

VASBETONSZERKEZETEK TŰZ UTÁNI RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATI LEHETŐSÉGEI

A tartószerkezeteknek meghatározott ideig biztosítaniuk kell az épületek állékonyságát tüzeset során is. Tüzesetet követően vizsgálni kell, hogy a tartószerkezet rendelkezik-e az előírt statikai és tűzállósági teljesítménnyel. A felújítás kiindulásaként meg kell határozni az épületszerkezetek károsodásának mértékét, ami vasbetonszerkezeteknél szorosan összefügg a tűz hőterhelésével. Melyek az anyagvizsgálat lehetőségei és korlátai?

BEVEZETÉS

Az építményekkel és azok részeivel szemben támasztott általános elvárás, hogy feleljenek meg a rendeltetési, energiatakarékosági, élet-és egészségvédelmi, gazdaságossági, biztonsági és tűzvédelmi követelményeknek egyaránt.

Az építményszerkezeteknek a funkcionális szerepük (tartó-, térelhatároló, csapadékszáró-, stb.) mellett szolgálniuk kell a tűzvédelmi szempontokat is, ennek érdekében meg kell felelniük az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzat kiadásáról (továbbiakban: OTSZ) és az Építményszerkezetek tűzvédelmi jellemzői című Tűzvédelmi Műszaki Irányelv 11.2:20.01.22 (továbbiakban: TVMI)) vonatkozó követelményeinek.

A TVMI 1.4 szakasz előírása szerint az építményszerkezetek tűzvédelmi megfelelőségét az átalakítás körében és mértékében az építmény átalakítása, korszerűsítése, felújítása és helyreállítása során is minden esetben igazolni szükséges, függetlenül attól, hogy az igényel-e engedélyezési eljárást.

Jelen közleményünkben tárgyalt vasbeton építményszerkezetek – elsődlegesen a statikai és tűzvédelmi követelményeknek való megfelelés érdekében – tervezéssel kerülnek méretezésre, melynek fő paraméterei a szerkezet vastagság, a beton anyagminőség, az acélbetét mennyisége és a minimális betonfedése. Ez utóbbi felelős kiemelten a szerkezet tűzállóságáért.

1. A TŰZ KÁROSÍTÓ HATÁSAI A VASBETON SZERKEZETEKRE

Tűz hatására a vasbeton szerkezetek számos változáson mennek keresztül, amelynek hatása lesz a szerkezet viselkedésére, teherbírására. A szerkezet hőmérsékletének emelkedése és az

utána következő lehűlés során a következő változások vezethetnek a szerkezet teherbírásának csökkenéséhez (Balázs [et. al.] 2017):

- alakváltozás a hőmérséklet, illetve a terhelés hatására;
- a hossz- és keresztmetszetileg eltérő hőmérsékletváltozás;
- a levegő hőmérsékletének nemlineáris emelkedése;
- a cement és az adalékanyag eltérő hőtágulása;
- a beton és az acél szilárdságának változása;
- a beton és a betonacél eltérő hőtágulása.

A vasbeton szerkezetek tönkremenetele alapvetően a következő két okra vezethető vissza (Balázs, Lublós, 2009):

- a beton alkotóelemeinek kémiai és fizikai átalakulására,
- a betonfelület réteges leválására.

A károsodás mértéke szorosan összefügg a tűz alatti hőterheléssel, tehát elsődlegesen a tűz során kialakult maximális hőmérsékletet kell meghatározni.

Ennek megállapítását elősegíti, ha a különböző anyagok gyulladási hőmérsékletét, illetve olvadási hőmérsékletét ismerjük (1 táblázat). A táblázat segítségével az épületben lévő anyagok károsodás mértékéből következtetni tudunk az épületben kialakult legnagyobb hőmérsékletre.

Anyag	Gyulladási vagy olvadási hőmérséklet
ólom	327°C
papír	100°C
fa	300°C
alumínium	658°C
üveg	800°C
beton	1300°C
bazalt	1426°C
kerámia	1500°C
acél	1535°C
samott	1700°C

1. táblázat: Szilárd anyagok gyulladási, illetve olvadási hőmérséklete

2. A TŰZ KÁROSÍTÓ HATÁSAIT BEMUTATÓ ESETEK

A fejezetben néhány tüzeseti helyszínt mutatunk be, amelyek a vasbeton építményszerkezetek károsodását szemléltetik.



1. ábra: Élelmiszer áruház eladótere tüzeset után

Forrás:

http://www.hirado.hu/Hirek/2011/10/17/07/Szinte_teljesen_a_kiegett_CBA_arutere_fotok.aspx

Az 1. ábrán élelmiszer áruházban bekövetkezett tűz utáni állapotot láthatjuk. Az áruház 600 négyzetméteren leégett a tűz alatt. A képen jól látható, hogy az álmennyezet helyenként károsodott, a füsttől jelentősen elszíneződött, ennek ellenére az üzletben lévő papírdobozok nem égtek el, tehát a falak mentén a hőmérséklet nem érte el a 300 °C-ot. Természetesen az épület vizsgálata során le kell ellenőrizni, hogy a műanyagok égése során a vasbetonszerkezetbe nem jutott-e kloridion, de jelen esetben az épület az esetleges álmennyezet cseréje és egy festés után nagy valószínűséggel helyreállítható.



2. ábra: Panel lakóépület IX. emeleti lakásában keletkezett tűz helyszíne, 2020

Forrás: FKI Tűzoltósági Főfelügyelőség

A 2. ábrán látható tüzeset során a IX. emeleti panellakás nagyobbik szobájában, valamint előszobájában keletkeztek a legnagyobb mértékű károsodások. Mindkét helyiségben az ott lévő berendezések, tárgyak teljes mértékben megégték, ami hosszabb ideig tartó, intenzív szabadégésre utal. A maximális léghőmérséklet 800°C -ra, a födémeket is elérő láng hőmérséklet 1000°C -ra tehető. A bejárati ajtó kinyitásával, valamint az erkély felőli nyílászárók megsemmisülésével a kialakult huzat elősegítette ebben a két helyiségben az intenzív égés, és a nagyfokú károsodások kialakulását. A vasbeton fal- és födém szerkezeteken látható elszíneződés, valamint a födémeken a réteges leválás súlyos károsodásra utal, ami a födém statikai vizsgálatát, ennek nyomán a megerősítést tette szükségessé.



3. ábra: Mélygarázsban parkoló személygépkocsi tüzeseti helyszíne, 2017

Forrás: FKI Tűzoltósági Főfelügyelőség

A 3. ábrán bemutatott tüzeset során a Budapest II. kerületi lakóépület mélygarázsában álló BMW típusú gépjármű teljes terjedelmében égett. Az egész mélygarázs korommal szennyeződött. A műanyag elemek (csövek, armatúrák műanyag alkatrészei) megolvadtak. A vasbeton födém és pillér a gépkocsi melletti területen jelentősen károsodott, a motortér felett egybefüggő területről a betonfedés levált a betonacél-hálóról. A károsodás mértékét az $1200\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ -os láng hőmérséklet mellett a zárt tér, a födém közelsége és a hő- és füstelvezetés hiánya eredményezte.

Az ábrán jól látható, hogy a tűzben a gépkocsi minden éghető alkatrésze megsemmisült, az alumínium keréktárcsák megolvadtak, annak ellenére, hogy a padlószinten, a legalacsonyabb hőmérsékletű légrétegben helyezkedtek el.



4. ábra: Kozmetikai termékek raktárépületében keletkezett tűz helyszíne, 2009
 Forrás: FKI Tűzoltósági Főfelügyelőség

A 4. ábrán látható tüzeseti helyszínen Budapest IX. kerületében található raktáracsarnokban polcrendszeren kozmetikai termékeket tároltak mintegy 3000 m²-en. A tűz következtében a bent tárolt éghető anyagok nagyrészt megsemmisültek, a fém tároló állványok összeomlottak, deformálódtak. A vasbeton pillérek és gerendák károsodtak a kialakult kb. 800 °C hőmérséklet és a több mint 1 órán át tartó hőterhelés miatt. A hőterhelés mértéket csökkentette, hogy a hidegraktár fémlemez tetőszerkezete a tűz hatására beomlott, így a magas hőmérsékletű égéstermék, hő és füst a szabadba áramlott.

A bemutatott tüzeseteket követően a helyreállítás érdekében vizsgálatok elvégzése vált szükségessé a károsodás mértékének megállapítása és a vasbeton szerkezetek javítási eljárásának meghatározása céljából.

3. RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREI ÉS HASZNÁLHATÓSÁGUK TŰZKÁROSULT ÉPÜLETEKEN

A tüzeset során károsodott épület felmérésekor célszerű roncsolásmentes vizsgálatokat végzi, amennyiben lehetséges. A vizsgálatok során alkalmazható lehetőségekről a 2. táblázat ad áttekintést.

Betonfedés átlagos reakciója alapján	Pontonkénti kis minta	Speciális technológiák
Schmidt kalapács	Kisminta mechanikai	Impact echo

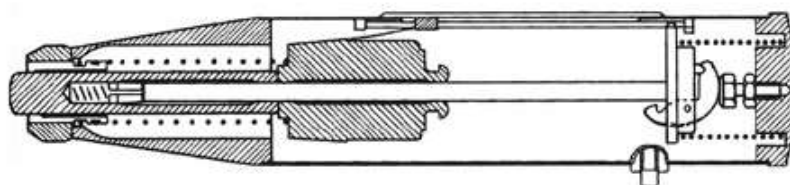
	vizsgálata	
Widsor próba	DTG	Hang-tomográf
Capo teszt	Dilatometria	MASW (felszínhullámok modál-analízise)
BRE belső törés	Thermolumineszcencia	Elektromos ellenállás-
Ultrahangos vizsgálat	Porozimetria	
Fúrasi ellenállás	Colorimetria	
	Mikrorepedés-sűrűség elemzés	
	Kémiai vizsgálatok	

2. táblázat: A roncsolásmentes vizsgálati módszerek áttekintése (fib bulletin 46)

3.1 Betonfedés átlagos reakciója alapján

3.1.1. Schmidt - kalapács

A beton felületi keménységmérésének legelterjedtebb eszköze a Schmidt-kalapács (5. ábra). A Schmidt-kalapácsos vizsgálatok során kapott visszapattanási értékek alapján a szerkezeti beton nyomószilárdságát tapasztalati összefüggések alapján becsüljük. A szerkezeti beton tényleges állapota (kor, nedvességtartalom stb.) és összetétele jelentősen befolyásolja a mért visszapattanási értékeket, ezért ezek figyelembevétele az eredmények értékelésének fontos lépése (Szilágyi, Borosnyói, 2008).



5. ábra: Schmidt-kalapács (Szilágyi, Borosnyói, 2008)

A beton felületi keménységmérésének napjainkban legelterjedtebb eszköze a Schmidt-kalapács. A vizsgálat elve, hogy a készülékben lévő rugó egy ütőtömeget mozgásba lendít, amely egy, a felületre merőleges ütőszondán keresztül, adott energiával megüti a vizsgált

felületet, és az ütés után az ütőtömeg visszapatánásának mértékét a készülék rögzíti. A visszapatánási érték (R) dimenzió nélküli szám: a mozgó tömeg ütés közben megtett útjának (x_0) és a visszapatánást követően megtett útjának (x_r) aránya százalékban kifejezve ($R=x_r/x_0 \cdot 100$). Ez egyben a felületi keménység mérőszáma.

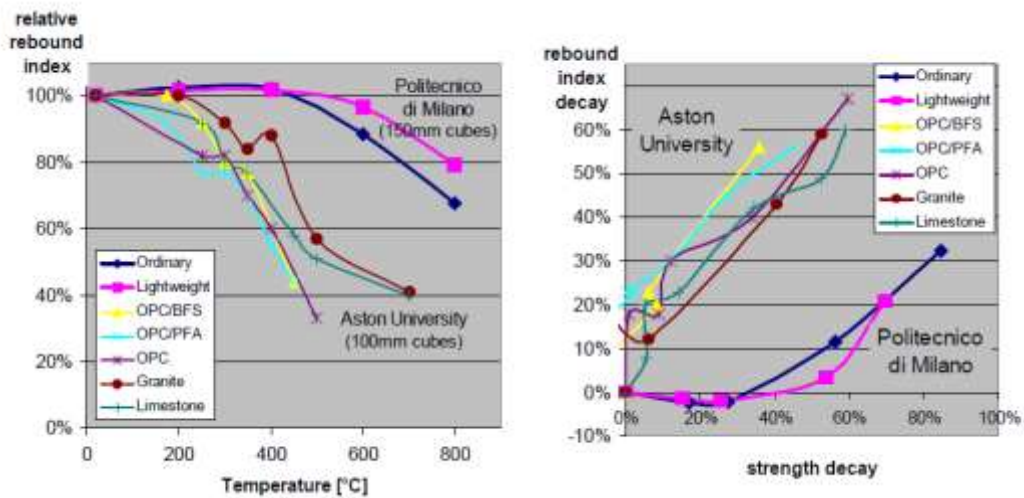
Azáltal, hogy az anyagok felületi keménysége és szilárdsága között empirikus összefüggés tételezhető fel, a rugalmas visszapatánás elvén működő eszköz segítségével a beton nyomószilárdsága becsülhető. A keménység értékéből a vizsgált anyagra jellemző, az ütésirányt is figyelembe vevő átszámítási táblázatból (diagramból) az anyag nyomószilárdságára is következtethetünk. A digitális változattal az ütésirány és a beton életkor korrekció automatikus, és az előzetesen lecsiszolt felületeken elvégzett 10-10 mérés átlagértékeivel – az előválasztással megjelölt átszámítási táblázat alapján – a készülék kijelzi a beton nyomószilárdságának legvalószínűbb értékeit is.

A Schmidt-kalapács nélkülözhetetlen eszköz, de ha csak ezzel mérünk, akkor az eredmények elsősorban a betonszerkezet egyes elemei szilárdsági homogeneitásának relatív szórásra alapozott (*Vértes, 2001*) megítélésére alkalmas.

A szilárdságra átszámított értékeket tájékoztató adatként kell kezelni. A beton szilárdsági (*MSZ 4720 szerinti*) minősítésekor a roncsolásmentesen, statisztikai értékeléssel meghatározott nyomószilárdság csak akkor tekinthető a szabványos hengeres próbatestek törővizsgálatával meghatározott szilárdság várható értékével azonosan megbízható adatnak, ha a Schmidt-kalapácsos mérés ultrahangos méréssel párosult (*Ódor, 2002*). A Schmidt-kalapáccsal mért R visszapatánási értéket, amelyet a keménységmérés környezetében elvégzett ultrahangos mérés figyelembevételével, a széleskörű, összehasonlító roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati adatbázisát hasznosítva lehet átszámítani szilárdságra (*Proceq*). A Schmidt-kalapács nem használható akkor, ha a beton felületkezelt (pl. vékonyan műgyantával) (*Ódor, 2002*) vagy részlegesen, hiányosan felületjavított (*Orbán, 2001*), ha a környezet hőmérséklete 5°C alatt, illetve 30°C felett van (a rugóállandó megváltozása okozta hiba) (*Vértes, 2001*), ha a beton felületi rétege megfagyott (*Mohácsi, 2004*). Ez már arra utal, hogy a hőterhelt beton estén is problémás lehet az alkalmazás.

A hőterhelt beton vizsgálata során a beton elasztikus és plasztikus alakváltozó képessége, a felület megváltozott porozitása, repedezettsége és a szabad víz távozása fontos szerepet játszanak a Schmidt-kalapáccsal történő mérés pontosságában. A Schmidt-kalapáccsal történő mérés megbízható eredményeket (*4. ábra*) szolgáltatathat, ha a beton szilárdságcsökkenése nem nagyobb 30-50%-nál. *A Schmidt-kalapácsot nem szabad azonban használni, ha a beton*

felülete jelentősen repedezett vagy a betonfelület réteges leválása következett be, vagyis mintegy 500°C-os maximális hőmérsékletig alkalmazható.



6. ábra: A Schmidt-kalapáccsal mért visszapatannási érték a hőmérséklet függvényében (fib bulletin 46)

3.1.2. Tapadószilárdság mérés

A tapadó szilárdság meghatározása akkor szükséges, amikor a betonszerkezet felületét védelem vagy megerősítés céljából bevonattal látják el, illetve, ha a károsodott felületet javítani kell, akkor a javítás előtt – mivel az eredeti felület húzószilárdságának ismeretében készítik elő a felületet a javítóréteg felviteléhez – majd ezt követően e réteg tapadási szilárdságát is ellenőrzik (Bindseil, 2002). Tekintettel arra, hogy a tűz által károsult beton, illetve vasbeton épületek esetén minden sok esetben szoba jön a felület bevonattal való ellátása, ezért a mérés lépését ismertetjük: az acél vizsgálóbélyeget a kétkomponensű ragasztóval – amelynek tapadási szilárdsága a vizsgálni kívántnál nagyobb – a beton magfúróval (a vizsgálni kívánt mélységnél 5 mm-nél mélyebbre) előfúrjuk, a kijelölt és megtisztított felületére felragasztjuk, majd a megszilárdulást követően a készülékkel húzóerőt működtetünk a réteg töréséig (7. ábra). A területegységre vonatkoztatott leszakító erő – a vizsgálat céljától függően – a beton felületi húzószilárdsága vagy a vizsgált réteg tapadó szilárdsága (Bindseil, 2002). Mivel ez a módszer csak közvetlenül a felső réteg szilárdságát méri, ezért ezt a módszert nem javasoljuk a tűzkárosult épületek vizsgálatára, de a rekonstrukció módjának megállapítására jó módszer. Amennyiben a beton károsodási mértékét is meg kell határozni megbízhatóbb eredményt szolgáltatnak a kihúzó erő mérésén alapuló módszerek.



7. ábra: Tapadószilárdság mérésre szolgáló eszközök

Forrás: http://www.minden-korr.hu/contents/muszereink_eszkozeink

3.1.3. Kihúzóerő mérése

3.1.3.1. Windsor próba

A Windsor próbával (8. ábra) történő mérés során egy belövő pisztoly segítségével egy 6,3 mm átmérőjű, 79,5 mm hosszú fém dübelt lönek be a betonba és a behatolás mélységét mérik. A behatolás mélységéből következtetni lehet a felületi keménységre, ami alapján megállapítható a beton szilárdsága. A műszer 20 N/mm² és 110 N/mm² közötti beton nyomószilárdság esetén alkalmazható. Tűzkárosult épületeken akkor is alkalmazható, ha a betonfelület réteges leválása bekövetkezett, ha a beton felülete elég sík maradt.

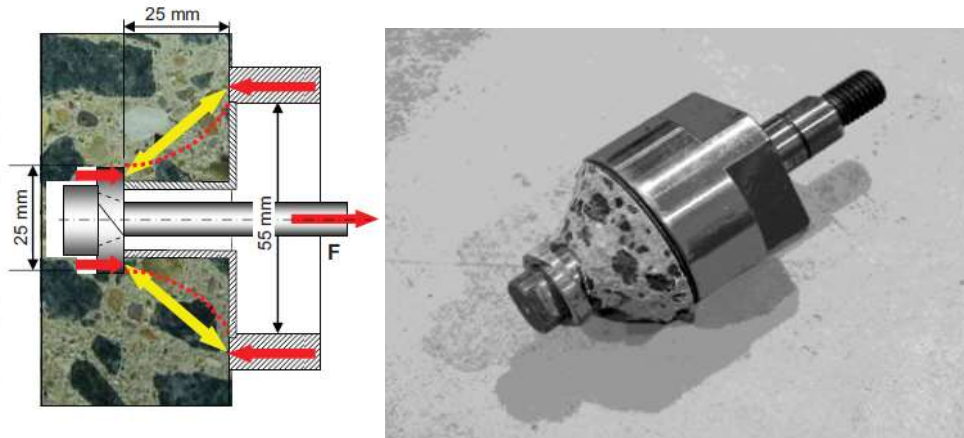


8. ábra: Windsor próbához használt készülék

Forrás: [https://www.ndtjames.com/News-releases_a/Redesigned Windsor Probe Press %20Release_a/295.html](https://www.ndtjames.com/News-releases_a/Redesigned_Windsor_Probe_Press_%20Release_a/295.html)

3.1.3.2. CAPO teszt

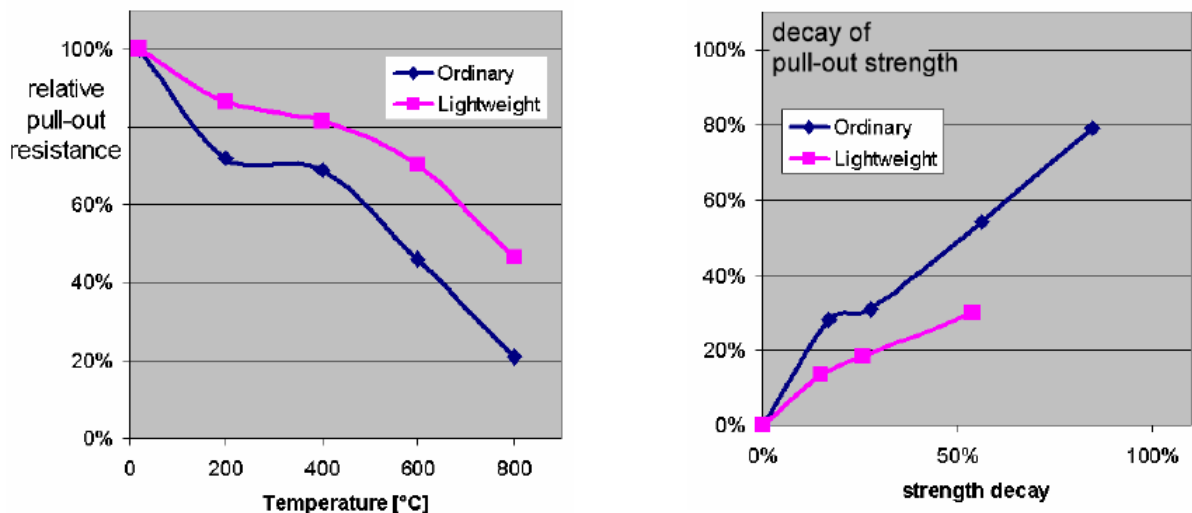
A CAPO teszt során egy alámetsző rögzítés technikai elemet rögzítenek a betonban, majd egy 55 mm átmérőjű gyűrűt helyeznek rá (9. ábra). A rögzítéstechnikai elemet elkezdik kihúzni és a kihúzóerőhöz tartozó erőt mérik. A kihúzóerőhöz tartozó maximális erő egyenesen arányos a betonszilárdsággal.



9. ábra: CAPO teszt működési elve

Forrás: <https://www.germann.org/TestSystems/CAPO-TEST/CAPO-TEST.pdf>

Tűzeset után a CAPO teszt a felső 10-15 mm-es réteg átlagos szilárdságának a becslésére alkalmas (10. ábra). A Windsor próbánál pontosabb adatokat szolgáltat a szakadó kúp méretei miatt.



10. ábra: A hőmérséklet és a CAPO teszt során mért összefüggések (fib bulletin 46)

3.1.3.3 BRE belső törés teszt

A vizsgálat során a próbatestbe 20 mm mélységben egy feszített dübelt rögzítenek. A dübel kihúzóadásához tartozó nyomaték kerül meghatározásra. Ez a módszer a CAPO teszthez hasonlóan a felső 10-15 mm szilárdságáról ad eredményeket. A CAPO teszt pontosabb eredményeket ad, mint a CAPO teszt, mivel a tönkremenetel sokkal kontroláltabb.

3.1.4 Betonoszkóp (ultrahangos vizsgálat)

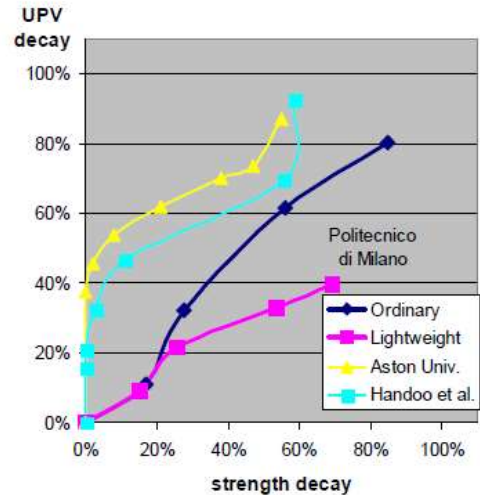
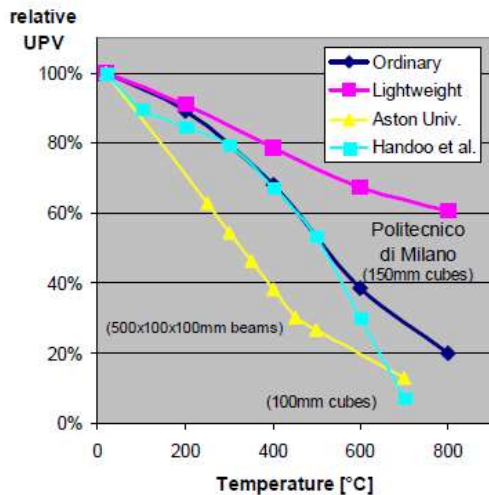
Az ultrahangos vizsgálat (11. ábra) olyan roncsolásmentes vizsgálo eljárás, amely a betonban haladó ultrahang-frekvenciás akusztikai hullám terjedési sebességének meghatározásán alapul. A longitudinális hullámimpulzus terjedési sebessége a betonszilárdság becslésére alkalmas mérőszám. A longitudinális hullám gerjesztése során az adót és a vevőt a beton ellentétes oldalához kell akusztikai csatolóanyag (pl.: gépszír) alkalmazásával illeszteni. A hullám terjedési sebességét (v) az adó és a vevőfej távolságának (s) és a hullámimpulzus mért terjedési idejének (t) hányadosából tudjuk számítani. A hullám terjedési sebességéből a betonszilárdság becslhető. A mérést direkt és indirekt módon (Cioni, Croce, Salvatore, 2000) is elvégezhetjük.



11. ábra: A betonoszkóp képe

Forrás: (<http://sdt.sulinet.hu/Player/Default.aspx?g=30b4fc34-89a4-4ad9-8cf6-e30529fbcc5b&cid=27ce789c-3af0-4df8-82f8-edeea421596b>)

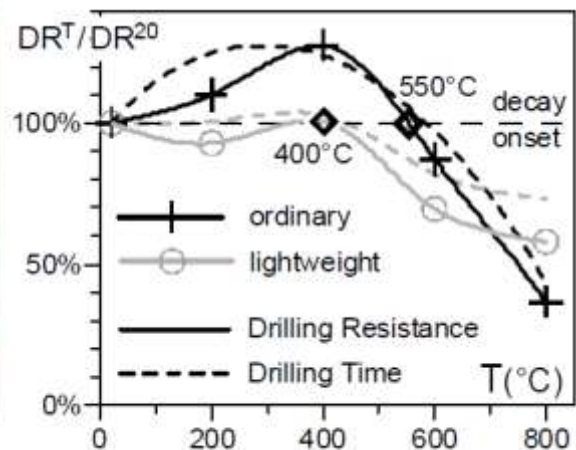
A betonoszkópot gyakran használják tűzkárosult épületek felmérésére, mivel a betonszilárdság és az ultrahang terjedési sebessége között egyértelmű összefüggés mutatható ki (12. ábra). Véleményünk szerint azonban, ha a beton felületén sok repedés található ez a mérés nem ad megbízható eredményeket.



12. ábra: Az ultrahang terjedési sebessége a hőterhelés függvényében (Felicetti, 2003)

3.1.5. Fúrási ellenállás mérése

A fúrási ellenállás mérésére egy átalakított fúrót használnak (13. ábra), ami méri az adott mélységig történő fúráshoz tartozó fúrási ellenállást (J/mm). A betonszilárdság és a fúrási ellenállás közti összefüggés nem adható meg egyértelműen, mert a nyomószilárdság számos más paramétertől is függ. Ezzel a módszerrel a tűz utáni károsodás mértékét lehet kimutatni. A mérés csak 70%-os szilárdság romlásig használható, ami mintegy 800 °C-os hőterhelést jelent.



13. ábra: A fúrási ellenállás mérésének módszerei (fib bulletin 46)

3.2. Poronkénti kisminta

3.2.1. Kisminta mechanikai vizsgálata

A legismertebb módszer a betonszilárdság meghatározására a magminta vizsgálat, ami ugyan nem számít roncsolásmentes vizsgálatnak, de a szerkezet kismértékű roncsolásával elég

megbízható eredményeket kaphatunk. A tűzkárosult szerkezetek esetén a szilárdságvizsgálat nem elegendő. A szilárdság vizsgálat előtt, a repedések felmérésén túlmenően, fel kell mérni a különböző réteghatárokat és azoknak a vastagságát, mivel a különböző szilárdságú rétegek törése nem ad megbízható eredményt a nyomószilárdság mérés során. Tehát önállóan nem alkalmas a nyomószilárdság meghatározására.

3.2.2. Derivatográfias vizsgálat

A derivatográfias módszer egy szimultán termoanalitikai módszer, mely egyidejűleg hoz létre TG (termogravimetriás), DTA (differenciál termoanalízis) és DTG (derivatív termogravimetriás) jelet. A minta kis mennyiségét megporítva, inert anyagú (korund vagy platina) tégelybe helyezve, kemencetérben egyenletes felfűtési sebességgel (ún. dinamikus üzemmódban) kiizzítjuk. Eközben analitikai mérleg méri a minta tömegében bekövetkező változásokat (TG-görbe), valamint termoelemek mérik a mintában bekövetkező entalpiaváltozásokat egy inert anyag kemencetérbeli hőmérsékletéhez képest (DTA-görbe). A TG-görbe első deriváltját, a DTG-görbét analóg módon állítja elő a készülék, mely a tömegváltozással járó folyamatok helyét és mértékét határozza meg a hőmérséklet skálán. A fenti három görbét, valamint a hőmérséklet (T, °C) jelet is tartalmazó, mérési idő (t min) függvényében felvett vizsgálati eredményt derivatogramnak nevezzük. A derivatogram megjeleníthető a hőmérséklet (T, °C) függvényében is (*Kopecskó, 2006*).

A tűzkárosult betonnál bizonyos átalakulások, már a hőterhelés miatt végbementek, ezért a derivatográfias vizsgálatok jó támpontot adnak a hőterhelés hőmérsékletére. Hibát jelenthet azonban az, hogy bizonyos átalakulások reverzibilisek pl. az égetett mész portlandittá való visszaalakulása

3.2.3. Dilatometria

A dilatométer, vagyis tágulásmérő a hőmérséklet hatására bekövetkező alakváltozásokat méri. Nagyon érzékeny dilatométer segítségével kimérhető a kvarc 571 és 573 °C közötti térfogatváltozása.

3.2.4 Thermolumineszcencia

Thermolumineszcencia a kristályok fényelnyelő képességén alapul. A különböző kémia változások hatására a kristályok fényelnyelő képessége megváltozik. A thermolumineszcencia során a hőmérséklet hatására bekövetkező változásokat mérik. A beton esetén a legtöbb változás 300 és 500 °C között következik be, ezért ez a mérés alkalmas lehet a betonra kifejtett hőmérséklet meghatározásának módjára.

3.2.5 Porozitás mérése

A hőmérséklet hatására a beton pórusrendszere és sűrűsége megváltozik. A hőmérséklet hatására bekövetkező pórusrendszer változás meghatározható. A pórustartalom és a sűrűségváltozását a Mercury poroziméterrel lehet meghatározni. A porozitás mérése elég drága, és bonyolult.

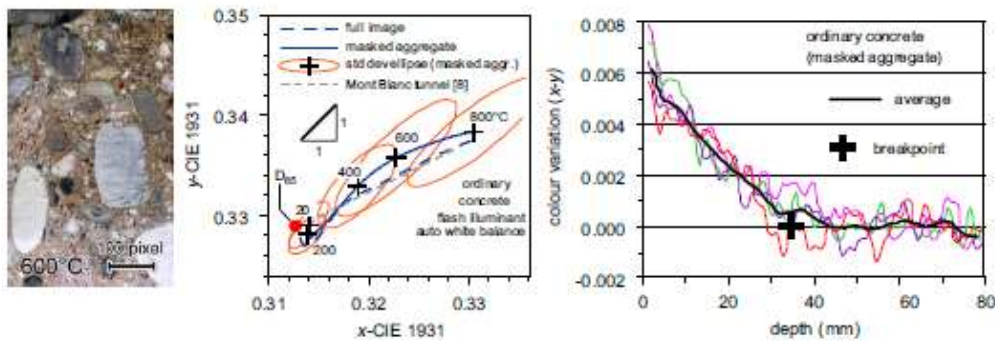
3.2.6 Színanalízis

A beton színe a hőmérséklet hatására megváltozik (14. ábra). A szín-változások a következők:

Szürke	-300 °C
Rózsaszín-vörös	300-600 °C
Szürkésfehér	600-900 °C
Sárgásbarna	900 °C-tól

A rózsaszínes elszíneződést az adalékanyag vastartalmú ásványainak dehidratációja okozza, ebből kifolyólag a beton színének alakulását nagymértékben befolyásolja az adalékanyag típusa.

A kvarc adalékanyagú betonoknál jól használható ez a módszer a mészkő, illetve vulkánikus eredetű adalékanyagoknál kérdéses a módszer alkalmazhatósága. A mérés viszont megbízható eredményeket ad, ha egy furat magminta felületén mérünk és összehasonlítjuk a színváltozás mértékét, ebben az esetben jól becsülhető az elért maximális hőmérséklet, és ezzel a szilárdság csökkenés mértéke is.



14. ábra: A színváltozás mértéke a beton felületén (*fib* bulletin 46)

3.2.7. Mikrorepedés-sűrűség elemzés

A hőterhelés hatására a betonban mikrorepedések keletkeznek, mivel a hőterhelés hatására számos kémia folyamat megy végbe, ezért a mikrorepedések száma és mérete is nő a hőterhelés hőmérsékletével. A modern digitális technika lehetőséget nyújt a mikrorepedések sűrűségnek az elemzésére.

3.2.8. Kémiai vizsgálatok

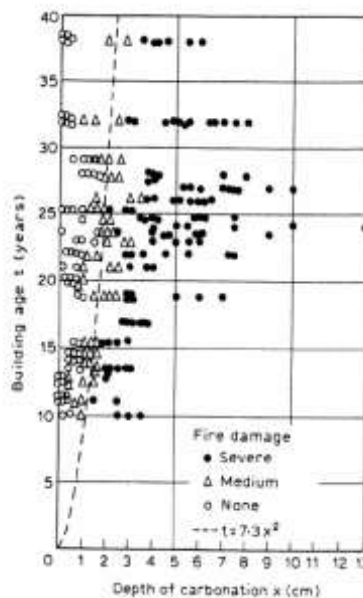
3.2.8 1. Szkenning elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálat

A betonkockákból vett betondarabokon morfológiai vizsgálatokat is végezhetünk elektronmikroszkóppal.

Minden SEM-képen látható az adott nagyításhoz tartozó összehasonlító mikrométer méretarány. A vizsgált mintákat a mintatartókra kétoldalú ragasztócsíkkal ellátott vezetéképes karbon ragasztószalaggal rögzíthetők.

3.2.8 2 Karbonátosodási mélység

A karbonátosodási mélység mérésével (15. ábra) összehasonlító-vizsgálat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mélységének kimutatása, vagyis 400-450 °C-os izoterma vonal helyének meghatározása. Kérdéses, hogy a mérés alkalmazható-e a hőterhelés után több héttel esetleg hónappal, vagy a betonban a CaO visszaalakul $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -vé.



15. ábra: Karbonátosodási mélység mérése hőterhelt betonon (*fib bulletin 46*)

3.3. Speciális módszerek

3.3.1. Szeizmikus tomográfia

A szeizmikus tomográfia egy képrekonstrukciós eljárás. Története az 1980 körüli évekre nyúlik vissza, amikor az akkor már az orvosi és a műszaki tudományokban felmerült feladatok megoldására részleteiben kidolgozott képrekonstrukciós módszereket alkalmazni kezdték a szeizmológiában.

A tomográfia alkalmazásával valamilyen fizikai mennyiség eloszlása egy tartományon belül meghatározható a tartomány kerületén végzett, átvilágítás típusú mérések adataiból, ha a mért értékek a vizsgált fizikai mennyiség vonalintegráljai. A szeizmológiában ilyen kapcsolat van:

- a hullámterjedési idő és a sebesség reciproka,
- az amplitúdók reciprokának logaritmus és az abszorpció között.

A szeizmikus tomográfia esetén a vizsgált tartomány kerületén elhelyezett robbantópontok és geofonok között nagy (elvileg végtelen) számú, egymást keresztező sugárúton megmérve a terjedési időket és az amplitúdókat a terület sebesség- és abszorpció-szelvénye számítható. Megbízható és minden irányban megfelelő felbontású eredményszelvényekhez ezért a vizsgált terület nagyszámú sugárral való, irány és sűrűség szerint egyenletes lefedettsége szükséges. A terület „körüljárhatósága” – az orvosi CT-vel szemben – a szeizmikus gyakorlatban általában nem valósítható meg, ezért a kép a sugárutakkal párhuzamos irányban elkenődik.

A szeizmikus mérést a Mon Blanc alagútnál használták (*Abraham, De'robert, 2003*). A szeizmikus mérés során a beton mechanikai jellemzőire tudtak következtetni a hőmérséklet függvényében. A tűz hatására a beton szilárdsági jellemzői romlanak. A mérés során mérési helyenként 70 db szenzort alkalmaztak. A szeizmikus hullámok eloszlásából tudtak következtetni a károsodás mértékére (*Törös, 2006*).

3.3.2. Radarok

3.3.2.1. Földradar

A földradar módszer (GPR, Ground Penetrating Radar, Ground Probing Radar, SIR Subsurface Interface Radar) a geofizika egyik legújabb ága. A földradar berendezés egy adó és egy vevőantennából, a vezérlő és adatgyűjtő elektronikai egységből, valamint az adatok tárolását végző számítógépből áll. A berendezés adó része nagyfrekvenciás (10 MHz-5 GHz) elektromágneses impulzusok sorozatát bocsátja a vizsgálandó közegbe. A visszavert jeleket az idő függvényében a vevő veszi, digitalizálja és a számítógép tárolja. A kőzetekben a radarjel terjedése a közeg fizikai tulajdonságaitól függ. Gyakorlatilag a dielektromos állandó határozza meg a hullám terjedési sebességét, a vezetőképesség pedig a jel csillapodását. Ha valamely határfelületen ezen két paraméter bármelyike megváltozik, a jel egy része visszaverődik, másik része belép a következő rétegbe. Az idősorokból előálló szelvényen, ha a fizikai kontraszt lehetővé teszi, követhető a rétegződés, a szerkezet, valamint felismerhetők a felszín alatti objektumok vagy tárgyak.

3.3.2. *Impact echo*

Kétféle felületi hullámot különböztetünk meg: a Rayleigh és a Love-féle hullámokat. A Rayleigh-hullámok a felület mentén haladnak, és amplitúdójuk a távolsággal az energia hengerfelület menti szóródásának megfelelően csökken. A Love-féle hullámok csak akkor jönnek létre, ha egy kisebb terjedési sebességet lehetővé tevő réteg van egy nagyobb terjedési sebességet engedő réteg felett, és többszörös reflexiók jönnek létre e két réteg közötti határfelületen. A kutatók a Rayleigh-hullámokra összpontosítottak, mivel a mechanikai feszültség-hullámok energiájának 67%-a ebben a formában terjed tovább. E hullámok terjedési sebessége a hullámhossztól és az anyag rugalmassági modulusától függ. Az, hogy milyen mélységben hatol be a hullám az anyagba, a hullámhossztól függ. A Rayleigh-hullám sebessége annak az anyagnak a jellemzőitől függ, amelyen áthalad: a Poisson-tényezőfüggvénye, és kb. 0,9-része a nyíróhullám sebességének. A hossz- és keresztirányú rezgések eredményeképp a részecskemozgás elliptikus.

Az SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) módszer fő hullámforrása Rayleigh-hullám. fejlesztői más kutatásokból átvették azt a megállapítást, hogy a legkedvezőbb, ha a jelforrás és az első vevő távolsága megfelel a két szomszédos vevő közötti távolságnak. Ugyanígy elfogadták azt a korábbi kutatási eredményt, hogy nem célszerű a vevők közötti távolság háromszorosát meghaladó hullámhosszakat alkalmazni. Ahhoz, hogy a SASW módszer könnyen alkalmazható legyen, egyszerűsítő feltételezéseket tettek (Törös, 2006):

1. a mintában a horizontális rétegek megfelelnek az építmény rétegfelépítésének, és ezek a rétegek anyagtulajdonságaikat tekintve homogének. Hullámokat vették figyelembe (a testhullámokat elhanyagolták). Ez utóbbi feltételezés akkor nem okoz zavaró pontatlanságot, ha a jelforrás – vevő távolságot a hullámhosszhoz viszonyítva meghatározott korlátokon belül tartják.
2. Csak a síkban terjedő (Rayleigh) hullámokat vették figyelembe.

Az impact echo szórt felületi hullámok előállításából, méréséből és feldolgozásából áll. Az összeállítás jelforrásból (12 mm átmérőjű acélgolyó), két gyorsulást mérő jelnevőből (ez az adatgyűjtő rendszer), két jelkondicionálóból és az adatokat feldolgozó számítógépből áll. Az acélgolyó becsapódása által keltett felületi hullámokat a két gyorsulásmérős jelnevő felfogja, a jelkondicionáló ezeket átalakítja, és a felületi hullám sebességeloszlása meghatározható az időtartományban ábrázolt diszperziós görbékből (ezeket a rendszer az idő-, a frekvencia- és a teljesítményspektrum alapján számítja ki) meghatározható.:

1. elég a vizsgált objektum egyik felületéhez hozzáférni.

2. amikor a felületi hullámok előállítására a vizsgálógolyó becsapódásával impulzust keltenek, az előállított energia nagyobb része mérhető.

A felszíni hullámok modálanalízis módszerrel (SASW) a nyíróhullámok sebességeloszlása határozható meg. A felszíni hullámok modálanalízis módszer előnyei:

1. felületi hullámok formájában terjed, és csak kisebb hányada alakul a vizsgált beton belsejében tovaterjedő hullámmá,
2. a felületi hullámok geometriai szétterjedésével az amplitúdó csökkenése kisebb, mint a testhullámok esetén,
3. a vizsgált anyag Young-modulusa vagy nyírási modulusa anélkül határozható meg, hogy ismert lenne a vizsgálati réteg mélysége.

Tehát meghatározott magasságból a vizsgált felületre ejtik a 12 mm átmérőjű acélgolyót. A zajok kiszűrésére egy alul áteresztő szűrőt alkalmaznak, amely az első, erős visszhang utáni többi visszaverődést kizárja. A roncsolásmentes SASW eljárással összefüggést állapítottak meg a betonok nyomószilárdsága és az anyagban haladó felületi hullámok sebessége között. A nyomószilárdság és a kompressziós hullám sebessége közötti összefüggést is megállapították (Törös, 2006).

5.3.3. Hang-tomográf

A hang-tomográfot számítógép vezérli. A vizsgálat során az épületrészen, körben érzékelőket helyezünk el, melynek számát és egymástól való távolságát a számítógép határozza meg. A gép és a program segítségével lehet a vizsgált elem a hang terjedési sebességét mérni. A kopogtatás által kiváltott hanghullámok a betonban terjednek. Ha ebben valamilyen változás van – úgymint üreg, illetve szilárdság változás – az érték, vagyis a hangterjedés ideje megváltozik (http://parkfavedelem.hu/index.php?option=com_content&view=article&id).

3.3.4 MASW (felszínhullámok modál-analízise)

A módszer során szeizmikus felületi hullámok terjedését mérik az anyagban. A rendszer a nyíróhullámok terjedési sebességének a változását méri. Mivel a nyíró hullámok közvetlenül befolyásolják a rugalmassági modulus alakulását ezért a rendszer alkalmas lehet a tűzkárosult betonszerkezetek mérésére is (Törös, 2006).

3.3.5. Elektromos ellenállás

Bizonyos mértékig minden anyag, így a talaj és a kőzetek is vezetnek az elektromos áramot, így először a talajmechanikusok dolgoztak ki egy elektromos ellenállásmérésen alapuló módszert ennek mérésére, és a kapott eredmények hasznosítására. A vezetőképesség, vagy annak reciproka, az elektromos ellenállás jelentősen függ a talaj szerkezetétől, a benne lévő pórusok

méretétől és eloszlásától, az esetleges víztartalomtól és az abban oldott sók mennyiségétől. A beton felületi ellenállását vizsgáló módszerek a vázolt, talajmechanikából származó elven születtek meg. A beton helyszínen való vizsgálatához az úgynevezett négyszondás ellenállásmérőt alkalmazzuk, mely a talajmechanikában alkalmazott ellenállásmérőnek betonra átalakított, jóval kisebb méretű változata.

A beton egy több komponensből álló, mikroporózus, mikrostruktúra-érzékeny építőanyag. A porózus anyagok vizet vesznek fel a levegőből. A porózus anyag és a levegő víztartalmának (relatív páratartalmának) egyensúlyát az adszorpciós izoterma adja meg. 40%-os relatív páratartalomig a vízfelvétel „tisztá” adszorpciós folyamat során történik. Az így felvett víz nem mozog, nem szabad, a cementkő belső felületéhez erősen kötött. 40% feletti relatív páratartalomnál további vizet vesz fel az anyag a kapillárisokon, nyílt pórusokon keresztül. A porozitásnak ezt a részét látszólagos porozitásnak nevezzük.

A betonban található pórusok véletlenszerű elrendezésűek, különböző méretűek, rendszertelenül kapcsolódnak egymáshoz. A víz és különféle ionok áramlását ezeken a tekervényes csatornákon keresztül a vízáteresztő képesség, adszorpció és különféle diffúziós mechanizmusok vezérlik. A cementbázisú anyagok levegővel teli üregeket, mikrorepedéseket és a CSH gél közötti, belső felületi hézagokat tartalmaznak. A habarcs és a beton elektromos ellenálló képessége a cementpép mikroszerkezetének (pórustérfogat, a pórusok sugarainak eloszlása), a nedvesség- és sótartalomnak valamint a hőmérsékletnek függvénye. A mikrostruktúrát számos tényező befolyásolja, úgymint a víz/cement tényező, a kötőanyag, a hidratációs foka, az adalékszerek minősége és mennyisége (*Simon, Vass, 2011*).

ÖSSZEFOGLALÁS

A vasbeton napjaink építészetének széles körben alkalmazott építőanyaga. Számos előnyeként említhető a nagy teherbíró képesség, változatos szerkezetek kialakítási lehetősége, az univerzális felhasználhatóság, az előregyártásra és a helyszíni kivitelezésre való alkalmasság, stb.

Tűzvédelmi szempontból vitathatatlan előnye, hogy nem éghető építményszerkezetet képez, megfelelő méretezésével magas tűzállóságú szerkezet kialakítására alkalmas.

Közleményünkben bemutattuk, hogy a vasbeton kedvező tűzvédelmi jellemzői ellenére is képes tüzeset követően károsodni, akár olyan mértékben, hogy eredeti funkciójának betöltésére alkalmatlanná válik.

Ilyen esetben, amennyiben az építmény helyreállítására kerül sor, speciális módszerekkel kell vizsgálni a károsodás mértékét, a szerkezet eredeti, illetve előírt paramétereinek (statikai, tűzvédelmi, stb.) biztosítása, továbbá a javítás technológiájának meghatározásához.

Széles körű szakmai módszerek és fejlett műszeres háttér áll rendelkezésre a diagnosztikai vizsgálatok elvégzéséhez, amellyel elkerülhető, hogy a szerkezet visszabontásával és újbóli kivitelezésével kelljen a másodlagos tűzkár mértéket jelentősen megnövelni.

HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE

- Abraham, O., De' robert, X., *Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study*. NDT&E International 36 (2003) pp. 411–418.
- Balázs, L. Gy., Lubláy, É.: *Magas hőmérséklet hatása a vasbetonszerkezetek anyagaira*. Vasbetonépítés 2009 (2), pp. 48-54.
- Balázs, L. Gy. – Lubláy, É. – Kopecskó, K. – Salem, G. N. – Nemes, R. – Kausay, T. – Józsa, Zs. – Hlavička, V. – Kakasy, G. – Tóth, P. – Nyíri, Sz. – Lizakovszky, G. – Molnár, T. – Czirják, J. – Földes, T. – Nabil, A. – Abed, M. – Alimrani, N.: *A tűz hatásai a beton szerkezetére*. Vasbetonépítés 2017 (2) pp. 26-33.
URL: http://fib.bme.hu/folyoirat/vb/vb2017_2.pdf (letöltés dátuma:2021.02.12.)
- Bindseil, P. (Fachhochschule Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen): *On-site inspection of concrete structures: state-of-the art NDT methods and practical applications* (Betonszerkezetek roncsolásmentes vizsgálatának gyakorlatáról), 2002
- Cioni, P., Croce, Salvatore, P., *Assessing, W.: Rre damage to r.c. elements*, Fire Safety Journal 36 (2001) pp. 181-199.
- Felicetti, R.: *The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete*. Cement & Concrete Composites 28 (2006) pp. 321–329.
- fib* bulletin 46,: *Fire design of concrete structures-structural behaviour and assessment*, ISBN: 978-2-88394-086-4, (2008)
- http://parkfavedelem.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=46%3A%203d-akusztikus-tomograf-az-idos-fak-megmenteseert&catid=24%3A%20publikaciok&Itemid=112&lang=hu
- <http://sdt.sulinet.hu/Player/Default.aspx?g=30b4fc34-89a4-4ad9-8cf6-e30529fbcc5b&cid=27ce789c-3af0-4df8-82f8-edeea421596b>
- http://www.hirado.hu/Hirek/2011/10/17/07/Szinte_teljesen_a_kiegett_CBA_arutere__fotok.aspx
- http://www.minden-korr.hu/contents/muszereink_eszkozeink
- <https://www.germann.org/TestSystems/CAPO-TEST/CAPO-TEST.pdf>
- Kopecskó, K.: *A gőzölés hatása a cement klinkerek és cementek kloridion megkötő képességére* (in English: Chloride ion binding capacity of clinker minerals and cements influenced by steam curing).
- Mohácsi G.: *Az épület- és építménydiagnosztika néhány hordozható eszköze*, *Anyagvizsgálók Lapja* 2004(1), pp. 9.
- MSZ 4720:1985 A BETON MINŐSÉGÉNEK ELLENŐRZÉSE
- Ódor, P., Varga, L. (BME Hidak és Szerkezetek Tanszék): *Proceq műszerek alkalmazása a vasbeton szerkezetek vizsgálatánál*, 2002.

Orbán, Z. (Pécsi Egyetem Pollack Mihály Kar): *Vasúti vasbeton szerkezetek állapotvizsgálata és felújításának segítése roncsolásmentes vizsgálatokkal*, 2001

OTSZ - 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400054.bm> (letöltés dátuma: 2021. 02. 10.)

Proceq ,S. A.: *Betonelemek vizsgálata ultrahanggal*. Anyagvizsgálók Lapja 1998 (1), pp. 27.

Simon, T., Vass, V.: *A beton elektromos ellenállása és a vasbeton tartósságának összefüggése.*, Vasbetonépítés 2011 (1) pp.26-29.

Szilágyi, K. - Borosnyói, A.: *A Schmidt-kalapács 50 éve: Múlt, jelen, jövő. 2. rész: Az európai szabványosítás és annak hazai jelentősége (50 years of Schmidt Rebound Hammer. Part 2. European Standardization and its Impact in Hungary)*. Vasbetonépítés, (2008) 10. pp. 48-54.

Törös, E.: *A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásaink kritikai vizsgálata*, PhD értekezés (2006)

Építményszerkezetek tűzvédelmi jellemzői (Fire protection properties for building constuctions) Tűzvédelmi Műszaki Irányelv (Fire Protection Technical Guideline) TvMI 11.2:20.01.22.

<https://www.katasztrofavedelem.hu/10499/epitmenyszerkezetek-tuzvedelmi-jellemzoi> (letöltés dátuma: 2021. 02. 10.)

[https://www.ndtjames.com/News-releases_a/Redesigned Windsor Probe Press %20Release_a/295.html](https://www.ndtjames.com/News-releases_a/Redesigned_Windsor_Probe_Press_%20Release_a/295.html) (letöltés dátuma: 2021. 02.10.)

Vértes, M. (ÁKMI – Állami Közúti Műszaki és Információs Kht., Győri Minőségvizsgáló Osztály): *Hídépítések és hídfelújítások kontroll vizsgálata Proceq műszerekkel*, 2001.

Lublóy Éva Eszter, PhD, habil, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

E-mail: lubeva@web.de

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Varga Ferenc ddtb, igazgató

Fővárosi Katasztrófavédelmi Igazgatóság

ORCID ID: 0000-0003-1584-3847