz esetén való tönkremenetelének másik oka a betonfelületek robbanásszerű leválása. A betonfelületek leválásának két oka lehet:

- 1) a betonból távozó vízgőz lefeszíti a felületi rétegeket vagy
- 2) a terhelt zóna már nem tudja a hőtágulásból származó újabb erőket felvenni és elmorzsolódik, leválik [18].

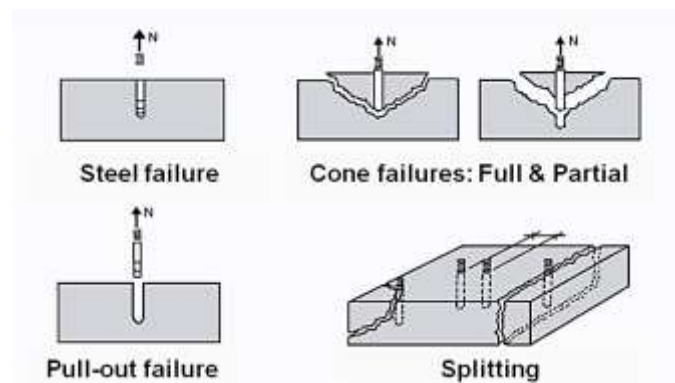
## 1.2 Betonban alkalmazott rögzítőelemek

Napjainkban számos rögzítőelem típus áll rendelkezésünkre a legkülönbözőbb kialakítással a megfelelő erőátvitel kialakulásához. Az erőátvitel alapján a rögzítőelemeket a következő csoportokba sorolhatjuk: formazárás, súrlódásos zárás, ragasztás. Formazárás esetén az utólagosan elhelyezett csapok kapcsolatának kialakításához speciális fűrófej szükséges, ami egyedi üreget készít a furat végén a rögzítőelem számára. A rögzítőelem behelyezése után a dübel vége szétnyílik és nekifeszül az üreg falának, így adja át az igénybevételeket. Ebbe a csoportba tartoznak az alámetsző csapok is. Súrlódásos zárás (terpesztés) esetén az elem rögzítésekor (lehet elmozdulás, vagy nyomaték kontrollált) nagy erő keletkezik a palást felülete mentén, ami a rögzítőelem csúszó része és a furat fala közti súrlódási ellenállást nagymértékben növeli. A rögzítőelem csúszó része megfelelő csavaró nyomaték vagy beütés hatására szétnyílik, nekifeszül a furat falának, így hozva létre a fent említett ellenállást a húzóerő felvételére. A szükséges elmozdulás vagy nyomaték nagysága a dübel típusától függ. Ragasztás esetén ragasztó behatol a fogadóanyagba és a menetes szár menetei közé majd megszilárdul.

Terheléskor a ragasztó közvetíti az erőt a fogadóanyag felé, miközben a ragasztóban nyíró igénybevétel keletkezik. Rögzítéskor a szár átmérőjénél nagyobb furatot kell létrehozni, hogy a ragasztó teljesen körbe tudja zárni a menetes szárat, és hogy a furat egész felületén létrejöjjön a behatolás a fogadó anyagba. A ragasztók anyaga lehet szerves (telítetlen poliészter, vinilészter, epoxi), szervetlen (cement), vagy vegyes. [19, 20, 21].

Rögzítőelemek teherbírásának számításánál a különböző tönkremenetekhez tartozó ellenállást vesszük figyelembe. A rögzítőelem maximális teherbírását a tönkremenetekhez tartozó minimális ellenállás határozza meg.

Húzott rögzítőelemek esetén a következő tönkremenetek lehetségesek: szárszakadás, a beton szakadókúpos tönkremenetele, kihúzódás, felhasadás (3. ábra) [20].



3. ábra – Húzott rögzítőelemek tönkremeneteli módjai

A rögzítőelem szárszakadása az acél szár teherbírásának függvénye. a teherbírás az acél szakítószilárdságából és a szár átmérőjéből számítható.

A beton elem felhasadásához vezet, amikor a beton próbatest geometriája nem megfelelő, például, ha a rögzítőelem a szélhez közel lett elhelyezve, vagy ha a sorba rakott rögzítőelemek túl közel lettek kiosztva.

Ragasztott csapok esetén, ha a rögzítés kihúzódik, akkor a kapcsolat tönkremehet a ragasztó és a beton fala, vagy a szár és a ragasztó között. Esetenként a beton és a ragasztó közti kapcsolat megszűnése a rögzítés felső részén következik be, míg a rögzítés alsó szakaszán a szár és a ragasztó közt történik a tönkremenetel. A szakirodalom ezt nevezi vegyes tönkremenetelnek.

A szakadókúpos tönkremenetel a C-C Method (Concrete Capacity Method) alapján számítható [22, 23]. A módszer kísérleti és numerikus számítások eredményein alapszik:

$$N_u = k * \sqrt{f_c} * h_{ef}^{1,5} \quad (1)$$

ahol:

k = a rögzítőelem típusától függő tényező,

$h_{ef}$  = a rögzítési mélység [mm],

$f_c$  = a beton nyomószilárdsága [N/mm<sup>2</sup>]; ( $\sqrt{f_c} \approx f_{ct}$ ),

$f_{ct}$  = a beton húzószilárdsága [N/mm<sup>2</sup>].

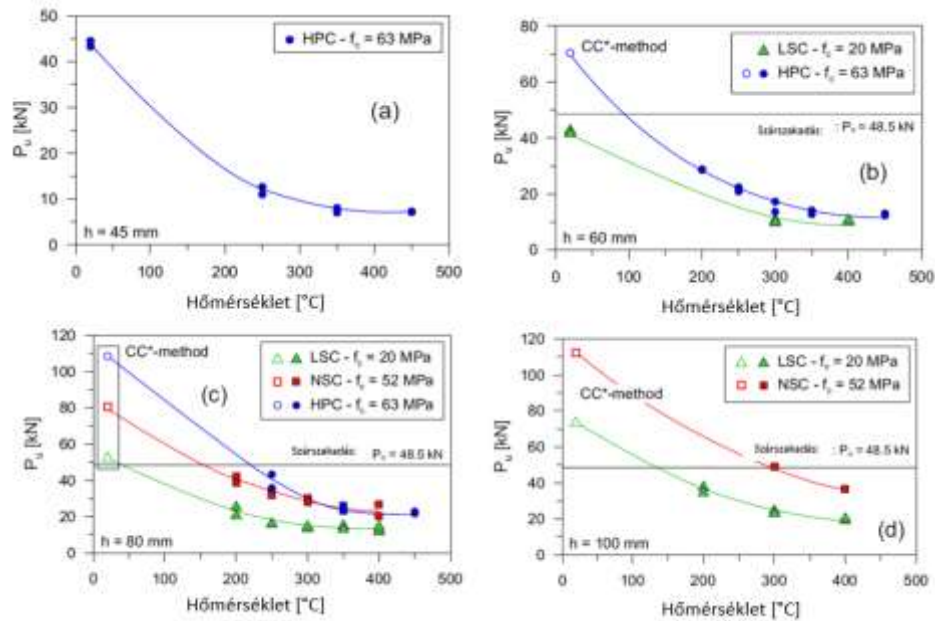
A módszer újdonsága az előző számítási metódusokhoz képest [24], hogy a szakadókúp kialakulását 35°-os szöggel veszi figyelembe (elemben az eddig feltételezett 45°-os szöggel). Továbbá figyelembe veszi az úgynevezett mérethatást is [25]. Napjainkban több méretezési segédlet és szabvány [26, 27, 28, 29, 30] is ezt a formulát javasolja.

A szakirodalomban található kísérletek alapján látható, hogy a rögzítőelemek tűzkárosult betonban való vizsgálata több szempontból is megközelíthető. A legáltalánosabb vizsgálatban a teljes kapcsolat kerül hőterhelés alá. Ekkor az acél rögzítőelem, és a beton fogadóanyag (adott esetben a ragasztó is) egyszerre van kitéve a hőmérséklet emelkedésének. Ebben az esetben figyelembe kell venni, hogy a rögzítőelemek acélból készülnek így sokkal gyorsabban átmelegszenek, ezzel bevezetve a hőt a közvetlen környezetükbe, felgyorsítva így a beton vagy adott esetben a ragasztó károsodását [31, 32, 33]. Ragasztott kapcsolatok magas hőmérsékleten (tűz alatt) való vizsgálata során húzóigénybevételrel egyidejűleg történik a hőmérséklet emelkedése [34], ebben az esetben a ragasztók jelentős hőmérséklet érzékenysége miatt a ragasztó tönkremenetele és ezzel egyidejűleg a rögzítőelem kihúzódása várható [35]. Ugyanakkor a ragasztók hőérzékenysége javítható a cementtartalom növelésével, ezzel kitolva időben a ragasztott kapcsolat tönkremenetelét [36]. Mechanikus terpesztett csapoknál megfigyelhető, hogy a rögzítőelem hőtágulásából adódóan a befeszülés mértéke megnő, és a beton szilárdságsökkenése miatt ez többlet repedéshez is vezethet a befeszülés környezetében [37].

Egy másik megközelítési mód amikor a rögzítőelem már a beton hőterhelése után kerül elhelyezésre. Ez az eset tűzkárosodott épületek megerősítésénél (köpenyezésnél, gyámolításnál) kerülhet előtérbe. Ebben az esetben:

- a rögzítőelem nem vezet be plusz hőt a beton szerkezetébe,
- a kapcsolat nincs kitéve magas hőmérsékletnek így nem történik szilárdságvesztés az acél rögzítőelemben, és adott esetben a ragasztóban sem.

Szakirodalom alapján a hőterheléshez viszonyítva utólag elhelyezett rögzítőelemek vizsgálata csak alámetsző csapok alkalmazásával készült. Az eredmények alapján elmondható, hogy a rögzítőelemek teherbírása nagyban függ a rögzítési mélységtől. Sokkal jobb eredmények érhetők el, ha az alámetsző csap feje nem vagy csak kevésbé károsodott beton rétegbe kerül. Továbbá számításokkal azt is igazolták, hogy a C-C Method nem alkalmas ezen rögzítések teherbírásának leírására, ha az alámetsző csap környezetében lévő maradék nyomószilárdságot vesszük alapul, vagy ha a rögzítési mélység a felszín közti átlag nyomószilárdságot alkalmazzuk a képletben [11, 38, 39, 40]. A hivatkozott vizsgálatok eredményeit a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: Alámetsző csapok teherbírásának változása hőkárosodott betonban különböző rögzítési mélységek esetén [11]

Kísérleteink során mi is a hőterheléshez viszonyítva utólag elhelyezett rögzítőelemek vizsgálata tűztük ki célul. Kiegészítve a témakört a ragasztott csapok viselkedésének elemzésével.

## 2. KÍSÉRLETI LEÍRÁS

Vizsgálataink során tűkárosodott vasbetonban elhelyezett rögzítőelemek teherbírását elemeztük a hőmérséklet teher függvényében. A korábban elvégzett vizsgálatoknál [11, 38, 39, 40] alámetsző csapokat használtak. A kísérletek nem tértek ki más típusú rögzítések viselkedésére, ebből adódóan mi a vizsgálatainkhoz ragasztott kapcsolatokat alkalmaztunk, hogy vizsgáljuk a ragasztott kapcsolat teherbírását és tönkremenetelét.

A kísérlet során az elkészített próbatesteket egyoldali tűzterhelésnek tettük ki, majd a kívánt hőmérséklet elérése után hagytuk kihűlni a próbatestet laborhőmérsékleten (20 °C). A tűzterhelést követő napon, jellemzően 24 óra elteltével, a próbatest kihűlése után került sor a rögzítőelem elhelyezésére a tűzkárosodott próbatestben. A ragasztó térhálósodásának időt hagyva a rögzítések terhelésére újabb 24 óra elteltével került sor.

### 2.1 Vizsgált rögzítőelemek

A vizsgálatok során egy fajta ragasztott rögzítőelemet alkalmaztunk (epoxi ragasztó). A rögzítőelemek elhelyezése a gyártói útmutatás alapján történt a megfelelő furattisztítás alkalmazásával. A rögzítési mélység ( $h_{ef}$ ) minden esetben 50 mm volt. Az alkalmazott menetesszár átmérője 8 mm, szilárdsági osztálya 10.9 (szakítószilárdság: 1000 N/mm<sup>2</sup>, folyási feszültség: 900 N/mm<sup>2</sup>) volt.

## 2.2 Alkalmazott betonreceptúra

Az alkalmazott beton receptúráját az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat – Az alkalmazott betonreceptúra

Anyag	Típus	Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	Mennyiség [l/m <sup>3</sup> ]
Adalékanyag	0/4 mm	833	315
	4/8 mm	463	175
	8/16 mm	556	210
	SUM	1852	700
Cement	CEM I 42,5 N	290	93.5
Víz		196	196
Folyósító		0.58	0.58
Levegő		-	10
SUM		2338	1000

A beton próbatesteket 28 napos korrig vegyesen tároltuk (7 napig víz alatt, majd 21 napig laboratóriumi hőmérsékleten, 20 °C-on). A kihúzó kísérlethez használt betonpróbatestek geometriája 300x300x150 mm volt. Ez a geometria megfelel az alkalmazott rögzítési mélységhez az *ETAG 001* [30] által javasolt rögzítési próbatest geometriájával.

Az elkészült próbatestek nyomószilárdságát minden egyes keverékből készített 3 db 150x150x150 mm élhosszúságú kockán vizsgáltuk 28 napos korban. Az eredményeket a *EN 12390-3:2009* [41] alapján értékeltük ki. A beton próbatestek átlagos nyomószilárdsága  $f_c = 45,29 \text{ N/mm}^2$  volt. A betonpróbatestek többi szilárdsági paraméterét (2. táblázat) a *fib MC 2010* [27] alapján számoltuk.

2. táblázat – Beton paraméterek

<b>Nyomószilárdság (<math>f_c</math>):</b>	45,29	N/mm <sup>2</sup>
<b>Húzószilárdság (<math>f_t</math>):</b>	3,81	N/mm <sup>2</sup>
<b>Rugalmassági modulus (<math>E</math>):</b>	35571	N/mm <sup>2</sup>
<b>Törési energia (<math>G_f</math>):</b>	0,09	N/mm

## 2.3 Tűzterhelés

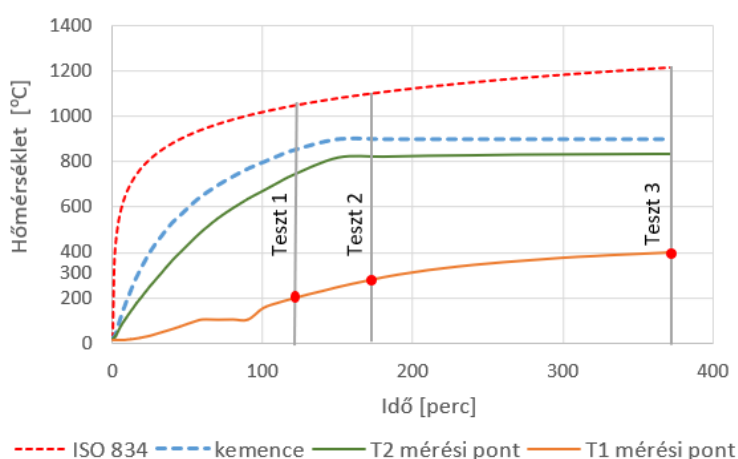
A laboratóriumi vizsgálatok során a beton próbatesteket egyoldali hőterhelésnek tettük ki. A hőterheléshez elektromos kemencét használtunk, aminek felfűtési görbéje a 5. ábrán látható. A mérési adatok alapján megállapítható, hogy a kemence tűzgörbéje eltér az *ISO 834-1* [42] szerinti normál tűzgörbétől, ezért a kísérlet nem nevezhető szabványos vizsgálatnak. Azonban a kemence felfűtési görbéje többszöri ellenőrzés után is változatlan maradt, így alkalmas volt a különböző mértékben tűzterhelt próbatestek összehasonlítására.

A próbatestek tűzterhelése három különböző hőlépcsőben történt, a rögzítési mélységre vonatkoztatva: 200, 300, 400 °C (3. táblázat).

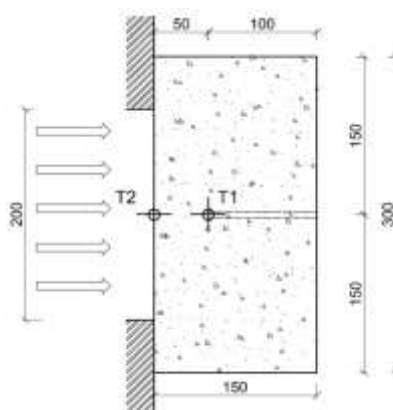
### 3. táblázat – Kísérleti mátrix

Teszt	Idő [perc]	Hőmérséklet a rögzítési mélységben [°C]	Próbatest [db]
Teszt 0	0	20	3
Teszt 1	120	200	3
Teszt 2	190	300	3
Teszt 3	370	400	3

A rögzítési mélységben és a próbatest felületén a hőmérsékletet termoelemekkel mértük. Az utóbbi a próbatest tűztől mentett oldalán lett elhelyezve egy vizsgálati furaton keresztül ( $\varnothing$  6mm). Az 5. ábrán látható, hogy a próbatest fokozatosan melegszik, a kemencétől eltérő, jelentősen lassabb tendenciában. 100 °C elérése után a hőmérséklet egy rövid ideig konstans, ekkor a betonban található vízgőzzé alakul, és elkezd kiáramlani a betonból. Ekkor a hőmérséklet nem emelkedik, mivel a hőenergia teljes egészében a víz fázisátalakulására fordítódik. A tűzterhelés sematikus összeállítását a 6. ábra szemlélteti.



5. ábra – A különböző pontokban mért hőmérsékletek alakulása a tűzterhelés alatt



6. ábra – A mérési összeállítás

A vizsgálat során a beton réteges leválását (spalling) egyik próbatest esetén sem tapasztaltuk. Ennek oka lehet, hogy a betonban keletkezett vízgőz a próbatest méretei és a mérési kialakítás miatt nem tudott felhalmozódni a próbatesten belül, nem jött létre a nedvességgát. A gőz szabadon kiáramolhatott a próbatest hőmérsékletének méréséhez készített vizsgálati furaton, és a próbatest oldalain.

#### 2.4 Kihúzó kísérlet

A rögzítőelemek teherbírásának vizsgálatára úgynevezett *nem leszorított* kihúzóvizsgálatot alkalmaztunk (7. ábra). Ennél a vizsgálati típusnál a rögzítőelem összes tönkremeneteli formálja kialakulhat. A leszorítás a rögzítőelemtől adott távolságban ( $4h_{ef}$ ) lett elhelyezve így az eredményekre nincs befolyással a leszorító keret közelsége.



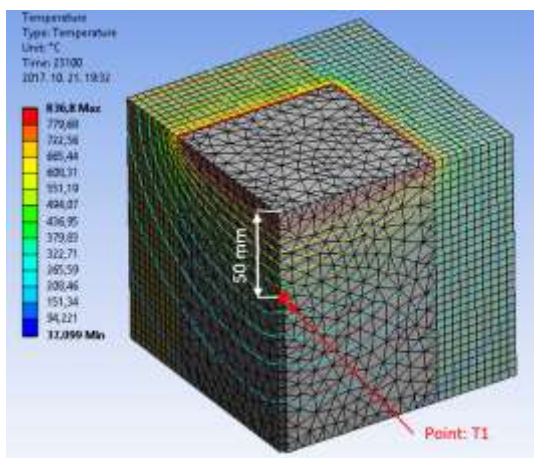
A vizsgálathoz elmozdulás vezérelt húzógépet alkalmaztunk, hogy a maximális erőfelvétel után is mérni tudjuk az erő csökkenését. A beépített elmozdulás mérők és az erőmérő cella lehetővé tette a mért eredmények időbeli alakulásának vizsgálatát. A két irányba elhelyezett csuklók pedig a tiszta húzás kialakulását biztosították. Az így megvalósított vizsgálati összeállítás megfelel az *ETAG 001 Annex A* [30] minősítési eljárásban leírtaknak.



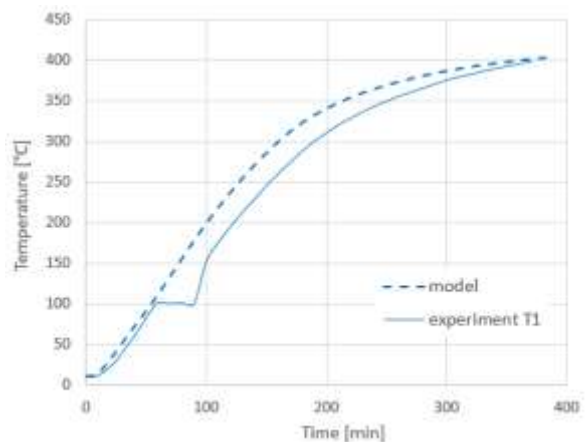
7. ábra – Kihúzó kísérlet kialakítása

#### 4. NUMERIKUS HŐTERJEDÉS VIZSGÁLAT

A laboratóriumi kísérleteket kiegészítve numerikus hőtechnikai analízist is végeztünk egy végeleemes programmal. Az elemzés célja a betonban kialakuló izoterma vonalak felvétele volt. A beton hőtechnikai paraméterei a hőmérséklet emelkedésével változnak. A modellben használt hőtechnikai paramétereket az *EN 1992-1-2:2004* [13] és a *fib BULLETIN 38* [43] ajánlásai alapján vettük fel. A hőtechnikai modell (8. ábra) validálásához a rögzítési mélységben mért hőmérsékletváltozást (lásd 5. ábra) használtuk. A 9. ábra mutatja a laboratóriumi vizsgálatoknál a rögzítési mélységben mért és a hőtechnikai modellben számított hőmérsékletváltozás egyezését.



8. ábra – Numerikus hőterjedés vizsgálat



9. ábra – A modell eredményeinek validálása a mért eredményekkel

## 5. EREDMÉNYEK ÉS MEGÁLLAPÍTÁSOK

### 5.1 Kísérleti eredmények

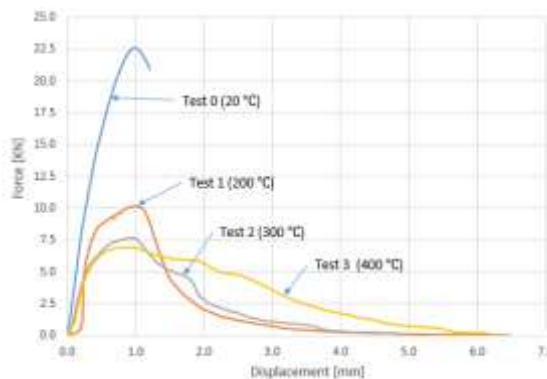
A kísérlet során a rögzítések tönkremeneteleként minden esetben a beton kúpszerű tönkremenetelét tapasztaltuk (10. ábra). A tönkremenetelekből látható, hogy a ragasztó és a tűzterhelt beton között is ki tudott alakulni olyan erősségű adhéziós kötés, ami a beton kúpszerű tönkremenetelét okozta.



10. ábra. – Kúpszerű kiszakadás tűzkárosodott betonban

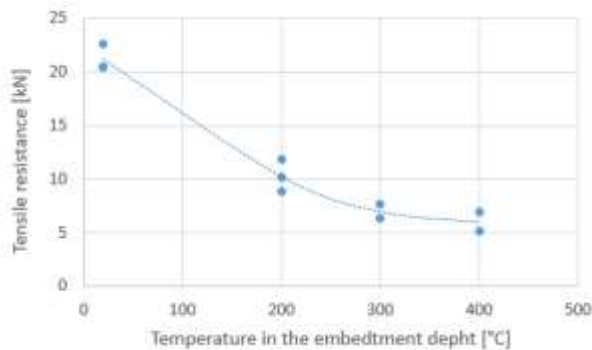
A vizsgálatok alatt egyik próbatestnél sem volt tapasztalható tiszta kihúzódás, sem a beton kúpszerű tönkremenetelének és a kihúzódásnak a kombinációja. A beton kúpok felületén látható volt, hogy a tűzterhelt felülethez közeli adalékszemcsék vöröses árnyalatúra színeződtek, az elszíneződött adalékszemek aránya a rögzítési mélységhez közelítve a hőmérséklet emelkedésével szintén emelkedett. Az elszíneződés a kvarckavicsban lejátszódó kémiai folyamatokkal magyarázható. A tűzterhelt próbatestek esetén a kúp kialakulásánál a repedés csak a cementkőben haladt, az adalékszemcsék épen maradtak. Az adalékszemcsék könnyen kifordultak a helyükről, ami a cementkő és az adalékanyag közti tapadás károsodásának következménye.

Az etalon próbatesteken mért kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéje egy rideg tönkremenetelt írt le (11. ábra). A kezdeti gyors erőfelvételt, a maximális teherbírás elérése után egy gyors tönkremenetel követte, amihez kis elmozdulások tartoztak. A tűzterhelt próbatesteken mért kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéin látható a fokozatos teherbírás csökkenés. Megfigyelhető, hogy a görbék a hőmérséklet emelkedésével egyre jobban ellaposodtak, ami azt jelenti, hogy a tönkremenetelhez egyre nagyobb elmozdulások tartoztak. Érdekes megjegyezni, hogy a maximális erő felvétele mind a négy esetben közel azonos elmozdulási értékhez tartozott (~1 mm).

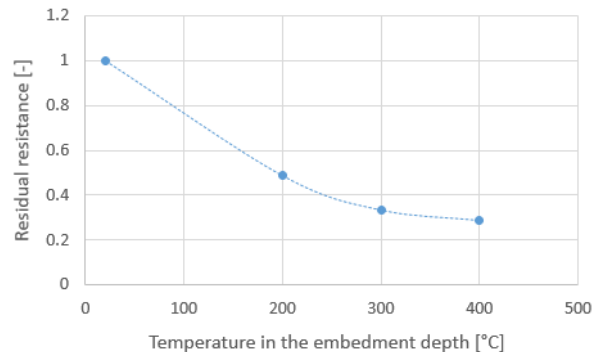


11. ábra – A tönkremenetelekhez tartozó tipikus erő-elmozdulás görbék (a hőmérsékleti érték a rögzítési mélység alá vonatkozik)

A 12. ábra a rögzítések teherbírását, a 13. ábra a relatív maradó teherbírásértékeket mutatja a hőmérséklet függvényében. Az eredmények alapján elmondható, hogy a teherbírás a hőmérséklet emelkedésével csökken. Ugyanakkor a csökkenés csak a kezdeti szakaszban lineáris, majd mikor a teherbírás eléri a 40%-ot a csökkenés lelassul.



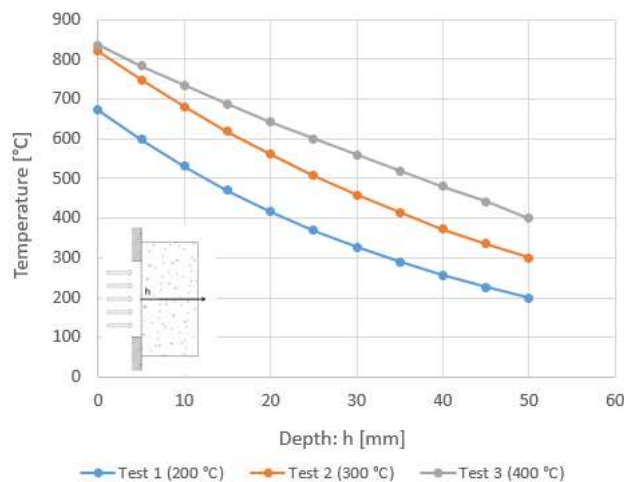
12. ábra – Rögzítések mért teherbírása a rögzítési mélység hőmérsékletének függvényében (egy-egy pont fedésben vannak)



13. ábra – Relatív maradó teherbírás a rögzítési mélység hőmérsékletének függvényében (minden pont 3 mérési pont átlaga)

## 5.2 Numerikus analízis eredményei

A hőtechnikai analízis eredményeként megkaptuk a beton próbatestben kialakuló izoterma vonalak eloszlását mind a három vizsgálat esetén. A felszín és a rögzítési mélység között kialakult hőmérséklet eloszlást a 14. ábra szemlélteti. Az eredményekből látható, hogy mind a három esetben a hőmérséklet eloszlás nem lineáris.



14. ábra – Hőmérséklet eloszlása a felület és a rögzítési mélység között

## 5.3 Csökkentő tényező számítási módszer

Kutatásunk során célunk volt a laboratóriumi eredmények számítás útján való reprodukálása is. Ezzel segítve a tervezők és a gyártók munkáját hasonló körülmények között.

Laboratóriumi eredményeket és a hőtechnikai modell eredményeit felhasználva felírható egy egyszerűsített képlet a csökkentett teherbírás számítására:

$$N_{u,t} = N_{u,20} * \gamma_t(h_{eff}) \quad (2)$$

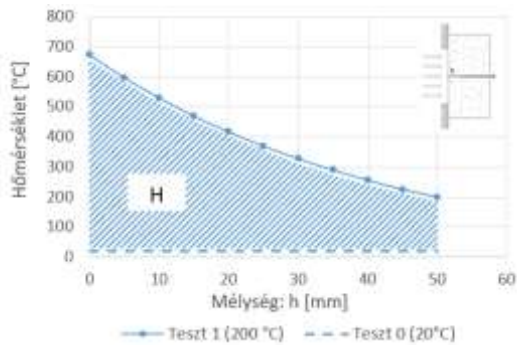
ahol:

$N_{u,t}$  = a kúpszerű kiszakadáshoz tartozó teherbírás hőkárosodott betonban [kN],

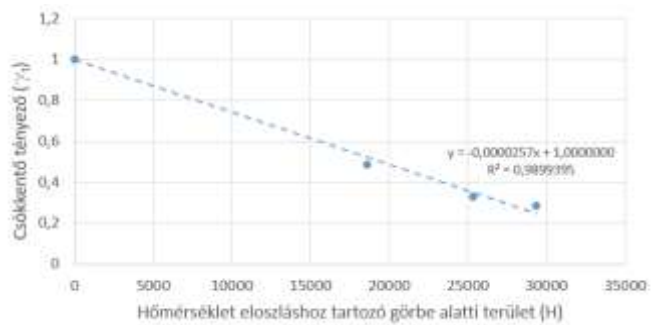
$N_{u,20}$  = a kúpszerű kiszakadáshoz tartozó teherbírás 20 °C-on [kN],

$\gamma_t(h_{eff})$  = csökkentő tényező [-].

Mivel a  $\gamma_t(h_{eff})$  csökkentőtényező a beton károsodását adódik ezért jól jellemezhető azzal a többlet hőmérséklettel, ami a beton tönkremenetelét okozza. A 15. ábrán az 1-kísérlethezhez tartozó hőmérséklet eloszlást és a kapott görbe alatti területet láthatjuk (H). Az így kapott terület (H) jellemzi azt a többlet hőmérsékletet, amit a tűzterhelés során kapott a beton próbatest. A görbe alatti terület és a laboratóriumi kísérletekből visszaszámolt csökkentőtényező függvényéből látható, hogy a két érték lineárisan függ egymástól (16. ábra).

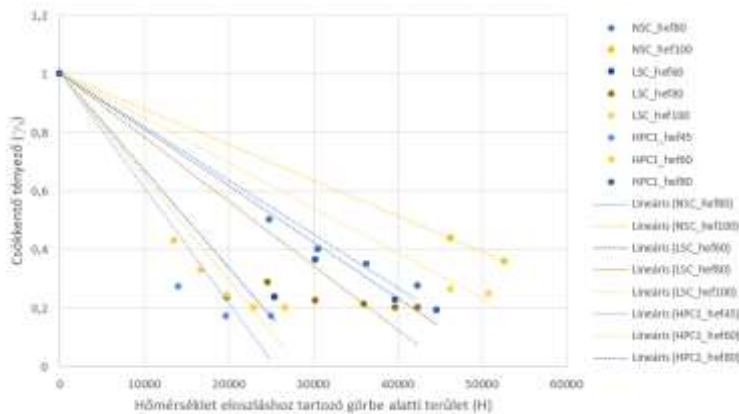


15. ábra – Teszt 1-hez tartozó hőmérséklet eloszlás és a kapott görbe alatti területe (H)

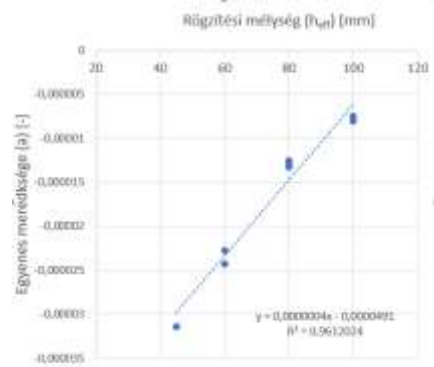


16. ábra – A csökkentő tényező alakulása a hőmérséklet eloszláshoz tartozó görbe alatti terület függvényében

A leírt számításokat elvégeztük az irodalomban fellelhető alámetsző csapok vizsgálati eredményeivel (lásd: 4. ábra) is. Az eredményekből látható a különböző rögzítési mélységekhez eltérő meredekségű egyenesek tartoznak (17. ábra). Ahol az egyenesek meredeksége egyenletesen függ a rögzítési mélység nagyságától (18. ábra).



17. ábra - A csökkentő tényező alakulása a hőmérséklet eloszláshoz tartozó görbe alatti terület függvényében



18. ábra – Egyenesek meredeksége és a rögzítési mélység közti összefüggés

A javasolt egyszerűsített módszer előnye, hogy a bármilyen jellegű tűz esetén normál hőmérsékleten vett teherbírás és a betonban kialakult izoterma vonalak ismeretében az egyenesek felhasználásával a hőkárosodott betonban elhelyezett rögzítőelem teherbírása

egyszerűen számítható. A módszer hátránya, hogy csak olyan esetben alkalmazható, ha a rögzítési mélység teljes hossza a beton hőkárosodott rétegében helyezkedik el. Mivel az így számolt csökkentő tényező nem veszi figyelembe az épen maradt rétegek teherbírását.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során tűzkárosodott betonba elhelyezett rögzítőelemek teherbírását elemeztük. A vizsgálatainkkal célunk volt a tüzesetekben károsodott vasbeton szerkezeti elemek megerősítési munkálatainak segítése. A laboratóriumi vizsgálatokhoz epoxi ragasztóval rögzített 8 mm átmérőjű menetesszárat alkalmaztunk, 50 mm rögzítési mélységgel. A menetes szárat hőterhelés után kihűlt próbatestekbe ragasztottuk be. A beton próbatestek hőterhelése három lépcsőben történt (200, 300, 400 °C), a rögzítési mélységre vonatkozóan.

A kísérlet során a rögzítések tönkremeneteleként minden esetben a beton kúpszerű tönkremenetelét tapasztaltuk. A tönkremenetelekből látható, hogy a ragasztó és a tűzterhelt beton között is ki tudott alakulni olyan erősségű adhéziós kötés, ami a beton kúpszerű tönkremenetelét okozta.

Az etalon próbatesteken mért kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéje egy rideg tönkremenetelt írt le. A tűzterhelt próbatesteken mért kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéin látható a fokozatos teherbírás csökkenés. Megfigyelhető, hogy a görbék a hőmérséklet emelkedésével egyre jobban ellaposodtak, ami azt jelenti, hogy a tönkremenetelhez egyre nagyobb elmozdulások tartoztak.

Kutatásunk során célunk volt a laboratóriumi eredmények alapján egy egyszerűsített számítás kidolgozása. A csökkentő tényezős meghatározásához a betonba bevitt többlet hőmérsékletet vettük alapul, aminek meghatározásához végelelemes analízist is végeztünk. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a csökkentő tényező lineárisan függ a bevitt hőmérséklettől. A leírt számítást elvégeztük az irodalomban fellelhető alámetsző csapok vizsgálati eredményeivel is. Az eredményekből látható a különböző rögzítési mélységekhez eltérő meredekségű egyenesek tartoznak. Ahol az egyenesek meredeksége egyenletesen függ a rögzítési mélység nagyságától.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnének köszönetet mondani Kovács-Sebestény Szabolcsnak és a Fischer Hungáriának a vizsgált rögzítőelemek biztosításáért. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.



AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÚNKP-18-3 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

## IRODALOM JEGYZÉK

- [1] Kordina, K.: Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997
- [2] Kerekes, Zs.: The new qualification of the fire safety of the constructions and buildings materials according to the Euroclass (Az építőanyagok új "Euroclass" szerinti tűzveszélyességi minősítése és hazai bevezetése), TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK SZENT ISTVÁN EGYETEM YBL MIKLÓS

MŰSZAKI FŐISKOLAI KAR 5:(1)

pp. 47-57.,2008

- [3] Thielen, K. Ch.: Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [4] Khoury, G. A., et al.: Fire Design of Concrete Materials structures and modelling, Proceeding of 1<sup>st</sup> fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001
- [5] Kopeckó, K., Balazs, Gy. L.: Chloride Ion Binding of Cement Clinkers and Cements Influenced by Steam Curing, Proceedings of the International *fib* Symposium on Structural Concrete and Time (Editors: Di Mayo A A, Zega C J), La Plata, Argentina, 2005, 28.09-30.09.30. pp. 147-154.
- [6] Schneider, U., Weiß, R.: „Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen, Cement and Concrete Research, 1977, Vol 11, pp. 22-29
- [7] Lublőy, É., Balázs, Gy. L.: Concrete properties in fire depending on type of cement, aggregate and fibre, CCC2007 Visegrád Proceedings (Eds: Balázs, L. Gy., Nehme, S. G.), 2007, ISBN 978-963-420-923-2, pp.: 327-332
- [8] Waubke, N. V.: Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C-Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig, 1973
- [9] Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig, 1987
- [10] Abrams, M. S.: Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F, ACI SP 25, Temperature and Concrete, Detroit, American Concrete Institute, 1971.
- [11] Bamonte P. F., Gambarova P.G.: Residual behaviour of undercut fasteners subjected to high temperatures, fib Symposium “Keep Concrete Attractive” (Edited by: Balázs L. Gy.; Borosnyói A.), Budapest, Hungary, May 23-25, 2005, pp. 1156-1163. ISBN: 963-420-839-8
- [12] Lublőy, É., Balázs, L. G., Czoboly O. A.: Influence of particular components of concrete composition to residual compressive strength after temperature loading, The 9<sup>th</sup> Central European Congress on Concrete Engineering (Editors: Biliszczuk, J., Bien, J., Hawryszków, P., Kaminski, T.), Wroclaw, Poland, 2013, September 4-6, pp. 320-323, ISBN 978-83-7125-229-7
- [13] EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design, CEN, Brussels, 2004.
- [14] Bicanic, N., Zhang, B.: Residual Fracture Toughness of Normal- and High-Strength Gravel Concrete after Heating to 600 °C, ACI Materials Journal, Vol. 99, No 3, 2002.
- [15] Schneider, U.: Properties of Materials High Temperature, Concrete, 2nd Edition, Kassel, RILEM Technical Comitee 44-PHT, Technical University of Kassel, 1986.
- [16] Comité Euro-International du Béton (CEB) Bulletin D'Information Number 208: Fire design of concrete structures, 1991

- [17] Fehérvári, S., Nehme, S. G.: Effect of method and speed of cooling down on the residual compressive strength of concrete, PROTECT 2009 Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading Shonan Village Center Hayama, Japan August 2009
- [18] Winterberg, R., Dietze, R.: Efficient passive fire protection systems for high performance shotcrete, Proceeding for the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Cairns, Australia, October, 2004 ISBN: 0415358981
- [19] Eligehausen R., Hofacker I., Lettow S.: Fastening technique – current status and future trends, International Symposium on Connections between Steel and Concrete, Volume One, Stuttgart, Germany, 2001, pp. 11-27.
- [20] Eligehausen R., Mallée R., Silva J. F.: Anchorage in Concrete Construction, Ernst&Sohn 2006, ISBN: 978-3-433-01143-0
- [21] Eligehausen R., Cook, A. R., Appl, J.: Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors, ACI Structural Journal, November-December 2006, pp. 822-831.
- [22] Fuchs, W., Eligehausen, R., Breen, E. J.: Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, ACI Structural Journal, January-February 1995, pp. 73-94.
- [23] Eligehausen, R., Ožbolt, J.: Size Effect in Design of Fastenings, Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures (Edited by: Pijaudier-Cabot, G., Bittnar, Z., Gérard, B.), HERMES Science Publications, Paris, 1999, pp. 95-118. ISBN 2-86601-729-3
- [24] Bažant, Z. P.: Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 110, No. 4, April 1984, pp. 518-535
- [25] ACI Committee 349: Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-85), American Concrete Institute, Detroit, 1985
- [26] Comité Euro-International du Béton (CEB): Fastenings to Concrete and Masonry Structures: State-of-the-art report. Bulletin D'Information No. 216, Lausanne, published by Thomas Telford Services Ltd, London, 1994.
- [27] *fib* MODEL CODE 2010, 2013 Concrete to steel. pp. 183-189.  
ISBN: 978-3-433-03061-5
- [28] *fib* BULLETIN 58: Design of anchorages in concrete, 2011, ISBN: 978-2-88394-098-7
- [29] prEN 1992-4 Eurocode 2 Design of concrete structures - Part 4 Design of fastenings for use in concrete, European committee for standardization, CEN/TC 250, Brussels, FprPREN 1992-4:2015
- [30] ETAG 001: Guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete, EOTA, Avenue des Arts 40 Kunsiaan, B – 1040 Brussels, 2013
- [31] Ožbolt, J., Kožar, I., Eligehausen, R., Periskic, G.: Transient Thermal 3D FE Analysis of Headed Stud Anchors Exposed to Fire, Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?, (Edited by: Gambarova G. P., Felicetti R., Meda A., Riva P.), Milan, Italy, December 2-3, 2004, pp. 185-198.
- [32] Reick, M.: Brandverhalten von Befestigungen mit großen Randabstand in Beton bei zentrischen Zugbeanspruchung, Mitteilungen des Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Band 2001/4, Stuttgart, IWB, Universität Stuttgart, 2001
- [33] Lakhani, H., Hofmann, J.: A Numerical Method to Evaluate the Pull-Out Strength of Bonded Anchors Under Fire, 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete

(Editors: Sharman, A., Hofmann, J.), Stuttgart, Germany, 27-29 September 2017, pp. 1079-1090.  
ISBN 978-3-945773-06-2

- [34] EAD 330087-00-0601: Systems for post-installed rebar connections with mortar, EOTA, Draft 2015
- [35] Reichert, M., Thiele, C.: Qualification of Bonded Anchors in Case of Fire, 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete (Editors: Sharman, A., Hofmann, J.), Stuttgart, Germany, 27-29 September 2017, pp. 1091-1099. ISBN 978-3-945773-06-2
- [36] Lublóy, É, Balázs, G. L.: Behaviour of expansion and bonded anchors subjected to elevated temperatures. In Second International Symposium on Connections between Steel and Concrete, 2007, Stuttgart, Germany: fib Proceedings, pp. 329-338.  
ISBN-10: 3-89821-807-4
- [37] Sharman, A., Bošnjak J.: Residual Tensile Capacity of Post-Installed Anchors after Exposure to Fire, 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete (Editors: Sharman, A., Hofmann, J.), Stuttgart, Germany, 27-29 September 2017, pp. 1270-1279. ISBN 978-3-945773-06-2
- [38] Bamonte P. F., Bruni M., Gambarova P.G.: On the application of fracture mechanics to undercut fasteners installed in thermally-damaged concrete, *Befestigungstechnik Bewerungstechnik und ... II (Rolf Eligehausen zum 70. Geburtstag)* (Edited by: Fuchs W, Hofmann J.), Stuttgart 2012, pp. 79-93. ISBN-13:978-3-8382-0397-3
- [39] Bamonte P. F., Gambarova P. G., D'agostino L.; Genoni A.: Preliminary pull-out test on post-installed mechanical fasteners embedded in thermally-damaged concrete, *Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?*, (Edited by: Gambarova G. P., Felicetti R., Meda A., Riva P.), Milan, Italy, December 2-3, 2004, pp. 199-207.
- [40] Bamonte P. F., Gambarova P.G., Bruni M., Rossini L.: Ultimate Capacity of Undercut Fasteners Installed in Thermally-Damaged High-Performance Concrete, *Proc. 6th Int. Conf.on Fracture Mechanics of Concrete Structures – FraMCoS-6*, Catania (Italy), June 18-21, 2007.
- [41] EN 12390-3:2009 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens
- [42] ISO 834-1: Fire-resistance Tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements, 1999.
- [43] *fib BULLETIN 38 : Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling*, 2007, ISBN: 978-2-88394-078-9



Hlavička Viktor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and  
Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

[hlavicka.viktor@epito.bme.hu](mailto:hlavicka.viktor@epito.bme.hu)

ORCID: 0000-0001-5435-4400

Dr. Lublós Éva PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and  
Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

[lubloy.eva@epito.bme.hu](mailto:lubloy.eva@epito.bme.hu)

ORCID: 0000-0001-9628-1318