

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

BETONANYAGÚ SZERKEZETEK TŰZÁLLÓSÁGA

dr. Majorosné dr. Lublós Éva Eszter

2021

TARTALOMJEGYZEK

I. Bevezet6s, el6zm6nyek

II. C6lkit6z6sek, alkalmazott kutat6si m6dszerek

III. 6j tudom6nyos eredm6nyek

1. t6zis: Az el6regy6rt6sban haszn6lt betonok sz6ks6ges fels6 szil6rds6gi korl6tj6nak igazol6sa a szerkezetek t6z6v6delmi teljesit6k6pes6ge szempontj6b6l
2. t6zis: Vasbeton szerkezetek t6zeset ut6ni vizsg6latakor alkalmazhat6 6j 6llapot-meghat6roz6si m6dszer a CT felhaszn6l6s6val
3. t6zis: K6s6rleti eredm6nyeimen alapul6 m6dos6tott formul6k a kapcsolati szil6rds6g 6s a nyom6szil6rds6g 6sszef6gg6s6re az 500 – 800 6C h6m6rs6kleti tartom6nyban
4. t6zis: A sz6lgeometria hat6s6nak k6s6rleti igazol6sa a sz6ler6s6t6s6 betonok t6z6ll6s6g6ra
5. t6zis: A portlandcementek h66rz6kenys6g6t befoly6sol6 t6nyez6k meghat6roz6sa

IV. A t6zisek t6mak6r6ben megjelent publik6ci6k jegyz6ke

V. Hivatkozott irodalom

I. BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK

Tűz által okozott katasztrófák sorozata hívta fel a mérnökök figyelmét arra, hogy a tűzhatás következményeinek ismerete elengedhetetlen, hiszen emberéletek múlnak rajta, mindezek mellett jelentős anyagi kár is keletkezhet. *A szerkezetek tűz alatti és utáni állékonyságát* – beleértve a stabilitását is – jobban tudjuk biztosítani, ha pontos ismereteink vannak a tűz hatásáról.



a) Paneltűz Debrecen, 2007. 02. 26. [1]



b) Családi ház tüzesete, 2014. 07. 27. [1]



c) Budapest Sportcsarnok, 1999. 12. 15. [1]



d) *Lángoló Fáklya*, Dubai, 2015. 02. 11. [2]



e) Alagút tűz, 2011. 07. 12. [3]



f) Liverpoli garázs tűz, 2017.12. 31 [4]



g) Liverpoli garázs tűz, 2017.12. 31 [4]

1. ábra: Tüzesetek

A *1. 6br6n* n6h6ny ismert t6zeset k6p6t gy6jt6ttem 6ssze. A felv6teleken j6l l6tszik a t6zeset ut6n az adott 6p6letek, 6p6tm6nyek jelent6s m6rt6k6 k6rosod6sa. A t6zvedelem feladata egyr6szt, hogy az 6p6letek *t6z alatti 6ll6konys6g6t meghat6rozott ideig biztos6tsa*, amire az6rt van sz6ks6g, hogy a benne tart6zkod6k biztons6ggal ki tudjanak menek6lni, m6sr6szt, hogy az 6p6letszerkezetekben a lehet6 legkisebb k6r keletkezzen. M6rn6ki szempontb6l ugyanis szint6n fontos k6rd6s, hogy az 6p6leteket, 6p6tm6nyeket egy esetleges t6zhat6s ut6n, hogyan *tudjuk helyre6ll6tani*. Mindk6t esetben fontos, hogy az 6p6t6anyagok nagy h6m6rs6kleten val6 viselked6s6t megismerj6k, valamint a t6z ut6ni anyagvizsg6latokkal lehet6v6 tegy6k a k6rosodott szerkezetek vizsg6lat6t a k6s6bbi rekonstrukci6 c6lj6b6l [5].


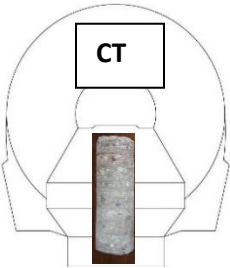
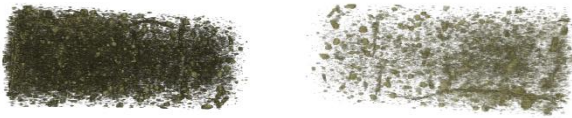
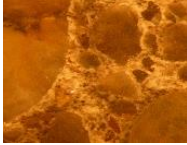


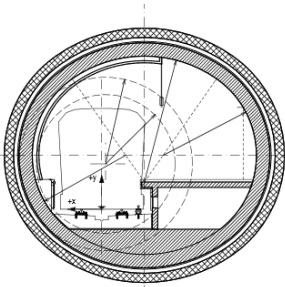


II. CÉLKITŰZÉSEK, ALKALMAZOTT KUTATÁSI MÓDSZEREK

Eddigi kutatásaim során a vasbeton szerkezetekben nagy hőmérséklet hatására létrejövő változásokat követtem nyomon [5,6].

A jelenlegi kutatásom céljai (2. ábra):

- Annak igazolása, hogy az előregyártásban használt betonból készült szerkezetek tűzvédelmi teljesítőképességének javításához elő kell írni a beton *szilárdságának felső korlátját* (**1. tézis**).
- Olyan *új anyagvizsgálati módszer (CT)* kidolgozása, amelynek segítségével a vasbeton szerkezetek tűz után a rekonstrukciója könnyebbé válhat (**2. tézis**).
- A *beton nagy hőmérséklet okozta tapadószilárdság-változásának* megismerése és modellezése (**3. tézis**).
- A betonok, azon belül is a *szálerősítésű betonok nagy hőmérséklet* alatti viselkedésének megismerése (**4. tézis**).
- A *cementfajta hatásának* megismerése a beton *hőterhelés után maradó szilárdsági tulajdonságaira* (**5. tézis**).

Kutatásaim és azok eredményei laboratóriumi vizsgálatokhoz kapcsolódnak. Téziseimben a kísérleti eredmények értékelését és mérnöki *kiterjesztését*, illetve *alkalmazását*, továbbá az eddig szokásostól eltérő, általam javasolt *megközelítési, megoldási módszereket* adom meg, ezeket tekintem új eredményeknek. Az értekezésben a tűzhatás után bekövetkező állapottal foglalkozom. Ez az állapot a *beton nyomószilárdsága szempontjából kedvezőtlenebb, mint a tűzterhelés alatti állapot, bár az acélbetétek szilárdsága és az alakváltozások szempontjából kedvezőbb* [5]. A téziseim egy része a 2016-ban sikeresen megvédett habilitációs dolgozatomban már szerepelt.

TUDOMÁNYTERÜLETEK		Tudományos eredmények
<p>Az előregyártásban használt betonok <i>szükséges felső szilárdsági korlátjának meghatározása</i> a szerkezetek tűzvédelmi teljesítőképessége növelése érdekében</p> 		1. tézis
	<p>Vasbeton szerkezetek tüzeset utáni vizsgálatokor alkalmazható <i>új állapot-meghatározási módszer a CT felhasználásával</i></p> 	2. tézis
<p>a) próbatest a CT-ben</p>	<p>b) adalékanyagváz</p>	<p>c) pórus rendszer</p>
<p>Kísérleti eredményeimen alapuló <i>módosított formulák a kapcsolati szilárdság és a nyomószilárdság összefüggésére az 500 – 800 °C hőmérsékleti tartományban</i></p> <p>adalékanyag-cementkő</p>  <p>beton-betonacél</p>  <p>szálak-cementkő</p> 		3. tézis
<p>A <i>szálgeometria hatásának</i> kísérleti igazolása a szálerősítésű betonok tűzállóságára</p>   		4. tézis
<p>a) metro alagút</p>	<p>b) tűbing elem</p>	<p>c) magminta</p>
<p>A <i>portlandcementek hőérzékenységet</i> befolyásoló tényezők meghatározása</p>		5. tézis

2. ábra: A kutatás felépítése és a tézisek rendszere

II.1 Az el6regy6rt6sban haszn6lt betonok sz6ks6ges fels6 szil6rds6gi korl6tj6nak igazol6sa a szerkezetek t6z6v6delmi teljesit6k6pes6ge szempontj6b6l

Sz6mos szakirodalom foglalkozik a betonfel6let lev6l6s6nak k6rd6ses6vel [7, 8, 9] A nagyobb betonszil6rds6g 6ltal6ban nem cs6kkenti a teherb6r6st, de a t6zterherre val6 m6retez6skor komoly probl6m6t jelenthet. Az el6regy6rt6s sor6n a gy6rt6k a termel6s n6vel6se 6rdek6ben sokszor a tervezettn6l nagyobb betonszil6rds6got alkalmaznak.

A kutat6s sor6n k6t t6pus6 el6regy6rt6tt elemet: TT f6d6mpanelt (k6t darab) 6s egyr6teg6 falpanel-elemet (k6t darab) vizsg6ltunk. A vizsg6lat sor6n egy-egy etalonelemet (jelenleg gy6rt6sban lev6 elem) 6s egy-egy m6dos6tott, m6anyagsz6l adagol6s6 beton6sszet6tellet k6sz6tett elem t6z6all6s6gi hat6r6rt6k6t vizsg6ltunk.

II.2 Vasbeton szerkezetek t6zeset ut6ni vizsg6latakor alkalmazhat6 6j 6llapot-meghat6roz6si m6dszer a CT felhaszn6l6s6val

A t6z ut6ni fel6j6t6s m6dj6nak tervez6sek6r az egyik legfontosabb feladat az 6p6tm6ny k6rosod6si m6rt6k6nek meghat6roz6sa. Ez szorosan 6sszef6gg a szerkezet t6z alatti legmagasabb h6m6rs6klet6vel 6s a t6zhat6s id6tartam6val. Amennyiben az 6p6let fel6j6t6sa szemrev6telez6s alapj6n sz6ba j6het, akkor a roncsol6smentes vizsg6latakat r6szes6tj6k el6nyben. Ennek 6rdek6ben egy olyan 6j vizsg6lati m6dszert dolgoztam ki, mely a t6z k6rosult vasbeton szerkezet6 6p6tm6nyek eset6n alkalmazhat6.

A m6dszer alapja, hogy a h6terhel6s hat6s6ra a beton porozit6sa n6, tests6r6s6ge cs6kken, amit CT berendez6ssel nyomon tudunk k6vetni. Vizsg6lataimat k6t szakaszban v6geztem el.

Az els6 szakaszban a CT m6r6seket ismert h6terhel6snek (tansz6ki kemence) kitett betonmint6kon (70*70*250 mm) v6geztem el, ebben az esetben a h6terhel6st elektromos kemenc6ben hajtottuk v6gre 6s a pr6batesteket k6l6nb6z6 (6t elt6r6) konstans h6m6rs6klettel h6terhelt6k, 6gy biztos6tva a pr6batestek egyenletes 6tmeleged6s6t. A h6terhel6s ut6n meghat6roztuk a pr6batestek nyom6szil6rds6g6t (50 mm 6tm6r6j6, 100 mm magas hengerek6n), hajl6t6-h6z6szil6rds6g6t (70*70*250 mm m6ret6 has6bok6n) 6s a tests6r6s6g6t; valamint CT m6r6s seg6ts6g6vel a Hounsfield-6rt6ket (amely ar6nyos a tests6r6s6ggel) 6s a porozit6s eloszl6s6t.

A m6sodik szakaszban t6zterhel6snek kitett nagyelemekb6l (falpanelem) vett furatmagmint6kat vizsg6ltunk, az elektromos kemenc6ben h6terhelt mint6kkal ellent6tben, ezek a mint6k r6tegesen melegedtek 6t, 6gy a k6l6nb6z6 r6tegek, k6z6tti k6l6nb6s6geket tudtuk megvizsg6lni. A CT felv6telek alapj6n meghat6roztuk az egyes szeleteken m6rt 6tlag Hounsfield-6r6keket, amit 6sszef6gg6sbe hoztam a k6rosod6s m6rt6k6vel.

II.3 K6s6rleti eredm6nyeimen alapul6 javaslat a kapcsolati szil6rds6g 6s a nyom6szil6rds6g 6sszef6gg6s6re az 500 – 800 6C h6m6rs6kleti tartom6nyban

Kev6s szakirodalmi adat [10, 11, 12, 13] 6ll rendelkez6sre *a* h6terhel6s hatás6ra a beton 6s betonac6l tapad6s6nak v6ltoz6sr6l, pedig a tapad6szil6rds6g v6ltoz6s6t a sz6ks6ges lehorgonyz6si hossz sz6m6t6s6hoz ismern6nk kell. A k6t anyag k6z6tti egy6tt6dolgoz6s v6ltoz6sa nemcsak a teherb6r6st, hanem a reped6sek alakul6s6t 6s jelleg6t is befoly6solja [14]. Kor6bbi kutat6saink sor6n megvizsg6ltuk a beton-betonac6l tapad6s6nak alakul6s6t a h6terhel6st, majd leh6l6st k6vet6en. Tekintettel arra, hogy a PhD kutat6somban a 400 6C 6s 500 6C k6z6tti jelent6s kapcsolati szil6rds6g-cs6kken6st nem tudtam egy6rtelm6en megindokolni, ez6rt a k6plet m6dos6t6s6val k6s6bbi kutat6saim sor6n 6jb6l foglalkoztam. Ezek alapj6n meg6llap6tottam, hogy a 400 6C 6s 500 6C k6z6tti jelent6s szil6rds6gcs6kken6st a portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) boml6sa 6s ez6ltal a k6miai k6t6s megsz6n6se magy6r6zza.

A legt6bb, a tapad6szil6rds6g magas h6m6rs6kleten val6 alakul6s6t le6r6 modell komoly hi6nyos6ga, hogy a betonban lej6ts6z6d6 k6miai 6s fizikai 6talakul6sokat okoz6 h6m6rs6kleteket ugyan figyelembe veszi, de nem helyesen, 6gy v6lem6nyem szerint nem ad pontos eredm6nyt, ez6rt egy 6j modell fejleszt6s6t t6ztem ki c6lul, amely a k6miai folyamatokat is megfelel6en figyelembe veszi.

A k6s6rleti eredm6nyek alapj6n v6geselemes modellt is k6sz6t6tt6nk a beton-betonac6l tapad6s6nak numerikus modellez6s6re, hogy lehet6v6 v6ljon – k6s6rletek n6lk6l – m6s 6tm6r6j6 betonac6lok numerikus vizsg6lata is. A numerikus anal6zishez az ANSYS 15 nemline6ris v6geselemes szoftvert haszn6ltunk. A sz6m6t6s k6t k6l6n6ll6 r6szb6l tev6dik 6ssze. Az els6 r6szben az id6 f6ggv6nyben a pr6batest h6vezet6s6t modellezt6k (termikus modell), majd ezekhez az eredm6nyekhez t6rs6tva a m6sodik r6szben a pr6batest statikus terhel6se is megt6rt6nt (statikus modell). A modell geometriai m6retei k6vett6k a labor6t6riumi 6ssze6ll6t6s m6reteit, viszont a futtat6si id6 cs6kken6t6se 6rdek6ben egysz6r6s6t6sre volt sz6ks6g. A pr6batest modellez6s6n6l –kihaszn6lva a szimmetri6t – csak a labor6t6riumi vizsg6latokn6l haszn6lt keresztmetszet nyolcad6t modellezt6k, ahol h6rom k6l6nb6z6 anyagot defini6ltunk: ac6lt, betont 6s a kapcsolati z6n6t.

A beton 6s a betonac6l k6z6tti egy6tt6dolgoz6s vizsg6lat6ra egy mm vastags6g6 kapcsolati z6n6t vett6nk fel. A statikus teher eseten a vizsg6lt elem fix megt6maszt6sa az elem pal6stj6n t6rt6nt, a teher (elmozdul6s) az ac6lelem pal6stj6n hatott.

A sz6m6t6sok sor6n t6bb, k6l6nb6z6 id6pontban ind6tott elmozdul6s teherrel is sz6moltunk (0. perc, 10. perc, 20. perc, 30. perc, 40. perc, 50. perc), hogy megtudjuk, hogyan viselkedik a pr6batest k6l6nb6z6 h6m6rs6kleteken. A terhel6s teljes id6tartama ekkor is 60 perc volt, ugyan6gy, mint a termikus anal6zis eseten.

II.4 A sz6lgeometria hatás6nak k6s6rleti igazol6sa a sz6ler6s6t6s6 betonok t6z6ll6s6g6ra

A beton6sztat6tel jelent6s m6rt6kben befoly6solhatja a beton t6z6ll6s6g6t. A m6anyagysz6lak 6s azon bel6l is a polipropil6n-sz6lak kedvez6en befoly6solj6k a betonfel6letek lev6l6s6nak elker6l6s6t [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. A szakirodalom az ac6lsz6lakat kedvez6tlennek tekinti, amit az ac6l t6z alatti viselked6s6vel, illetve az ac6l h6vezet6k6pe6s6g6vel magyaranak. Sz6mos szakirodalmi adat 6ll rendelkez6sre ac6l-, illetve m6anyagysz6lak t6z6ll6s6gra gyakorolt hatás6r6l, de a sz6lak geometri6j6nak hatás6r6l nem tal6lhat6 elegend6 kutat6si eredm6ny. A sz6lak geometri6j6nak azonban hat6sa lehet a t6z6ll6s6gra, ez6rt fontos ennek ismerete. Felmer6l a k6rd6s, hogy mennyiben befoly6solja a sz6l geometri6ja 6s mennyiben a sz6l anyaga a t6z alatti elt6r6 viselked6st?

A sz6l anyag6nak 6s geometri6j6nak hatás6t 6t k6l6nb6z6 sz6lt6pus ugyanazon betonkever6khez val6 adagol6s6val vizsg6ltuk. A betonhoz k6tf6le m6anyagysz6lat: „sz6l 1” $\ell=18$ mm, $d=0,032$ mm, egyenes; „sz6l 2” $\ell=40$ mm, $d=1,1$ mm, hull6mos; h6romf6le ac6lsz6lat: „sz6l 3” $\ell=35$ mm, $d=0,9$ mm, hull6mos; „sz6l 4” $\ell=35$ mm, $d=0,75$ mm, kamp6s v6g6; „sz6l 5” $\ell=12,5$ mm, $d=0,3$ mm, egyenes adagoltuk. A k6s6rlet sor6n h6l6pcs6nk6nt (20 6C, 50 6C, 150 6C, 200 6C, 300 6C, 400 6C, 500 6C, 600 6C, 800 6C) 3-3 pr6batestet vizsg6ltunk. Vizsg6latok sor6n a pr6batesteket szemrev6telezt6k 6s meghat6roztuk a marad6 nyom6szil6rds6got.

A betonszil6rds6g 6s a m6anyagysz6lak a beton t6z6ll6s6g6ra gyakorolt hatás6t h6rom k6l6nb6z6 szil6rds6g6 betonnal v6gez6t6k el. Mindegyik esetben k6sz6t6tt6nk etalont, azaz sz6ln6lk6li betont, mikro- 6s makro-m6anyagysz6l adagol6s6 kever6ket. Az alkalmazott cementt6pus mindegyik esetben CEM III/B 32,5 N L-(M-S)/ R volt. A mikrosz6lak esetén 1 kg/m³, makrosz6lak eset6ben pedig 4 kg/m³ sz6ladagol6st alkalmaztunk. A sz6lak anyaga mindk6t esetben polipropil6n volt. A mikrosz6lak hossza 18 mm, az 6tm6r6je 0,24 mm, a makrosz6lak hossza 42 mm, az 6tm6r6je 0,8 mm volt.

Kutat6sunkban laborleveg6n t6rolt, 150 6C-on, 300 6C-on, 500 6C-on 6s 800 6C-on h6terhelt szabv6nyos kocka 6s has6b pr6batestek eset6n m6rt6k a kocka pr6batestek nyom6szil6rds6g6t, a has6b pr6batestek hajl6t6- h6z6szil6rds6g6t, valamint az 6sszes pr6batestre jellemz6 l6tsz6lagos porozit6st.

II/5 A portlandcementek h66rz6kenys6g6t befoly6sol6 t6nyez6k meghat6roz6sa

A k6s6rlethez speci6lis 6sztat6tel6 6s k6l6nb6z6 6rl6si finoms6g6 cementeket alkalmaztunk. A cementeket a labor6t6riumban goly6smalommal 6r6lt6k. A cementek 6rl6si finoms6g6t Balin-k6sz6l6kkel ellen6rizt6k.

K6s6rleti param6terek6nt az al6bbiakat választottam:

- n6gyf6le cement (R-5088, R-5219, R-5092, R-5090),
- h6romfajta fajlagos fel6let (3500, 4000, 4500 cm²/g),

- 6tf6le maxim6lis h6m6rs6klet (20 C, 150 C, 300 C, 500 C, 800 C).

Kisz6m6tottam az alkalmazott cementek alum6n6t-modulus6t (AM), illetve szilik6t-modulus6t (SM). A Bouge-f6le sz6m6t6ssal meghat6roztam az adott cementek klinker6sv6ny-tartalm6t (f6k6pp a C₃A 6s a C₄AF ar6ny6t). A k6s6rletek sor6n megm6rt6k mind a n6gy cementfajta nyom6szil6rds6g6nak v6ltoz6s6t az 6rl6si finoms6g 6s a h6terhel6s maxim6lis h6m6rs6klete f6ggv6ny6ben.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis: Az előregyártásban használt betonok szükséges felső szilárdsági korlátjának igazolása a szerkezetek tűzvédelmi teljesítőképessége szempontjából [a, b]

A tervezettnél nagyobb betonszilárdság általában nem csökkenti a teherbírást, de a tűzterre való méretezéskor komoly nehézségeket jelent. Kísérletileg igazoltam, hogy az előregyártásban használt betonokra felső szilárdsági korlát bevezetése indokolt, a szerkezetek jobb tűzvédelmi teljesítőképessége érdekében. Az MSZ EN 1992-1-2 csak C80/90 beton-szilárdság felett írja elő – az egyébként nagyon hasznos – műanyagszálak alkalmazását. Kísérletileg igazoltam, hogy már ennél jóval kisebb betonszilárdság esetén, azaz C50/60 betonszilárdságnál és afelett, bekövetkezhet a betonfelületek réteges leválása, tehát ez a szilárdsági érték tekintendő felső szilárdsági korlátnak, ha nem alkalmazunk műanyagszálakat. A tűzállóság fokozására már C50/60 betonszilárdságtól javaslom, hogy a keverékhez mikro-műanyagszálakat adagoljunk. Ennek magyarázata, hogy a műanyagszálak alkalmazásával a betonfelület leválását csökkenteni tudjuk és ezzel a szerkezet tűzállósági határértéke (REI) jelentősen megnő (például C50/60 betonszilárdságú falpanel esetén REI 90-ről REI 120-ra).

TT födémelemek vizsgálatánál a gyártó által beszállított elemek a tervezett betonszilárdságot (C50/60) meghaladták (C60/75), ezzel átlépve a nagyszilárdságú betonok (MSZ EN 206, MSZ 4798) tartományába. Az MSZ EN 1992-1-2 ezen szilárdság (C60/75) esetén még nem írja elő kötelezően a műanyagszálak alkalmazást, csak C80/90 betonszilárdság felett, ennek ellenére a műanyagszálak (1 kg/m³ mikroszál) alkalmazásával a betonfelület leválásának mértékét jelentősen csökkenteni tudtuk, és ezzel a szerkezet tűzállósági határértékét 1,5-szeresére növeltük.

Az egyrétegű falpanel tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűzterri oldalán a betonfelület leválása mindkét esetben (etalon, mikro-műanyagszál taltalmú) szinte ugyanabban az időpontban kezdődött el, a lepatogzás mértéke a javított összetétellel készült elemek esetén jelentősen kisebb volt az etalonvizsgálatakor tapasztaltakhoz viszonyítva. A falpanel esetén a betonösszetétel módosítása (1 kg/m³ mikroszál adagolás) a tűzállósági határérték 33 %-os javulását eredményezi.

2. tézis: Vasbeton szerkezetek tűzeset utáni vizsgálatokor alkalmazható új állapot-meghatározási módszer a CT felhasználásával [c, d, e, f]

2.1 altézis: Egymástól független testsűrűség és a CT (komputer tomográfias) mérésekkel igazoltam, hogy egyenletes hőterhelés hatására bekövetkező változás – vagyis a leromlás – beton esetén 500 °C-os hőterhelés felett CT-vel jól kimutatható. A CT mérés előnye a laboratóriumi mérésekkel szemben, hogy a pórusok méretét és alakját térben láthatjuk,

illetve egy hosszadalmas labor6t6riumi m6r6st tudunk r6videbb 6s hat6konyabb m6r6sre cser6lni, azaz jobban, gyorsabban, olcs6ban lehet a k6rosod6s m6rt6k6t meghat6rozni.

A CT els6dlegesen s6r6s6gk6l6nbs6g kimutat6s6ra alkalmas m6dszer. A CT-vel m6rt Hounsfield 6rt6kek alakul6s6t 6s a labor6t6riumi tests6r6s6g m6r6s eredm6nyeit hasonl6tottam 6ssze. A h6terhel6s hatás6ra jelent6s 6s k6zel azonos m6rt6k6 v6ltoz6s volt megfigyelhet6 mind a CT-vel m6rt tests6r6s6ggel ar6nyos Hounsfield-6rt6kekben, mind a labor6t6riumban m6rt tests6r6s6g 6rt6kekben. Ezzel igazoltam, hogy a CT m6r6si m6dszer egy6rtelm6en alkalmas a h6terhel6s h6m6rs6klet6nek, 6gy a k6rosod6s m6rt6k6nek meg6llap6t6s6ra.

2. 2 alt6zis: Meg6llap6that6, hogy a h6terhel6s hatás6ra k6rosodott, t6z fel6li betonr6teg hat6ra CT m6r6ssel a szerkezetb6l kivett magmint6n meghat6rozhat6, f6ggetlen6l att6l, hogy hogyan k6vetkezett be a t6zterhel6s 6s a t6nkr6menetel.

CT felv6teleken elemeztem az egyes szeleteken m6rt 6t6lagos Hounsfield-6rt6keket 6s a hozz6 tartoz6 sz6r6st is. A Hounsfield-6rt6kekn6l hull6mz6st figyelhet6nk meg, ennek az az oka, hogy a szeletekben l6v6 adal6kanyag mennyis6ge (kavics) v6ltozik. A kiugr6 6rt6kek egy-egy betonac6l hely6t jelzik. A h6tehel6s hatás6ra a h6hat6shoz legk6zelebbi r6tegek Hounsfield-6rt6ke (s6r6s6ge) v6ltozott, 1700 HU-r6l 1615 HU-ra cs6kkent, ami k6zel6t6leg 85 kg/m^3 s6r6s6g v6ltoz6st jelent. A megv6ltozott s6r6s6g 6rt6k 6s a furat magminta elsz6nez6d6se is jelzi a beton jelent6s k6rosod6s6t. Itt eml6tem meg, hogy a beton elsz6nez6d6se nem minden esetben k6vetkezik be, ez6rt a sz6nelemz6s nem elegend6, viszont a s6r6s6g v6ltoz6sa egy6rtelm6en mutatja a k6rosodott r6sz hat6r6t6t.

Tekintettel arra, hogy bizonyos szerkezeti elemekn6l a betonfel6let r6teges lev6l6sa k6vetkezett be, ez6rt a porozit6s v6ltoz6sa mellett a reped6sk6pet is megvizsg6ltuk. Meg6llap6tottuk, hogy abban az esetben, ha nem tapasztalhat6 a betonfel6let robban6sszer6 lev6l6sa, akkor j6val kevesebb reped6s keletkezik, ez6rt a k6rosod6s m6rt6ke ugyan6gy kimutathat6 CT-vel.

3. t6zis: K6s6rlet6i eredm6nyeimen alapul6 m6dos6tott formul6k a kapcsolati szil6rds6g 6s a nyom6szil6rds6g 6sszef6gg6s6re az $500 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$ h6m6rs6klet6i tartom6nyban [g, h]

K6s6rlet6ileg igazoltam, hogy a kapcsolati szil6rds6g - nyom6szil6rds6g Model Code 2010 (MC2010) szerinti 6sszef6gg6se (annak 6.1.1 t6bl6zata) $400 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig k6terjeszthet6:

kvarckavics adal6kanyag6s beton eset6n:

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ 6s } 400 \text{ }^\circ\text{C} \text{ k6z6tt} \quad \tau_{b,\max} = 2,5f_{cm}^{0,5},$$

duzzasztott agyagkavics adal6kanyag6s beton eset6n:

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ 6s } 400 \text{ }^\circ\text{C} \text{ k6z6tt} \quad \tau_{b,\max} = 2,0f_{cm}^{0,5}.$$

K6s6rletileg igazoltam, hogy az 500 °C feletti tartom6nyban a beton 6s a bord6s betonac6l t6z6terhel6st k6vet6, marad6 kapcsolati szil6rds6ga a beton nyom6szil6rds6g karakterisztikus 6rt6k6nek f6ggv6ny6ben az MC2010 6sszef6gg6s6nek al6bbi, 6ltalam m6dos6tott form6j6val hat6rozhat6 meg:

kvarckavics adal6kanyag6s beton eset6n:

$$500 \text{ °C 6s } 800 \text{ °C k6z6tt} \quad \tau_{b,max}=2,5f_{cm}^{0,4},$$

duzzasztott agyagkavics adal6kanyag6s beton eset6n:

$$500 \text{ °C 6s } 700 \text{ °C k6z6tt} \quad \tau_{b,max}=2,0f_{cm}^{0,4}.$$

ahol: f_{ck} : a beton nyom6szil6rds6g6nak 6tlag 6rt6ke adott h6m6rs6kleten [N/mm²]

$\tau_{b,max}$: a tapad6szil6rds6g [N/mm²].

Szobah6m6rs6kleten a kapcsolati szil6rds6g 6s a beton nyom6szil6rds6ga k6z6tt 6sszef6gg6s 6rhat6 fel [26]. A kapcsolati szil6rds6g 6s a nyom6szil6rds6g h6nyadosa (κ) a h6m6rs6klet f6ggv6ny6ben a beton 6sszet6telt6l f6gg6en k6t egyenes-sereggel (20 °C 6s 400 °C, illetve 400 °C 6s 800 °C k6z6tt) 6rhat6 le. 400 °C felett a kapcsolati szil6rds6g jelent6sen lecs6kkent, ilyen m6rt6k6 cs6kken6s a nyom6szil6rds6g eset6n nem volt megfigyelhet6, ez6rt a kapcsolati szil6rds6g maximum6nak sz6m6t6s6ra adott k6pletet jelen t6zisben javasolt form6ban m6dos6tani kell. A k6pleteket helys6g6t a k6s6rleti eredm6nyek felhaszn6l6s6val a Pearson-f6le szorzatmomentum korrel6ci6s egy6tth6t6j6nak n6gyzet6nek elv6vel ellen6rizt6k ($R^2=0,95-0,98$ -ra ad6dott). Numerikus (v6geselemes) modellez6ssel igazoltam, hogy jelen t6zis szerinti, m6dos6tott kapcsolati szil6rds6g 6sszef6gg6ssel a beton-betonac6l k6z6tti kapcsolat j6l megadhat6.

4. t6zis: A sz6lgeometria hat6s6nak k6s6rleti igazol6sa a sz6ler6s6t6s6 betonok t6z6ll6s6g6ra [i, j, k, l]

4.1 alt6zis: A sz6ler6s6t6s6 betonok t6z6ll6s6g6ra a sz6lak mennyis6g6n (0,5 6s 1 V% k6z6tt) 6s anyag6n t6lmen6en a sz6lak geometriai jellemz6i is jelent6sen hatnak. K6s6rletileg igazoltam, hogy nagyszil6rds6g6 betonok eset6n a viszonylag nagy 6tm6r6j6 6s hosszú (makro) m6anyagysz6lak kedvez6tlenebbek, mint a kis 6tm6r6j6, r6vid (mikro) sz6lak. Az ac6lsz6lak alkalmaz6sakor is a kis 6tm6r6j6 6s r6vid mikrosz6lak kedvez6bbek a szakirodalomban kor6bban ismertetekkel szemben.

Kis 6tm6r6j6, r6vid ac6l- vagy m6anyagysz6lak alkalmaz6sa eset6n a 800 °C-os h6terhel6s eredm6nyek6nt sem figyelt6nk meg jelent6s elv6ltoz6st a beton fel6let6n. A sz6ladagol6s n6lk6l k6sz6lt betonok eset6n a 800 °C-os h6terhel6st k6vet6en fel6leti reped6sek jelentek meg.

Nagy 6tm6r6j6, hosszú m6anyag sz6lak a 200 °C 6s 300 °C-os h6terhel6s sor6n – a sz6lak megolvad6sa k6vetkezt6ben – a fel6let k6rosod6s6t okozt6k. A 300 °C-os h6terhel6st k6vet6en a beton fel6let6vel p6rhuzamosan elhelyezked6 sz6lak – 6g6snyomokat hagyva – a fel6leten ki6gtek. Nagy 6tm6r6j6, hosszú ac6lsz6lak alkalmaz6sa esetén a 800 °C-os h6terhel6s sor6n a sz6lak elfekedtek, 6s a beton helyenk6nt megrepedt.

A h6terhel6s ut6ni marad6 nyom6szil6rds6g szempontj6b6l a kism6ret6 (kis 6tm6r6j6, r6vid) mikro-ac6lsz6lak bizonyultak a legkedvez6bbeknek, nagym6ret6 (nagy 6tm6r6j6, hosszú) makro-ac6lsz6lak a legkedvez6tlenebbeknek. Ez is bizony6tja, hogy csup6n a sz6l anyag6nak ismerete nem elegend6 a sz6ler6s6t6s6 betonok t6z ut6ni viselked6s6nek meg6llap6t6s6ra, hanem a sz6l geometri6ja is fontos.

4.2. alt6zis: A m6anyagsz6l er6s6t6s6 betonok t6z6ll6s6g6ra a sz6lak mennyis6g6n (1 6s 4 V% k6z6tt) 6s anyag6n t6lmen6en a beton szil6rds6ga is jelent6sen hat. K6s6rletileg igazoltam, hogy a betonszil6rds6gt6l f6gg, hogy milyen alak6 sz6lak hat6konyabbak a t6z6ll6s6g n6vel6s6hez. Kisebb betonszil6rds6g (C16/20) esetén a makrosz6lak alkalmaz6sa javasolt a mikrosz6lak ellen6ben. Nagyobb szil6rds6g6 betonok (C40/50) esetén a makrom6anyagsz6lak haszn6lata egy6ltal6n nem javasolt, mert ezek a r6teges lev6l6st ugyan megakad6lyozt6k, de a nyom6- 6s hajl6t6-h6z6szil6rds6got jelent6sen cs6kkentik.

Sz6ler6s6t6s6 betonok eset6ben a mikro- 6s makrosz6lak is egy6r6nt hat6konynak bizonyultak a r6teges lev6l6s megakad6lyoz6s6ra. Minden pr6batest 800 °C-ig terhelhet6 volt a „spalling” megjelen6se n6lk6l. A fel6leti reped6sek a mikrosz6lak alkalmaz6sakor kevésb6 jelentek meg, mint a makrosz6lak esetén.

A m6anyagsz6l er6s6t6s6 betonok 20 °C-on m6rt 6tlagos nyom6szil6rds6ga minden betonmin6s6g esetén alacsonyabb volt, mint a sz6l n6lk6li etalon betonok6. A betonmin6s6g n6veked6s6vel a mikrosz6lak nyom6szil6rds6gi 6rt6kei a referencia beton 6rt6keihez konverg6ltak, m6g a makrosz6lakn6l folyamatos cs6kken6s volt megfigyelhet6, ez a C40/50 beton eset6ben drasztikusan, 40 %-kal cs6kkentette a beton szil6rds6g6t.

A sz6ler6s6t6s6 betonok hajl6t6-h6z6szil6rds6g 6rt6kei 20 °C-on, minden esetben alacsonyabbak voltak, mint a referencia beton6. A makrosz6lak C16/20 6s C25/30 betonmin6s6g eset6ben jobban teljes6tettek, C40/50 betonmin6s6gn6l a mikrosz6lak bizonyultak hat6konyabbnak. A h6m6rs6klet emelked6se minden t6pus6 betonn6l a hajl6t6-h6z6szil6rds6g cs6kken6s6t eredm6nyezte.

A sz6lak alkalmaz6sa minden esetben a poroz6t6s n6veked6s6t eredm6nyezi, a betonszil6rds6gt6l 6s a h6m6rs6kletr6l f6ggetlen6l, azonban a legnagyobb szil6rds6g6 beton (C40/50) esetén 500 °C--os 6rt6kekn6l a mikrosz6llal k6sz6tett pr6batestek kis m6rt6kben jobbnak bizonyultak az etalon betonhoz viszony6tva.

5. tézis: A portlandcementek hőérzékenységét befolyásoló tényezők meghatározása [m]

Kísérletileg igazoltam, hogy a cementek aluminát-modulusának és oxidos összetételének egyértelmű hatása van a cement tűzállóságára: az aluminát-modulus (AM) növekedésével nő a cementek tűzállósága. Az aluminát-modulus, illetve a C_4AF és C_3A klinkerásványok mennyisége között összefüggés van: a tűzállóság szempontjából a kis C_4AF és nagy C_3A tartalmú cementek a kedvezőek. A 800 °C -os hőterhelés feletti maradó szilárdságot nem befolyásolja az AM értéke. Az 500 °C és a 800 °C -os hőterhelésre a $4000\text{ cm}^2/\text{g}$ fajlagos felületű, $1,83$ aluminát-modulusú portlandcementek bizonyultak a legkedvezőbbeknek.

Megállapítottam, hogy a hőterhelés szempontjából az 500 °C és a 800 °C -os hőterhelés után is a $4000\text{ cm}^2/\text{g}$ fajlagos felülettel rendelkező cementek bizonyultak a legkedvezőbbnek. Itt meg kell jegyezni, hogy az őrlési finomság a kialakuló cementkő szilárdságát, porozitását és ezzel tömörségét befolyásolja. Fehérvári [27] kutatásai alapján a kis fajlagos felületű cementek viselkedtek a legkedvezőbben tűz esetén. Azonban kísérletileg igazoltam, hogy a tűzhatás (nagy hőmérséklet) szempontjából a túl nagy, túl kicsi cementszemcsék sem kedvezőek. A túl nagy szemcsék (alacsonyabb fajlagos felület) esetén ezt a kialakuló magas pórustartalommal lehet magyarázni, a kicsi szemcsék (magas fajlagos felület) esetén a tömött beton struktúrájával.

Az aluminát-modulus, illetve a C_4AF és C_3A klinkerásványok mennyisége között összefüggés van. Az aluminát-modulus csökkenésével egyidejűleg nő a C_4AF és csökken az C_3A ásványok száma. A tűzállóság szempontjából tehát a kis C_4AF és nagy C_3A tartalmú cementek a kedvezőek.

IV. A TZISEK TMAK6RBEN MEGJELENT PUBLIKCI6K JEGYZKE

- [a] Lubl6y, . (2019): Hogyan befolysolja a betonszilrdsg a tzll6sgi hatrrtket, Vdelem s tudomny, V. vfolyam, 4. szm, pp. 50-73.
- [b] Lubl6y, . (2020): How does concrete strength affect the fire resistance?, Journal of Structural Fire Engineering, Vol 11. Issue 3, pp. 311-324, <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2019-0035>.
- [c] Balzs, L. Gy., Lubl6y, ., Czoboly, O. (2014): Possible observations on concrete after high temperature loading, Zbornik Radova Gradevinskog Fakulteta Subotica / Proceedings of Faculty of Civil Engineering Subotica, Vol. 25, pp. 579-586.
- [d] Lubl6y, ., F6ldes, T., Balzs, L. Gy. (2011): Potentials in use of X-ray computer tomography, In: Balzs, L. Gy., Lubl6y, . (szerk.), Innovative Materials and Technologies for Concrete Structures, CCC2011, Balatonf6red, Magyarország, pp. 37-40, ISBN: 978-963-313-036-0.
- [e] Lubl6y, ., Balzs, L. Gy., Kapitny, K., Barsi, . (2017): CT analysis of core samples from fire-damaged concrete structures, Magazine of Concrete Research, Vol. 69, Issue15, pp. 802-810.
- [f] Lubl6y, ., Kapitny, K., Balzs, L., Gy., F6ldes, T., Hlavika, V., Hlavicka-Laczk, L. (2019): CT and laboratory test of the wall panels after fire load, Construction and Building Materials, Vol. 211, pp. 1105-1116, ISSN: 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.148>.
- [g] Lubl6y, ., Balzs, L. Gy. (2014): Temperature effects on bond between concrete and reinforcing steel, Zbornik Radova Gradevinskog Fakulteta Subotica / Proceedings of Faculty of Civil Engineering Subotica, Vol. 26, pp. 27-35.
- [h] Lubl6y, ., Balzs, L. Gy. (2012): Influence of high temperatures on bond, In: Cairns, J. W., Metelli, G., Plizzari, G. A. (szerk.), Bond in Concrete, Brescia, Olaszorszg, pp. 567-572, ISBN: 978-88-907078-1-0.
- [i] Majorosn Lubl6y . (2017): The Influence of Concrete Strength on the Effect of Synthetic Fibres on Fire Resistance, Periodica Polytechnica Civil Engineering , Vol. 62 Issue1, pp. 136-142.
- [j] Balzs, L. Gy., Lubl6y, . (2012): Post-heating strength of fiber-reinforced concretes, Fire Safety Journal, Vol. 49, pp. 100-106.
- [k] Balzs, L. Gy., Lubl6y, . (2010): Residual properties of fibre reinforced concrete after fire, CCC2009 Baden Proceedings, Baden, Ausztria, pp. 12-18.
- [l] Balzs, L. Gy., Lubl6y, . (2008): Residual compressive strength of fire exposed fibre reinforced concrete, In: 8th International Symposium on Utilization of High Strength and High Performance Concrete, Tokyo, Japn, pp. 785-790.
- [m] Lubl6y, . (2018): Heat resistance of Portland cements, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 132, pp. 1449–1457, <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7132-z>.

V. HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] www.langlovagok.hu, let6lt6s: 2015. 04.26
- [2] <http://mno.hu/kulfold/langolt-a-faklya>, let6lt6s: 2015. 04.26
- [3] <http://www.swissinfo.ch/eng/search>, let6lt6s: 2015. 04.26
- [4] <https://www.abc.net.au/news>, let6lt6s: 2019.12.30
- [5] Lubl6y, 6. (2016 a): Habilit6ci6s t6zisek, BME.
- [6] Lubl6y, 6. (2016 b): Sz6ler6s6t6s6 betonok alkalmaz6sa a t6z6vedelemben, V6delem 6s tudom6ny, I 6vfolyam 2. sz6m, 2016, pp. 518-535.
- [7] Hertz, K. D. (2003): Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, Issue 2, pp. 103-116, ISSN: 0379-7112, [http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6).
- [8] H6j, N., P. (2005): Fire Design of Concrete Structures, Proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, (edited by Gy. L. Bal6zs, A. Borosny6i), 23-25 May 2005, Budapest, pp. 1097-1105.
- [9] La Monte, F., Felicetti, R., Rossino, Ch. (2019): Fire spalling sensitivity of high-performance concrete in heated slabs under biaxial compressive loading, *Materials and Structures*, Vol. 52, Issue 14, <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1318-0>.
- [10] *fib* bulletin 46 (2008): Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment, ISBN: 978-2-88394-086-4.
- [11] Gambarova, P. G. (2004): Opening Addresses on Some Key Issues Concerning R/C Fire Design, Proceedings for Fire Design of Concrete Structures: What now?, What next?, edited by: P. G. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda, P., Riva, December 2-3, 2004.
- [12] Kordina, K. (1997): 6ber das Brandverhalten punktgesch6tzter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss f6r Stahlbeton, Heft 479, ISSN: 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997
- [13] MSZ EN 1991-1-2:2005 Eurocode 1: A tart6szerkezeteket 6r6 hat6sok. 1-2. r6sz: 6ltal6nos hat6sok. A t6znek kitett szerkezeteket 6r6 hat6sok.
- [14] *fib* bulletin 10 (2000): Bond of reinforcement in concrete, ISBN 2-88394-050-9.
- [15] H6j, N. P. (2005): Fire design of concrete structures, Proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, edited by Gy. L. Bal6zs, A. Borosny6i, 23-25 May 2005, Budapest: pp.1097-1105.
- [16] Janson, R., Bostr6m, L. (2004): Experimental investigation on concrete spalling in fire, Proceedings for Workshop on Fire Design of Concrete Structures: What now?, What next?, December 2-3, 2004, Milano, (Eds. P. G. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda, P. Riva), pp. 2-42.
- [17] Wille, K., Schneider, H. (2002): Investigation of fibre reinforced High Strength Concrete (HSC) under fire, particularly with regard to the real behaviour of polypropylene fibres, *Lacer* Nr. 7, pp. 61-70.
- [18] Dehn, F., Wille, K. (2004): Micro analytical investigations on the effect of polypropylene fibres in fire exposed high performance concrete (HPC), Proceedings of International RILEM

- Symposium on Fibre Reinforced Concretes, BEFIB, 2004, 20-22 September, Varrenna, Italy (Eds. Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G. A.), pp. 659-678.
- [19] Dehn, F., Werther, N. (2006): Fire tests on tunnel elements for M30 tunnel in Madrid (Brandversuche an Tunnelinnenschallenbetonen f6r den M30 Nordtunnel in Madrid), Beton und Stahlbetonbau, Vol. 101, Issue 9, Berlin, ISSN: 0005-9900 (in German).
- [20] Walter, R., Kari, H., Kusterle, W., Lindlbauer, W. (2005): Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire, Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering, 8-9 Sept. (Ed. Pauser, M.), Graz, pp. 54-59.
- [21] Silfwerbrand, J. (2005): Guidelines for preventing explosive spalling in concrete structures exposed to fire, Proceedings of Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib, 23-25. Mai 2005., (Eds. Bal6zs, L. Gy., Borosny6i, A.), ISBN: 963 420 837: pp. 1148-1156.
- [22] Dehn, F., K6nig, G. (2003): Fire resistance of different fibre reinforced high performance concretes, Proceedings of International Workshop High Performance Fibre Reinforced Cement Composites, (Eds. Naaman, A. E., Reinhardt, H., W.), pp. 189-204.
- [23] Horiguchi, T. (2004): Fire resistance of hybrid fibre reinforced high strength concrete, Proceedings of International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes, (Eds. Prisco, M., Felicity, R. Pizzeria, G. A.), pp. 1-18.
- [24] Horiguchi, T. (2005): Combination of Synthetic and Steel Fibres Reinforcement for Fire Resistance of High Strength Concrete, Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering, 8-9. Sept. 2005, (Ed.: Pauser, M.), Graz, pp. 59-64.
- [25] L6da, P. (2016): Sz6ler6s6t6s6 beton t6zzel szembeni viselked6se a sz6lak m6rete f6ggv6ny6ben, MSc-diplomamunka, BME 6p6t6anyagok 6s Magas6p6t6s Tansz6k.
- [26] MC2010: *fib* Model Code 2010 for Concrete Structures 2010, Wiley Ernst and Sohn 2013, ISBN: 978-3-433-03061-5.
- [27] Feh6rv6ri, S. (2009): Beton6sszetev6k hat6sa az alag6tfalazatok h6t6r6s6re, Phd 6rtekezés.