



**A FALAZÓ HABARCSOK JELENTŐSÉGE
TÖRTÉNETI ÉPÍTMÉNYEK
TARTÓSZERKEZETI BIZTONSÁGÁBAN**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

BALLA BRIGITTA
OKL.ÉPÍTŐMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ: DR. ORBÁN ZOLTÁN

2020

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
A műemlékvédelemről	4
A műemlékvédelem fontosságáról	5
Az elvégzett kutatás célja	6
Irodalomjegyzék	7
Summary	8
Következtetések, tézisek.....	9
I Téziscsoport: A falazóhabarcs szilárdsági tulajdonságainak szerepe történeti építmények falazatainak teherbíró képességében.....	9
II Téziscsoport: Történeti építmények falazóhabarcsainak helyszíni szilárdsági vizsgálata	10
Kitekintés, javaslat a kutatás gyakorlati alkalmazására	12
Vonatkozó saját publikációk jegyzéke	12

Bevezetés

Épített örökségünk védelme, megóvása a jövő nemzedékek számára egy rendkívül fontos és nehéz feladat. Sok esetben a műemléki és történeti épületek, hidak szerkezeteiben romlási folyamatok olyan mértékben előre haladottak, hogy a szilárdsági, állékonysági problémák már jelentkeztek, ezen esetekben már nem restaurátori, hanem építőmérnöki feladat a helyreállítás – nem elhanyagolva az építészeti értékek megőrzését. Különösen a meglévő falazott szerkezetek vizsgálata, illetve a teherviselés mértékének meghatározása – kiemelten a mészhabarc falazatok esetén – nehezen kivitelezhető, költséges és időigényes. A vizsgálatokhoz minden esetben szükséges helyszíni mintavétel, mely – ugyan legtöbbször csak kis mértékben – fizikai beavatkozással, a falazat roncsolásával jár. Problémát jelent, hogy a falazat mért szilárdsági értékeinek szórása rendkívül nagy, mely értéket jellemzően a roncsolással járó vizsgálatokkal tudjuk csak csökkenteni.

Nagy kérdés a felújítás, átalakítás és a műemlékvédelem megvalósításának pontos kivitelezése. Gyakran a hosszú ideig magára hagyott épület, vagy építmény az idők során károsodott, megváltozott, de ez a korából adódó károsodás lehet az építmény, műemlék sajátja, oly módon, hogy báját, régies mivoltát e tényező javítja, nem pedig rontja. Ruskin véleménye szerint a rongálódás is hozzátartozik az emlék korához, így nincs jogunk ezt a folyamatot semmilyen módon megváltoztatni. Georg Dehio német művészettörténész véleménye is hasonló, úgy gondolja sokszor egy nem létezőt keltenek életre, az egyik oldalon van a valóság a Wirklichkeit, a másikon pedig már a fikció [1].

„... csak azt lehet konzerválni, ami még megvan - ami elmúlt, az sohasem fog visszatérni.”

Georg Dehio: „Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler

Gondoljunk csak a különböző romemlékekre¹: romtemplomokra, romvárakra, ilyen fennmaradt számtalan műemlékünk között találjuk az 1. ábrán látható Regöly határában álló egykori Somoly falu templomának rommaradványát. A XV.századból származó templom konzerválását és statikai megerősítését 1960-as években végezték el, nem egészítették ki az elveszett részletekkel, mégis főbb építészeti értékei, mint a félköríves boltozat, masszív falak és zömök torony, keskeny, lőrésszerű ablakok megmaradtak [2].



1. ábra: Egykori Somoly falu romtemploma (saját felvétel)

¹ romemlék: Elpusztult történelmi jelentőségű építmény felszíni vagy felszín alatti maradványa, amelynek legalább részleges feltárása és bemutatása indokolt és műemléki védelemben áll..

Kutatásom során tehát nem csak a funkciót betöltő épületek, hanem például rommaradványok, szabadon álló falazatok és egyéb építmények vizsgálatát is elvégeztem, hiszen tartószerkezeti és állagmegóvási szempontból fontos a diagnosztika. A 3. fejezetben a vizsgált szerkezetek közül kiemeltem és ismertettem azokat, melyek jelentős, de sérülékeny építészeti értéket képviselnek, illetve a műemléki és világörökségi védettség miatt tartószerkezeti és szilárdsági jellemzőik nem vizsgálhatók roncsolással járó módszerekkel.

A műemlékvédelemről

“Hazánk történelmének, kultúrájának és művészetének pótolhatatlan örökségét képezik azok az alkotások, amelyek a környezet kiemelkedő értékeiként az ország és az egyes települések arculatának jellegzetes meghatározói, kulturális hagyományainak hordozói, s egyben a történelmi és nemzettudat formálói.

Ezek az alkotások, mint műemlékek – a tulajdonjogra való tekintet nélkül – az egész nemzet közös kulturális kincsei, védelmük nemzeti összefogást kíván. Fenntartásuk, jelentőségükhöz méltó használatuk és az egész társadalom számára való hozzáférhetővé tételük közérdek.”

Részlet a műemléki törvény bevezetőjéből (1997. évi LIV. törvény a műemlékvédelemről)

Már Kr. e. IV. századból származó írásokban szerepel az épületek későbbi kiegészítése, mint például az olimpiai Zeusz templom egyik párkánytöredékén végzett renoválás. Mégis logikusabbnak tűnik, hogy egy használatban lévő épületet nem műemlékvédelmi, hanem esztétikai megfontolásokból egészítették ki az ókori mesterek.

Úgy tartjuk tehát, hogy a műemlékvédelem a XIX. század szülötte. A régebbi korok művészeti alkotásainak tudatos és következetes védelme, megóvása és eredeti állapotukban való megtartása vagy helyreállítása a múlt század előtt tulajdonképpen ismeretlen fogalom volt. A korábbi idők általános magatartásából hiányzott a réginek az a tisztelete, amely a műemlékvédelmet közel a mai formájában életre hívta.

A XIX. században elsőprő erővel került középpontba az emberiség és az egyes nemzetek múltja, szellemi és tárgyi emlékei iránti érdeklődés. Az értékek megismerésének, összegyűjtésének, értékelésének folyamata, megóvásuk, megmentésük igénye társadalmi igényé vált. A purizmus² időszakában az eredetiséget kizárólag a műemlék legelső (építési) állapota jelentette. Az eltűnt szerkezeteket, formákat a stílusokról szerzett széleskörű ismeretek alapján pótolták. Az irányzat azonban nem becsülte az anyag és a felület eredetiségét, irtózott a töredékességtől, az eredeti vagy annak ítélt formát, szerkezetet meghatározónak tartotta, de a sérült eredeti részleteket épre kiegészített másolattal helyettesítette. Az anyagkompatibilitás és a nagymértékű szerkezetkiegészítés számos problémát idézett elő, nem csak a gyorsabb állapotromlás miatt, de a későbbi felújítások során is.

A XX. században a történeti fejlődés állandóan változó, alakuló dinamikája került előtérbe. A helyreállítás alapvető elve a történetiség mellett a megőrzés, konzerválás. Cél a történetiség tisztelőben tartása mellett az anyagi értelemben vett eredetiség megtartása. A műemlékek helyreállításakor nagyon fontos szempont a hitelesség kérdése. Az emlékek anyagában és szerkezetében, megjelenésében hűen kell tükröznie azt a kort, amelyben létrehozták [3].

² purizmus: A 19. század műemlékvédelmének stíluszisztaságra törekvő módszere. Kevésbé, illetve egyáltalán nem vette figyelembe a műemlék múltjának történetiségét, és az egyedül eredetinek tartott legelső vagy leginkább uralkodó állapotot kívánta visszaállítani.

1964-ben a „The International Restoration Charter” azaz a Velencei Charta (Karta) kimondja, hogy „...nemzeti műemlékeink egyúttal az emberiség közös kulturális örökségének kincsei.” Ezen alapvető elgondolás a modern műemlékvédelem hitvallása [4].

Hivatalosan műemléknek az olyan építészeti értékeket nevezzük, amelyet a kulturális örökség védelméről szóló 2001. évi. LXIV. törvény alapján jogszabállyal védetté nyilvánítottak. A műemléki védettségnek különböző szintjeit különböztetünk meg. Országos műemléki védelem, vagy helyi védelem [5].

A műemlékvédelem fontosságáról

Az örökségvédelem nem a cél. Az örökségvédelem a társadalom számára a múlton alapuló, elérhető jövő építésének egyik fontos eszköze. A társadalom egészséges identitásához szükség van a gyökerekre, múltra, a múlt ismeretére. Múltunknak, történelmünknek pedig kézzel fogható emlékei, bizonyítékai a korábbi generációk által megalkotott, szeretettel végzett emberi munkával létrehozott műemlékeink. Ezek megőrzése tudományos alapokon nyugvó, évszázados tapasztalatot felhalmozó és felhasználó, a bennünket követő generáció, a jövő társadalma érdekében kifejtett társadalmi tevékenység.

Fontos kérdés, hogy mi is pontosan az építészeti érték, mi az, aminek a megőrzése kiemelt feladatunk.

„Az épített környezet minden olyan tárgyi és szellemi (építészettörténeti, építőművészeti, műszaki-tudományos) építészeti minőséggel rendelkező alkotásokban megjelenő értéke, amelyben a mindenkori társadalom - ezen belül a helyi közösségek - identitása és alkotóképessége fejeződik ki.”

Az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény

Néhány szempont az építészeti érték meghatározásához:

- épület szépsége, arányai, megjelenése, építészettörténeti stílusjegyei
- építés ideje
- különleges építéstechnológia
- építmény, épület egyedi, ritkán előforduló alkotás
- történelmi, társadalmi, kulturális értékeket hordoz
- harmonikus épületegyüttest alkot, különleges környezeti értéket képvisel

A műemlékvédelem feladata a műemléki értékek felkutatása, tudományos kutatása, értékelése és számba vétele, dokumentálása, nyilvántartása, védetté nyilvánítása és a védendő műemléki területek meghatározása, a műemlékek és környezetük fenntartása, helyreállítása, védelme, valamint eszmei értékükkel összhangban álló hasznosításuk biztosítása, a műemléki szempontból védett területek fenntartását, fejlesztését és az értékvédelmét szolgáló kezelése összhangjának megteremtése, tudományos alap kutatások és kutatások, oktatás, ismeretterjesztés [6].

Helyi védelem vagy műemléki védelem alatt álló építményeink a nemzeti értékeink közé tartoznak. Építészeti szépségük, az alkotó kor jellemzői számtalan apró részletben nyilvánulhat meg.

A műemlék-helyreállítás folyamata során - már a kutatás és a tervezést megelőző műszaki vizsgálatok elvégzésekor - előtérbe kerülhetnek a diagnosztikai vizsgálatok. A védelem típusától függetlenül a szerkezetek megóvása a briliáns építészeti megoldások épsége és az aprólékosan kidolgozott kiegészítő elemek sértetlensége különösen fontos. Ezen okokból kutatásom során a roncsolásmentes módszerek kerültek előtérbe, kiegészülve további anyagvizsgálatokkal. Az anyagvizsgálatok szerepe nem elhanyagolható. A ma használatos

cement tartalmú anyagok eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a régen használt (mész) kötőanyagok. Alkalmazásukkal megbomlik az épületfizikai egyensúly, ami komoly károsodásokhoz vezet [7]. Lényeges tehát a meglévő szerkezeti anyagok összetételvizsgálata, mely kutatásom egyik kiemelt módszere.

Az elvégzett kutatás célja

A kutatásom elsődleges célja a meglévő falazott szerkezetek azon diagnosztikai módszereinek fejlesztése, melyek alkalmasak a fizikai beavatkozás minimalizálása mellett a szilárdsági és állapotjellemzőik kellő pontosságú meghatározására – kiemelten a falazóhabarcs vonatkozásában. Dolgozatom 2. fejezetében a szakirodalmi áttekintést követően a különböző számítási összefüggések paramétereit, módszerét tekintetem át. Arra kerestem a választ, milyen számítási metódus szerint igazolható egy meglévő szerkezet. Összevettem az érvényben lévő és a megelőző szabványok szerinti vizsgálat feltételeit, külön épületek és boltzott hidak esetén. A 3. fejezet a módszertan rövid ismertetését tartalmazza. A 4. fejezetben az Eurocode által alkalmazott képletet alapul véve a számításban szereplő egyes paraméterek érzékenységét vizsgáltam, meghatároztam a teherbírásra gyakorolt hatásukat. A falazóelem és a habarcs karakterisztikus szilárdság értékeinek relatív szórása függvényében a teherbírás variabilitást modelleztem. Összevettem a rendelkezésre álló külföldi szakirodalom és a MÁV Zrt. hídállag nyilvántartása alapján a közép-kelet-európai és a nyugat-európai vasúti hidak főbb geometriai jellemzőit. Összehasonlítottam az eltérő kialakítású szerkezeteket, majd a tipikus jellemzők alapján megalkottam két numerikus hídmodellt. A két modellen falazott hídszerkezetekre vonatkozólag numerikus paraméter érzékenységi vizsgálatokkal megállapítottam a teherbírást leginkább meghatározó szerkezeti és anyagi jellemzőket. Az elvégzett szimulációk alapján meghatároztam azt a szilárdsági tartományt, ahol a falazóhabarcs szilárdsága a tartószervezet biztonságában kiemelten fontos paraméter.

Az 5. fejezetben arra kerestem a választ, hogy a meghatározott szilárdsági tartományokban mely helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok alkalmazhatóak. Céлом az alkalmazott módszerek közül kiválasztott diagnosztikai eljárások fejlesztése volt. Az alkalmazott anyag- és szerkezetvizsgálati módszerek közül elsődlegesen a roncsolásmentes, vagy kisoncsolással járó módszerek fejlesztésére és alkalmazására fókuszáltam. Célként tűzve ki a roncsolással járó vizsgálatok – különösen fűrt mintavételek – számának minimalizálását a szerkezetvizsgálat során. Kiemelten fontos, hogy az egyes módszerek a habarcsszilárdság változékonyságára és ne csak a szilárdság értékre adjanak megfelelő eredményt.

Alacsony habarcsszilárdsági tartományban készítettem változó összetételű kontroll mintasort, melyek alkalmasak a vizsgálati módszerek fejlesztéséhez, egzakt értékeléséhez és a variabilitás meghatározására. Az anyagi összetétel nagyban befolyásolja a habarcskeverék szilárdságát, így mikroszkopikus (terepi, polarizációs és elektronmikroszkóp) és kémiai módszerekkel (pH mérés, XRF vizsgálat) megvizsgáltam azt is, hogy a habarcsalkotók tulajdonságai hogyan hatnak a megszilárdult habarcs fizikai és mechanikai jellemzőire, továbbá a tulajdonságok változékonyságára. A vizsgálatokkal mikroszkopikus szinten feltérképezhetjük a habarcsban végbement degradációs folyamatokat, valamint az eltérő – szilárdságra ható – paraméterek változékonyságát. Látható és/vagy kimutatható a károsító sók jelenléte és típusa, a porozitás, a kötőanyag mennyisége, a repedések méretei, az adalékanyag fajtája, a benne lévő szerves anyagok, a szétosztályozódás vagy épp az egynemű szerkezeti felépítés. Az elvégzett vizsgálatok összességében a habarcs homogenitását, vagy inhomogenitását térképezik fel, lehetőséget adva a szilárdság értékének és variabilitásának pontosítására. A nedvességtartalom mérésével a szerkezeten belüli – nedvesség hatására végbement – állapotromlási folyamatok detektálására nyílik lehetőség. Kontroll habarcs mintasor törővizsgálata során a minták 20-90% közötti mértékű szilárdságsökkenést mutattak teljesen telített állapotban. A szerkezeten belül

a változó nedvességtartalom a szilárdsági értékek szórását jelentősen megnöveli, így szilárdságbecslés megbízhatóságát is rontja. A kontroll mintasor eredményeket összevettem a már rendelkezésre álló, illetve célirányosan elvégzett nagyszámú helyszíni diagnosztikai mérési adattal, meglévő szerkezetből kiemelt minták elemzésével.

A 6. fejezetben az elvégzett mérések eredményei alapján vontam le következtetéseimet, majd gyakorlati ajánlást fogalmaztam meg az alacsony szilárdsági osztályba eső falazatok vizsgálatához, igazolhatóságához. Végül két kapcsolódó téziscsoportra bontva fogalmaztam meg kutatásaim legfontosabb eredményeit.

Irodalomjegyzék

1. Lővei P.: „Konzerválni és nem restaurálni” – A műemlékvédelem elvei, régebbi és újabb törekvése, Műemlékvédelem, 2014.
2. <http://muemlekem.hu/muemlek/show/8714> 2020.09.15.
3. Entz G.: Műemléki helyreállítások tudományos előkészítése és dokumentálása, Magyar Műemlékvédelem 1973-1974 (Országos Műemléki Felügyelőség Kiadványai 8.), Budapest, 1977.
4. „The International Restoration Charter” Velencei Charta (Karta): Nemzetközi karta a műemlékek és műemlékhelyszínek konzerválására és restaurálására, Történeti Épületek Építészeinek és Szakértőinek Második Kongresszusa (The Second Congress of Architects and Specialists of Historic Buildings), Velence, 1964.
5. Az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény
6. A kulturális örökség védelméről szóló 2001. évi LXIV. törvény
7. Ágostházi L.: Műemlékvédelem, Műszaki Kiadó, Budapest, 1999.

Summary

The protection of cultural heritage masonry buildings and structures is a very important and difficult task because they represent a large proportion of our built environment and infrastructure, and their maintenance requires careful consideration. The structural condition of many of these structures is rapidly declining due to the changing environmental effects or loading regimes. In order to maintain structural safety effective assessment tools are needed that are assisted by test methods. The main objective of my research is the improvement of Non-Destructive Tests (NDT) and Minor Destructive Tests (MDT) for existing masonry structures.

In the first chapter of my dissertation the relevant literature is reviewed, focusing on the parameters affecting masonry strength and stress distribution characteristics.

The second chapter contains a brief description of the methodology of analysis and introduces the selected buildings where field tests have been carried out for the case studies. These case studies form the practical demonstration of the developed analysis techniques.

In the third chapter the effect of different geometrical and material parameters are examined on the load capacity of typical masonry structures. The main geometrical characteristics of railway bridges from North-East Europe and West Europe are compared, based on the MÁV ZRt's bridge register and the relevant international literature. Comparison on the different structural and material characteristics are made and a numerical bridge-model is created based on the statistical analysis of the selected parameters. The structural and material parameters that primarily define the strength of the structures are specified. A masonry strength range is derived, in which the strength of the mortar has highlighted importance with regard the carrying capacity and safety of the structure.

In the fourth chapter results of field tests and laboratory examinations carried out on mortars are summarized. The aim of analysis was the improvement of the standard test procedure of the strength of historical mortars. Control samples in the low mortar strength range were created with different material compositions. These control samples were used to analyse the strength characteristics based on the variation of selected parameters of the composition and develop or refine the test-methods.

It was concluded based on the tests that the material composition and its variations highly influence the strength properties of historical mortars. Samples were analysed by using different types of microscopes (field-, polarising- and scanning electron microscope), and by chemical methods (e.g. pH measurement, XRF test). It was found that the presence of damaging salts and their type, the porosity of the material, the amount of binding material, the size and distribution of cracks, the presence of organic materials were detectable and/or visible with these tests. The effect of various moisture content of the mortars on its strength was analysed experimentally by using control samples with various moisture contents.

In the fifth chapter the conclusions are drawn from the results of the tests and numerical analyses. The most important results of the research are summarized in two thesis groups.

Következtetések, tézisek

Doktori értekezésemben első lépésként történeti építmények tipikus falazott szerkezeteit elemeztem a rendelkezésre álló szakirodalmi adatok és saját vizsgálati tapasztalatok alapján. Az elemzések alapján meghatároztam a falazat szilárdságra vonatkozó azon kritikus határértékeket, amelyek a kiválasztott tipikus szerkezetek esetében szerkezeti viselkedés és teherbíró képesség szempontjából, a szilárdság jelentőségében egy átmeneti értéket definiálnak. Numerikus modelleken végzett vizsgálataim eredményeiből kiindulva, a további vizsgálatoknál elsősorban az alacsony szilárdságú habarcsokra fókuszáltam. Szem előtt tartva a történeti és műemléki építmények megóvásának igényét, kutatásomban roncsolásmentes illetve kis roncsolással járó vizsgálati módszerek alkalmazhatóságát és fejlesztését tűztem ki célul. Kutatásaim részben meglévő szerkezeteken végzett helyszíni és az azokból nyert minták laboratóriumi, részben kontroll mintasoron végzett laboratóriumi vizsgálatokon alapulnak. A bemutatott új tudományos eredmények alkalmasak a habarcsszilárdság kellő pontosságú meghatározásához a szerkezet károsítás minimalizálása mellett.

I Téziscsoport: A falazóhabarcs szilárdsági tulajdonságainak szerepe történeti építmények falazatainak teherbíró képességében

I.I. Tipikus kialakítású, boltozatos falazott hídszerkezetekre vonatkozólag numerikus paraméter érzékenységi vizsgálatokkal megállapítottam a hidak teherbírását leginkább meghatározó szerkezeti és anyagi jellemzőket valamint kimutattam a falazatok szilárdságának jelentőségét a többi paraméterhez képest.

- A. A MÁV Zrt. hídállag nyilvántartás rendszerben és nemzetközi adatbázisokban található adatok alapján statisztikai elemzést végeztem a hazai és nyugat-európai vasúti hídállományban található falazott hídszerkezetek geometriai kialakítására vonatkozóan. Megállapítottam több európai ország hídállományában található legjellemzőbb geometriai kialakítást és az ezek közötti eltéréseket. A statisztikai elemzés alapján kiadódó leggyakoribb építési és geometriai paraméterek alapján megalkottam 2 merev-blokk módszeren alapuló számítógépes modellt egy tipikus hazai és egy tipikus angliai hídra.
- B. Merev blokk módszerrel végrehajtott paramétervizsgálatok alapján megállapítottam, hogy tipikus geometriai és geotechnikai paraméter tartományok feltételezése esetén a falazatszilárdság változásai milyen hatással vannak a szerkezet teherbírásának kimerülését eredményező terhelés intenzitásra.
- C. A végrehajtott numerikus paramétervizsgálatok alapján megállapítottam, hogy mindkét vizsgált híd típus esetén létezik egy olyan falazat nyomószilárdsági határérték, amely felett a falazat nyomószilárdságának változására a híd teherbírása kevésbé érzékeny. Ez a határérték a hazai, zömökebb kialakítású boltozattípus esetén kb. $1-1,5 \text{ N/mm}^2$, míg a karcsúbb kialakítású angolszász boltozat esetében $5-7 \text{ N/mm}^2$.
- D. Megállapítottam, hogy amennyiben a nemzetközi előírásoknak megfelelően, a híd törési mechanizmus kialakulásával szembeni biztonságát $2,0-2,5$ közötti tartományban vesszük fel, akkor az ehhez a biztonsági szinthez tartozó falazatszilárdsági határ a karakterisztikus értékek tekintetében mindkét híd típus esetében a $2,0-2,5 \text{ N/mm}^2$ -es tartományba fog esni. Ezen határérték alatt a falazat nyomószilárdsága és annak variabilitása döntő jelentőségűvé válik a szerkezet teherbírásának igazolása szempontjából.

I.II. Általános kialakítású történeti épületek vizsgálatai alapján elemeztem a falazóhabarcsok nyomószilárdságának és annak, variabilitásának szerepét a dominánsan nyomott falazott szerkezeti elemek teherbírásában. Sztochasztikus numerikus vizsgálat alapján meghatároztam, azt az értéktartományt, ahol a falazóhabarcs szilárdsága a falazott szerkezeti elemek teherbírása szempontjából kiemelt jelentőséggel bír.

- A. Szakirodalmi adatok és saját helyszíni méréseim alapján, tipikus kialakítású történeti építményeken meghatároztam a téglafalazatokat alkotó anyagok (falazóelemek, habarcsok) nyomószilárdságának jellemző tartományait és variabilitását.
- B. Falazott épületek tipikus teherviselő falszerkezeti elemein végrehajtott numerikus vizsgálatok alapján megállapítottam a falazatok szilárdságát leginkább befolyásoló paramétereket és a jellemző paramétertartományokban érzékenység vizsgálattal állapítottam meg az értékek változásának hatását.
- C. Monte-Carlo szimulációval végrehajtott valószínűségelméleti vizsgálatok alapján megállapítottam a falazóhabarcsok szilárdságának és annak variabilitásnak jelentőségét a falazatszilárdság értékének statisztikai jellemzőiben illetve történeti építmények tipikus, dominánsan nyomott falszerkezeti elemeinek teherbíró képességében.

II Téziscsoport: Történeti építmények falazóhabarcsainak helyszíni szilárdsági vizsgálata

II.I. Tézis: Kidolgoztam egy új közelítő módszert falazóhabarcsok nyomószilárdságának roncsolásmentes, helyszíni meghatározására.

- A. Kísérletileg igazoltam, hogy az MSZ EN 14488-2:2007 szabványban közölt, a lőttbetonok korai szilárdságának meghatározására kidolgozott penetrációs módszer alkalmas $0,8-1,5 \text{ N/mm}^2$ -t nem meghaladó szilárdsággal rendelkező habarcsok nyomószilárdságának helyszíni becslésére. Falazott hasábokon végrehajtott laboratóriumi mérések alapján kidolgoztam a penetrációs tű benyomódásához szükséges erő és a habarcs nyomószilárdsága közötti összefüggést.
- B. A rendezett minták elvének alkalmazásával kidolgoztam egy módszert a falazóhabarcs szilárdság adott alulmaradási valószínűséghez tartozó karakterisztikus értékének és várható értékének meghatározására.
- C. Kidolgoztam a penetrációs eszköz alkalmazásához egy gyakorlati útmutatót. Az útmutató tartalmaz ajánlást a mintahelyek darabszámára, a mintahelyek kijelölésére és a további pontosító vizsgálatok elvégzésére vonatkozólag. Történeti építmények falazott szerkezetein végzett helyszíni vizsgálatok alapján igazoltam a módszer alkalmazhatóságát.

II.II. Tézis: A habarcs szilárdságvizsgálati eljárások közül ritkán alkalmazott „pecsétnyomás teszt” módszert továbbfejlesztettem. Kísérletsorozattal igazoltam, hogy az igen alacsony szilárdságú ($<0,5 \text{ N/mm}^2$) habarcsok vizsgálata során az általam kidolgozott teljes kitöltöttségű mintakialakítás pontosabb szilárdsági értéket ad az eredeti (nemzetközi szabályzatokban ismertetett) kialakításhoz képest.

- A. Az általam készített, különböző habarcsösszetételű mintasorok esetében, ismert nyomószilárdsági értékekkel való összevetés után igazoltam, hogy az eredeti „pecsétnyomás teszt” $1-1,5 \text{ N/mm}^2$ szilárdsági határ felett megbízható eredményre vezet. Megállapítottam, hogy ez alatti szilárdságok esetében a módszer megbízhatósága romlik a minták terhelés alatti korai szétesése miatt.

- B. A „pecsétnyomás teszt” módszer alacsony szilárdsági tartományban való megbízhatóságának növelése érdekében kidolgoztam a teljes kitöltöttségű mintakialakítást, amelyben a szerkezetből kinyert habarcsmintát minden oldalról gipszréteg veszi körül.
- C. Laboratóriumi vizsgálatok alapján, teljes kitöltöttségű mintakialakítás alkalmazásával leveztem a pecsétnyomás és habarcs nyomószilárdsága közötti összefüggést az igen alacsony szilárdságú habarcsok esetére ($f_m \leq 0,3 \text{ N/mm}^2$).
- D. Igazoltam, hogy az új, teljes kitöltöttségű habarcsminta kialakítással megbízhatóbban lehet az igen alacsony szilárdságú habarcsok szilárdságát mérésrel megállapítani, ugyanis ez a kialakítás jobban megfelel a valódi szerkezetekben található többletengelyű feszültségállapotnak és a minták terhelés alatti korai szétesését is megakadályozza.

II.III. Tézis: Igazoltam, hogy a történeti építmények falazóhabarcsainak roncsolásmentes vizsgálatokkal meghatározható fizikai és kémiai jellemzői összefüggésben vannak a habarcsok nyomószilárdságával így ezek mérésével a szilárdságbecslés pontosítható.

1. Altézis: A habarcsok makroszkopikus és mikroszkopikus jellemzői alapján – mint az anyagösszetétel, károsító tényezők, előrehaladott állapotromlási folyamatok látható és mérhető jellemzői – meghatároztam egy állapotjellemző mérőszámot.

A pontrendszer a célirányos diagnosztikai vizsgálatok kiválasztásához a szilárdság várható maximális értékét és variabilitását adja meg.

2. Altézis: Igazoltam, hogy a történeti építmények falazóhabarcsainak pH értéke összefüggésben van a habarcs mésztartalmával és közvetve a szilárdsággal.

- A. Szakirodalmi adatok feldolgozása alapján igazoltam, hogy a történeti mészhabarcsok szilárdsága szoros összefüggésben áll a mésztartalommal.
- B. Ismert, történeti építményekre jellemző összetételű habarcsminták vizsgálatával igazoltam a mésztartalom és a szilárdság közötti összefüggést.
- C. Saját laboratóriumi vizsgálatok alapján igazoltam, hogy habarcs pormintából készített desztillált vizes szuszpenzió pH értékének mérésével a habarcs viszonyított (m%) mésztartalma meghatározható, ez alapján a habarcsszilárdság becslése pontosítható.

3. Altézis: Meghatározott összetételű és szilárdságú falazóhabarcs próbakockákon végrehajtott laboratóriumi mérésekkel meghatároztam a szilárdság és a nedvességtartalom közötti összefüggést. Megállapítottam, hogy a történeti habarcsok szilárdsága nagymértékben függ a víztartalomtól.

- A. Légszáraz egyensúlyi nedvességtartalommal és teljesen telített, 100%-os nedvességtartalommal rendelkező minták szilárdsági eredményeinek összehasonlításával megállapítottam, hogy a $1,2 \text{ N/mm}^2$ szilárdságú, vagy ez alatti habarcsok nyomószilárdsága legalább 20%-kal csökken erős nedvesség hatására. A „közel nulla szilárdságú” ($f_m < 0,3 \text{ N/mm}^2$) mészhabarcsok esetében a vízzel telített állapot akár 75%-os szilárdságcsökkenést is eredményezhet.
- B. A nedvességtartalom eloszlása egy épületben növeli a szilárdság variabilitását. A szerkezet nedvességtartalmának 30%-os variabilitása a falazóhabarcs szilárdság relatív szórás értékét 5-10% között növeli.

4. Altézis: Helyszínen végrehajtott endoszkópos vizsgálatok alapján történeti téglafalakra levezetem egy „habarcs – kitöltöttségi mérőszám”-ot. A mérőszám aktuális értéke alapján javaslatot tettem a habarcsszilárdság variabilitásának módosító tényezőjére.

- A. 5 db falazott szerkezet endoszkópos vizsgálatai során készített videófelvételek kiértékelése alapján kidolgoztam a fugahabarcsok minőségi értékelésére egy ún. „habarcs – kitöltöttségi mérőszám”-ot (HKM). A mérőszám a fal vizsgált keresztmetszeti hosszának és habarcsrétegekben jelentkező üregek, vagy elhanyagolható szilárdságú részek hosszának az arányából számolható, százalékos formában. A HKM értéke habarcsrétegek kitöltöttségének és minőségi variabilitásának szerkezetspecifikus megállapítására ad egy kiegészítő jellemzőt.
- B. Javaslatot tettem arra vonatkozóan, hogy a HKM paraméter ismeretében a habarcsszilárdság átlagos értékét és szórását milyen mértékben kell módosítani a falazatszilárdság karakterisztikus és tervezési értékének megállapításához.

Kitekintés, javaslat a kutatás gyakorlati alkalmazására

A különböző módszerek eredményeinek ismeretében vizsgálati eljárásrend dolgozható ki, vasúti hidak és történeti épületek falazott szerkezeteinek állapotvizsgálatára. A kidolgozandó vizsgálati módszertan jelentősen csökkentheti vagy akár nélkülözheti a jelenleg gyakran alkalmazott roncsolással járó vizsgálatokat. A javasolt roncsolásmentes és minimális roncsolással járó vizsgálati módszerek alkalmazásával a habarcsszilárdság becslése megbízhatóbbá válik, ezáltal a falazatszilárdság tervezési értékének megállapítása során alkalmazandó parciális tényező értéke csökkenthető.

Vonatkozó saját publikációk jegyzéke

Török Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Történeti építmények teherviselő falazatainak állapotvizsgálata roncsolás nélkül, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet *Épületeink és műemlékeink védelme*, 2016.

Török Brigitta, Dr. Len, Adél, Dr. Orbán, Zoltán: Salt content analysis of historic masonries with SEM, *Pollack Periodica* 12, 3 pp. 99-108. , 10 p., 2017.

Orbán, Zoltán, Dormány, András, Török, Brigitta: Hidak állapotvizsgálata kombinált szerkezet-diagnosztikai módszerekkel, In: anon (szerk.) *Építményeink 2018*, Budapest, Magyarország, Konferencia Iroda Bt., pp. 33-34. 2 p., 2018.

Dr. Orbán Zoltán, Török Brigitta, Dormány András: Műemlék épületek tartószerkezetének állapot-vizsgálata, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet *Épületeink és műemlékeink védelme*, 2018.

Balla Brigitta: Historic masonry diagnosis reliability of single and combined minor- and non-destructive techniques, *Pollack Periodica conference abstract book*, 2018.

Dr. Orbán, Zoltán, Török, Brigitta, Dormány, András: Assessment and rehabilitation of heritage structures helped by combined non-destructive tests (In: Tamás, Molnár; Aleksandra, Krstić-Furundžić; Eva, Vaništa Lazarević; Aleksandra, Djukić; Gabriella, Medvegy; Bálint, Bachmann; Milena, Vukmirović Conference Proceedings), 6th International Academic Conference on Places and Technologies, Pécs, Magyarország: Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar Breuer Marcell Doktori Iskola, pp. 64-71. 8 p., 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán, Dr. Len Adél: Assessing the reliability of single and combined diagnostic tools for testing the mechanical properties of historic masonry structures, *Pollack Periodica* 14 : 3 pp. 31-42. , 12 p., 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán, Dormány András: Falazott szerkezetek szilárdság- vizsgálati eredményeinek hasznosítása infrastruktúra létesítmények tartószerkezeti értékelésében, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Építményeink, 2019.

Dormány András, Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Falazott hidak geometriai felmérése georadaros és 3D szkenneléses vizsgálattal, Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Építményeink, 2019.

Balla Brigitta, Dr. Orbán Zoltán: Falazott műemléki épületek roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatainak lehetőségei (Fekete Sas Szálló állapotértékelése) Konferenciárészvétel, absztrakt füzet Épületeink és műemlékeink védelme, 2019.

Balla Brigitta: Boltozott szerkezetű típushidak teherbírás vizsgálata, Sínek világa, megjelenés alatt, 2021.