

Az ultrahangos szilárdságbecslés vizsgálat alkalmazási lehetőségei kő anyagú műtárgyakon és műemlékeken

Szabó Zsófia

Reko Konzult Kft., kőszobrász-restaurátor, zsofiszabo@invitel.hu

Kopecskó Katalin

BME, Építőmérnök és Mérnökgeológia Tanszék, katalin@eik.bme.hu

Salem Georges Nehme

BME, Építőmérnök és Mérnökgeológia Tanszék, sgnehme@yahoo.com

ÖSSZEFOGLALÁS

A magyarországi restaurátori gyakorlatban egyik leggyakrabban előforduló kőfajta a sóskúti durvamészkö. Ennek a kőanyagnak az ultrahangos szilárdságbecslő módszerrel történő vizsgálatát tűztük ki célul annak érdekében, hogy a későbbiekben a vizsgálat eredményei etalonként szolgálva, felhasználhatóak legyenek a kutatók és a restaurátorok számára. A vizsgálat során több kérdés is felmerült, melyekre előtte nem számítottunk, de végül hasznos eredményeket hoztak. Miszerint például a betonnal ellentétben, ahol az elvégzett roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek csak a nyomószilárdsági értékekkel szabadna összefüggést mutatnia, a mészkőnél a kisebb méretű mintatestek nyomószilárdsága kisebb volt, mint a nagyobb élhosszúságúaké, illetve az ultrahang terjedési sebessége a mintatest méretével együtt megnőtt.

Kulcsszavak: ultrahang, durvamészkö, szilárdságbecslés, roncsolásmentes vizsgálat

1 BEVEZETÉS

Szabó Zsófia kőszobrász-restaurátor, a Magyar Képzőművészeti Egyetem volt hallgatója az ultrahangos szilárdságbecslés vizsgálat alkalmazási lehetőségeivel foglalkozott szakdolgozatában (konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Salem Georges Nehme). A szakdolgozat témaválasztását az indokolta, hogy ezt a roncsolásmentes vizsgálati módszert részletesen megismerhesse a hazai kőszobrász-restaurátor szakma. A szakdolgozatban a külföldi tapasztalatokon túl egy magyarországi kőanyagon elvégzett vizsgálati értékelésével bemutatta a hazai kőszobrász-restaurátorok által eddig nem használt módszer működési elvét, alkalmazhatóságát, a vizsgálat előnyeit, valamint lehetséges korlátait vagy hátrányait. Ezeket foglaljuk össze jelen cikkben.

2 FIZIKAI ALAPOK

2.1 Általánosságban

Ultrahangnak nevezünk minden olyan rugalmas közegben terjedő mechanikai rezgést, melynek rezgésszáma az emberi fül által hallható tartománynál magasabb rezgésszámú. Ez a gyakorlatban 20 KHz és 1 GHz közötti tartományban található rezgéseket jelenti. A hang szó jelen esetben egy olyan nyomáshullámot takar, mely csak rugalmas anyagokban terjed. Az ultrahang egy közegben többféle hullámként terjedhet tovább, mint P-hullám(elsődleges, longitudinális hullám, a rezgések a hullám terjedési irányával párhuzamosak), S-hullám(másodlagos, transzverzális hullám, a rezgések a hullám terjedési irányára merőlegesek), L-hullám(Love-hullámok, fe-

lületi hullámok, rezgések a felület síkjában a terjedési irányra merőlegesen), R-hullámok (Rayleigh-hullámok, felületi-, határfelületi hullámok, elliptikus rezgések).

Az ultrahangra is érvényesek a hangtan szabályai, azzal a különbséggel, hogy a terjedési sebessége kevésbé, de frekvenciája lényegesen nagyobb a hallható hangokénál, így a különböző közegekben eltérő értékeket ad. Az ultrahang terjedési sebessége homogén anyagon belül állandó, az anyag rugalmas jellemzőitől függ.

Általánosságban képlettel kifejezve:

$$\lambda = v / f \quad (1)$$

ahol (v) = sebesség (λ) = hullámhossz (f) = frekvencia

Ezt azért fontos megjegyezni, mert ultrahanggal csak a $\lambda/2$ vagy ideális esetben a $\lambda/3$ nagyságú hibák mutathatóak ki. Anyagvizsgálati módszerként történő alkalmazásakor azt használják ki, hogy szilárd testekben egyenes vonalban terjed és a határfelületekről visszaverődik.

Az ultrahang előállítására a diagnosztikában kétféle lehetőség adott: (i) piezoelektromos vagyis egy poláris tengellyel rendelkező kristályból meghatározott irányban kivett lemezzel, pl.: kvarc; (ii) elektrosztrikciós pl.: polikristályos báriumtitanáttal.

A legtöbb általunk is használt eszköz piezoelektromos elven működik, melyekben kvarckristályt használunk az ultrahang hullámok gerjesztésére és felfogására.

A vizsgálati módszerek alapvetően két típusba sorolhatóak: Hangátbocsátás elvén alapuló eljárás, melyet leginkább olyan esetekben használják, ahol a mérni kívánt tárgy oldalai párhuzamosak egymással. Előnye a nagyfokú érzékenység, viszont a hiba távolsága a felülettől nem állapítható meg. Másik lehetőség az Impulzus-visszhang módszer, melynél az ultrahang anyagban való állandó sebessége miatt - egy etalon darabbal történő kalibrálás után - állapítható meg a tárgy vastagsága. Ennek megfelelően, ha a tárgyban valamilyen hiba található, akkor az a kijelzőn szintén megjelenik. Erre az a magyarázat, hogy a kijelzőn megjelenő két csúcs közül az első (jobbra) az az érték, mikor a hang belépett a tárgyba, ezzel egy másik közegbe. A második csúcs a tárgy másik oldaláról visszaverődött hang jele. Mivel a távolság mindig egyenesen arányosan változik az idővel, ezért ha a két végfal között egy másik csúcs is megjelenik (hiba, repedés, más anyag, rétegtépződés), annak távolsága a felülettől, illetve hossza is pontosan meghatározható. A hiba mélységét csak a vizsgálat, az előző mérésre merőleges irányba történő, megismétlésekor lehet megállapítani. Különösen fontos elvégezni a vizsgálatot mindkét irányból, amennyiben olyan anyagot vizsgálunk, melyben kristály-anizotrópiák lehetnek, mert ezen kristályok irányfüggő viselkedése jelentősen befolyásolja a vizsgálat eredményét. Ilyen eset például, mikor márványból készült a műalkotás. Azonban nem csak az anizotrópia lehetőségét kell figyelembe venni, hanem az esetlegesen más anyagból készült betétezők számításán kívül helyezése is helytelen kiértékeléshez, majd restauráláshoz vezethet.

1.2 A vizsgálati módszer korlátai

A vizsgálati módszer használhatóságát korlátozza, hogy a felszín közelében lévő hibák általában nem mutathatóak ki. Ennek mértéke kb.: 20 mm, de ez függ a jel erősítésétől is. Erre az esetre dolgozták ki az ún. SE fejeket, melyek a felülettől számított akár 1 mm-re lévő hibákat is képesek kimutatni (Tóth & Crutzen, 1999).

A másik hiányosság, hogy a hiba típusa nem állapítható meg egyértelműen. Léteznek megfigyelések a hiba alakja és a típusa közötti összefüggésekről, de konkrét, hivatalos vizsgálati eredmény hiányában ezek nem elég megbízhatóak, mert a hibajel amplitúdója több tényezőtől is függhet. Ilyen a mikroszerkezet, a szemcseméret, a hiba távolsága a felülettől, a hiba alakja, a hiba orientációja, hullámforma, stb. Ezen tényezők a következőképpen befolyásolják a mérést és a kiértékelést:

a) A szemcseméret durva szemcsés kőanyagoknál okozhat tévedést, amennyiben a nagyobb szemcsék nagy háttérzajt okoznak, illetve a felület egyenetlensége miatt a vizsgálófej nehezen helyezhető el megfelelően a felületen.

b) Amennyiben a hullámunk transzverzális hullám, figyelembe kell venni, hogy az folyadékokban nem terjed, így fontos tudni a minta vagy vizsgált tárgy vízzel való telítettségét a megfelelő kiértékelés érdekében. Ezen felül, mivel a transzverzális hullám hossza nagyjából a fele a longitudinális hulláménak, ezért a detektálható hibák nagysága is kisebb lesz.

c) A hiba orientációja annál nagyobb eséllyel mutatható ki, minél inkább merőleges a méréshez használt hullámokra.

d) A hiba alakjának kimutathatósága csak a méretétől függ. Érthetően minél nagyobb, annál valószínűbb, hogy jelet ad a kijelzőn.

Túl a már említett hibajelenségeken, előfordulhat, hogy hamis hibajelet kapunk, vagyis a készülék hibát mutat ott is, ahol valójában nincsen hiba. Ennek több oka is lehet:

- az elektromos egységek hibás elrendezése folytán fellépő interferencia,
 - törött adófej, mely a kiadott jelet megzavarja,
 - a csatolóközegben létrejövő légbuborék miatt,
 - a különböző élekről visszavert hullámok, tehát vizsgált tárgy alakjától is függ,
 - a szemcsehatárok miatt,
 - a hullámforma megváltozása miatt, vagyis transzverzálisból longitudinális vagy fordítva,
 - a könyagban található esetlegesen hegesztett fémcsapok kötéseinek, a koronáról, a gyökről vagy a hőhatásövezet határáról visszaverődő hullámok.
- A már említett csatoló közegeknek több szempontnak kell megfelelniük:
- nedvesítse mind a vizsgálófejet, mind a vizsgált felületet;
 - akadályozza meg a levegő bejutását a vizsgálófej és a vizsgált felület közé;
 - viszonylag szabad mozgást engedjen a vizsgálófejnek;
 - lehetőleg minél inkább töltsön ki minden egyenetlenséget, hogy sima felület álljon rendelkezésre;
 - könnyen használható és eltávolítható legyen és ne károsítsa a vizsgált tárgyat; a - csatoló közeg minél vékonyabb réteget képezzen, hogy az ne befolyásolja az ultrahang terjedési irányát.

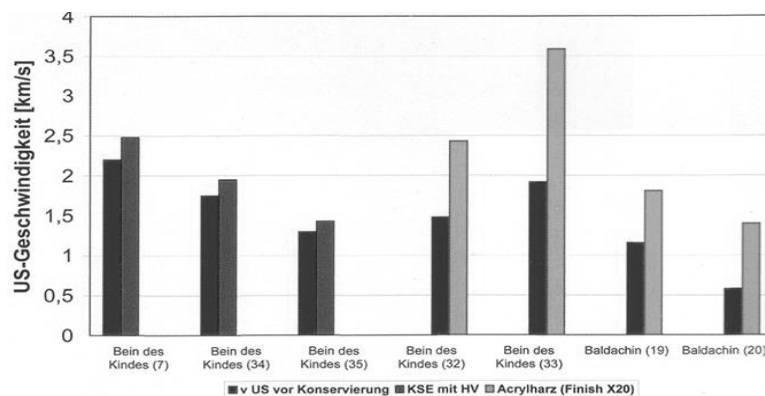
A vizsgálatok dokumentálása szintén nagyon fontos feladat. Ezért a digitális technológia bevonásával továbbfejlesztett készülékek kerülnek egyre inkább előtérbe, mert ezen technológia nemcsak a megbízhatóságát növeli a vizsgálatoknak, hanem sok egyéb előnnyel is rendelkezik a régi típusú, analóg berendezésekkel szemben. Ezek közül fontos megemlíteni, hogy tárolni képes a kalibrációs adatokat, a kalibrálás bármikor reprodukálható, a digitális méréstechnika pontos, a kijelzők lineárisak, beépített önHITELESÍTETT lineáris erősítőket tartalmaznak, a vizsgálati eredmények tárolhatóak, vagyis archiválhatóak, így a későbbiekben is feldolgozhatóak, a tárolt adatok kinyomtathatóak, melyek rögtön beilleszthetőek a vizsgálati jegyzőkönyvbe.

A készülékek képesek továbbá arra is, hogy a hitelesítési adatokat is eltárolják, így biztosítva van a reprodukálhatóság, ugyanis minden vizsgálatot végző személy ugyanazon beállítással tudja a vizsgálatot elvégezni. A beállítások és a mérési adatok a feldolgozó számítógépen keresztül más számítógépekre átvihetők (telefon, modem vagy internet segítségével). A mérést végző személy adatainak és a mérés dátumának tárolásával a felelősség is behatárolható.

3 KÜLFÖLDI ALKALMAZÁSI PÉLDÁK A RESTAURÁLÁSBAN

3.1 A baseli La Roche gyermeksíremlék és a Müncheni Győzedelmi kapuk

Mindkét helyszínen többfajta márványanyaggal találkoztak a restaurátorok, melyek kisebb-nagyobb mértékben mutattak károsodási folyamatokat. Az erősen meggyengült részekben, több mintafelületen, különböző szilárdító anyagokkal kezelték az emléket (Clauss et al, 2006). Egyes helyeken kovásv-észterrel szilárdították, míg máshol Motema Finish x20-al (poli-metil-akrilát). Mindezeket helyben, fecskendővel juttatták be a könyagba.

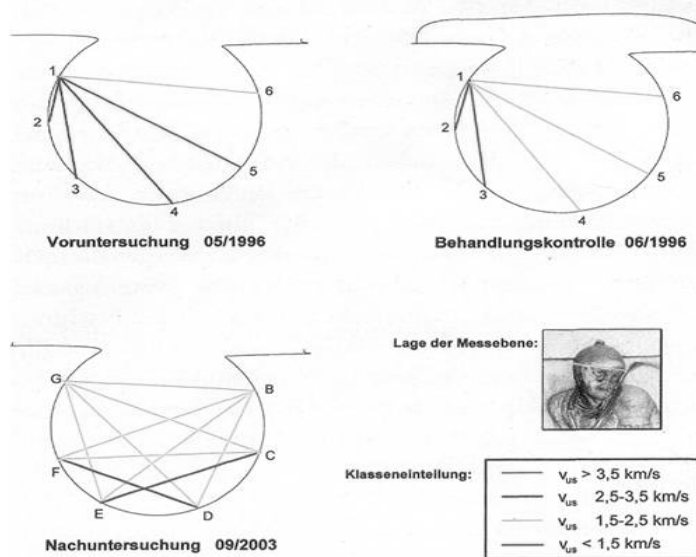


1. ábra baseli síremlék szilárdítás előtti és utáni ultrahangos értékei, a különböző szilárdító anyagok megkülönböztetésével

Az ultrahang sebességének a köanyagban való terjedése mérésével a köanyag romlásának mértékét tudták megállapítani. A magasabb sebességérték jó vagy jobb állapotú köanyagra utal, míg az alacsony sebességérték a mállott, károsodott részeknél jelenik meg. A kezelni kívánt területeket a szilárdítás megkezdése előtt is megmérték ultrahanggal, hogy a beavatkozás után mért adatokkal legyen összehasonlítási alapjuk.

Az utólagos ultrahangos mérésekből kiderült, hogy ahol akrilgyantát (Motema Finish) használtak szilárdításra, ott az ultrahang terjedési sebessége (és így a szilárdság is) sokkal nagyobb mértékben emelkedett, mint ahol a kovásv-észtert alkalmazták. Ezzel egyrészt igazolni tudták, miszerint az akrilgyantás szilárdítószer sokkal inkább megfelel márványok kezelésére, mint a kovásv-észtert tartalmazó anyagok, másrészt az 1. ábrán is látszik, hogy 60-140%-kal javult a szilárdított részek megtartása, így valóban sikeres volt a beavatkozás. Tehát a legsötétebb oszlopok a konzerválás előtt mért adatok, a sötétszürkék a kovásv-észterrel szilárdított helyek adatai ugyanazokon a pontokon, a világosszürke oszlopok pedig az akrilgyantával szilárdított részek.

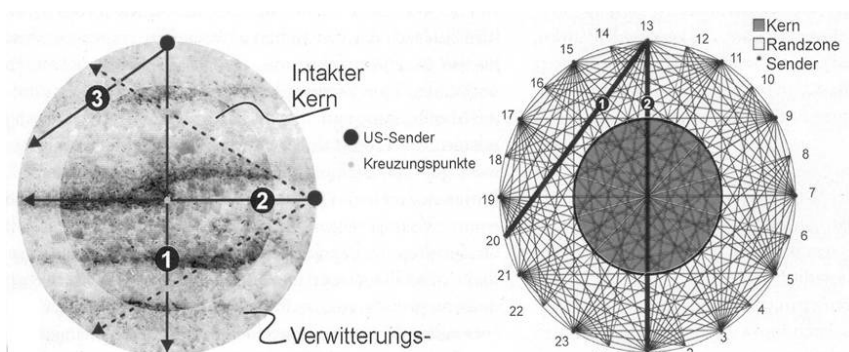
A müncheni kapuk esetében is a márvány köanyag szilárdságának megállapítására és az alkalmazott szilárdító anyag hatékonyságának igazolásához alkalmazták az ultrahangos szilárdságbecslést (Ettl & Sobott, 1999, 2004). Itt több lépcsőben volt lehetőség a műtárgyat megvizsgálni, minek következményeként igazolható, hogy az évek multával a szilárdítószer kristályosodása nagymértékben befolyásolta a márvány szilárdságát.



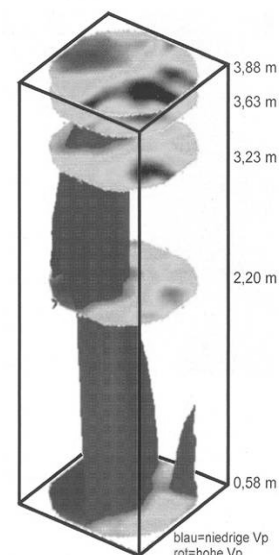
2. ábra A müncheni kapu egy figurájának fején mért szilárdsági értékek

3.2 A potsdami Marmorpalais

Az épületen alkalmazott Prieborn-i márvány, mely egy sziléziai márványtípus, anyaga több különböző, de jellegzetes sérülést mutatott. A durva felületeket légköri szennyeződésekkel és gipszből álló kéreg vonta be, ami szerkezeti károsodásra is enged következtetni a kőanyagon belül. Ebben az esetben is elsősorban a kőanyag átvételi állapotának felméréséhez nyújtott segítséget az ultrahangos vizsgálat (Siegesmund et al, 2000). Mivel az ultrahang terjedési sebessége a vizsgált anyag minőségétől, így például a homogenitásától is függ, a szilárdság felmérése fontos információt nyújtott.



3. ábra A márványoszlop ultrahangos vizsgálatának irányai



4. ábra 3D-s ultrahang-kép

Jelen esetben a restaurátorok a hangátbocsátás elvén alapuló vizsgálati típust alkalmazták, melynél a mért távolságból (úthossz) és a terjedési időből ki lehet számítani az ultrahang sebességét. Ebben az esetben a tó felé néző, balkont tartó márványoszlopokat vizsgálták meg, hogy szilárdságuk megfelel-e még statikai tartószeropük ellátásához.

Fontos volt, hogy a vizsgálat közben hová helyezték a mérőfejeket, hiszen nemcsak az egész oszlopon keresztül haladó sebességi értékekre voltak kíváncsiak (3. ábra, bal oldali kép, 1 és 2 áthaladási irányok), hanem a felszíni fellazult, károsodott kéreg értékeire is (3. ábra, bal oldali kép, 3 áthaladási irány). A pontos és hiteles terjedési sebességek és végül szilárdság meghatározásához, a vízszintes tengely irányában teljesen körbe kellett mérni az oszlopot (3. ábra, jobb oldali kép).

Mindezek után megismételték az előbb leírt eljárást a függőleges tengely irányában is 4 magasságban, hogy végül egy 3 dimenziós képet kapjanak az oszlop szilárdságáról. (4. ábra) Ehhez egy kifejezetten a kiértékeléshez megírt számítógépes szoftver áll a rendelkezésükre, melyet egy német cég fejlesztett ki és védetett le. Az ábrán jól látható, hogy az alacsonyabb terjedési sebesség értékek (bal oldali függőleges sötétszürke részek) nagyrészt az oszlop egyik oldalára korlátozódnak, szinte egy csatornát képezve, míg a magasabb sebességi értékek (felső négy szinten jobb oldali sötétszürke foltok) a másik oldalon helyezkednek el. Ilyenkor fontos, hogy a vizsgálatot végző személy ne csak a vizsgálati módszert ismerje és tudja kiértékelni, hanem megfelelő jártassága kell, hogy legyen a restaurálás területén belül is. Ebben az esetben például nem a kőanyag helytelen kiválasztása (irányultság) vagy zárványok okozták ezt az eredményt, hanem az oszlop elhelyezkedése. Ugyanis figyelembe kellett venni, hogy a vizsgált oszlop egy tóparton áll és a tó irányába néző oldalon nagyobb és szélsőségesebb a levegő nedvesgégtartalmának változása, ami végül ezt a vizsgálati eredményt hozta.

4 MAGYARORSZÁGI ALKALMAZÁSI TERÜLETEK

Magyarországon eddig túlnyomó részben csak betonok vizsgálatához alkalmazták ezt a vizsgálati módszert (Balázs & Tóth, 1997), melynek megfelelően az ehhez használt eszközt betonoszkópnak nevezték el.

Dr. Borján József (1981) betontechnológiai kísérletsorozataival saját szilárdságbecslő képleteket és függvényeket hozott létre betonok szilárdságának becsléséhez ultrahanggal történő vizsgálatok során. A szilárdságbecslő függvényeket féllogaritmikus léptékkel ábrázolta. Az ultrahangos szilárdságbecslő függvény általános alakja:

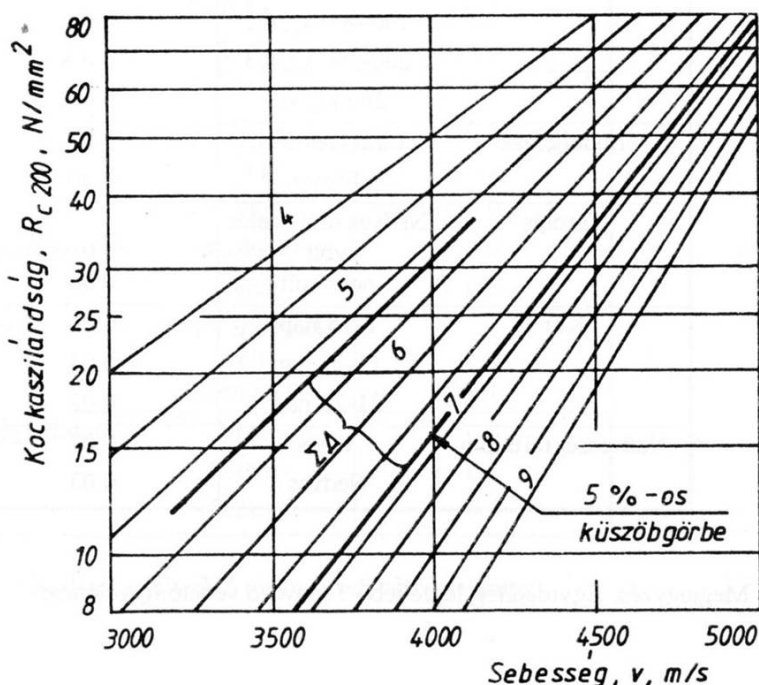
$$\lg R_c = 2,407 - (6,8 - \Sigma \Delta) \cdot 10^{-4} \cdot (5760 - v_m) \quad (2)$$

ahol

R_c = becsült szilárdság 200 mm élhosszú kockán, MPa

$\Sigma \Delta$ = a becslés során figyelembe vehető betontechnológiai faktorok hatása miatti korrekciós tényező

v_m = a mérőhelyenként 3-3 terjedési idő alapján számított terjedési idő átlaga, m/s



5. ábra Borján által javasolt görbemező ultrahang terjedési sebesség méréshez

A ködiagnosztika területén is alkalmazzák ezt a roncsolásmentes vizsgálati módszert. (Gálos & Rozgonyi, 2001; Kertész & Marek, 1973) A Budapesti Műszaki Egyetem és a Göttingeni Egyetem közös kutatása során a kutatók (Török et al, 2006) az Országházba és a Citadellába beépített durva mészkövek fizikai tulajdonságainak változását és mállását elemezték. Vizsgálati módszerként ultrahang terjedési sebességmérést és mikro-fúrásos módszert alkalmaztak, majd az eredményeket összevetették az ugyanabból a bányából származó, de üde kőanyagok vizsgálati eredményeivel. Céljuk volt, hogy megvizsgálják azt a tapasztalatot, miszerint a mállási folyamat hatására jelentős változás állhat be a mészkő kőanyagok felületi rétegeinek fizikai tulajdonságaiban.

5 VIZSGÁLAT ÉS EREDMÉNYEK

5.1 A kőanyag kiválasztása

A vizsgálathoz felhasznált kőanyag eredetét tekintve a sóskúti kőbányából származik és közel 150 éve építették be az Országház falaiba. Ez azért fontos, mert a vizsgálatom célja az volt, hogy a magyarországi restaurátori gyakorlatban oly sokszor előforduló, sóskúti bányából származó kőanyagra jellemző ultrahangos terjedési sebességeket jó közelítéssel megállapítsam. Az alapvető probléma azonban az volt, hogy a restaurátori gyakorlatban előforduló szobrok anyagául szolgáló sóskúti durva mészkő fizikai tulajdonságaiban nagyon eltér attól a kőanyagtól, melyet ma bányásznak Sóskúton. Ez azért jelentett problémát, mert így nem használhattam frissen fejtett, üde kőanyagot vizsgálatomhoz, mivel az nem nyújt megfelelő viszonyítási alapot a régebbi, szobrokhoz alkalmazott kőanyaggal szemben. Ezért volt szükség egy sóskúti bányából származó, legalább 100 éve beépített vagy felhasznált, de jó állapotban lévő, minta és összehasonlítható anyagnak használható kőanyagra. Ezeket a feltételeket az Országházból származó kváderkövek tökéletesen kielégítették (mivel a kváderkövek minden oldalából 5-5 cm vastagságú gipszesedett, kérgesedett és szennyezett részeket először eltávolították, majd ezután kezdték el a kőanyag méretre vágását), így az e köveken mért vizsgálati eredmények felhasználhatók, amennyiben valaki ilyen típusú kőanyagból készült műtárgyat vagy műemléket vizsgál ultrahangos szilárdságmérő készülékkel.

5.2 Vizsgálati terv

A mintatesteket osztályoztuk méretük és jellegük szerint. A ~ 10 cm élhosszúságú mintatesteket az I. sorozatba helyeztük, ezen belül két csoport jött létre, a homogén szerkezetűek az I/1 csoport, míg a nagyobb lyukakkal rendelkező durva szemcsézetűek az I/2 csoport lettek.

A ~15 cm élhosszúságú mintatestek mind homogén szerkezetűek. A továbbiakban, a mérések során a három mintacsoportot külön kezeltük, és összehasonlítási alapként alkalmaztuk az egyes csoportok mintadarabjain mért eredményeket a másik két csoporttal szemben.

a, A vizsgálattal beépített műemléki sóskúti kőanyagra vonatkozó, összehasonlítható és etalon értékeket megismerése, melyeket a jövőben, a durvamészkő szobrok vagy műemlékek ultrahangos terjedési sebesség mérés vizsgálatoknál vizsgálatához lehet felhasználni,

b, Fontos részét képezte a vizsgálatnak az a szempont is, hogy mivel lehetőségünk volt több méret vizsgálatára is, megfigyelhető lesz-e változás a terjedési sebességekben a mintatestek élhosszától függően,

c, Milyen különbség tapasztalható az eltérő szerkezeti (szöveti) felépítésű mintacsoportok között.

Először a mintatestek méreteit mértük meg digitális tolóméterrel, majd a visszapattanási értékeket vizsgáltuk Schmidt-kalapáccsal. Ezután a minták ultrahang terjedési sebességeit mértük. Végül minden mintatestnek megállapítottuk a nyomószilárdságát a törőerők mérésével, melyet összehasonlítottunk mind az ultrahangos, mind a Schmidt-kalapácsos mérések eredményeivel.

5.3 Az eredmények kiértékelése, következtetések

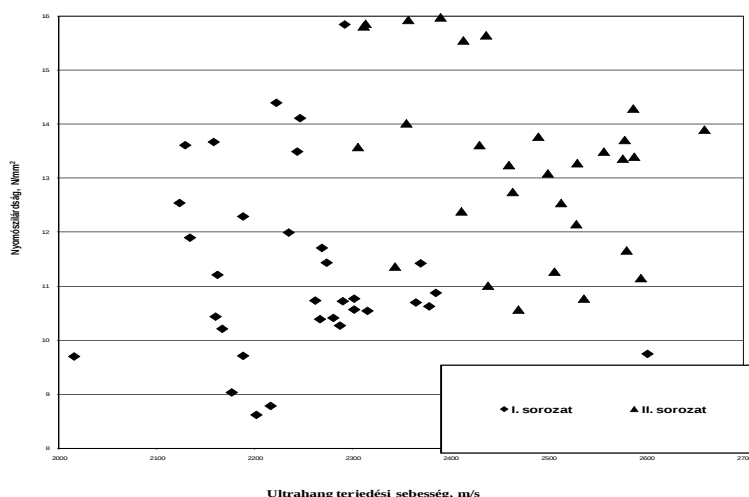
a. A vizsgálati eredmények részletes kiértékelése során összefüggést találtunk a nyomószilárdság és az ultrahang terjedési sebesség között, miszerint minél nagyobb a szilárdsága a kőanyagnak, annál tömörebb is az, így az ultrahang terjedési sebessége is ezzel megfelelő mértékben nagyobb lesz. Ez a betonokra eddig már bizonyított tény, most már a sóskúti durvamészkő anyagra is vonatkoztatható és a továbbiakban valószínűleg minden más természetes építőköre és a képzőművészetben alkalmazott kőtípusokra is.

Ugyanakkor a vizsgálati eredmények alapján (a mintacsoport elemeinek száma-az eredmények szórása) nem tudunk megfelelő etalon értékeket megadni a későbbi sóskúti durvamészkő anyag ultrahangos szilárdságbecslő vizsgálataihoz. Ennek oka, hogy a vizsgálatok során a mért eredmények túl nagy szórást mutattak. Ez több okra vezethető

vissza, mely szerint a mintatestek ugyan ugyanabból a kőanyagból és épületből származnak, de összesen négy kváderkőből. Ezen négy kőanyag, illetve akár a kváderköveken belüli kőanyag porozitása és testsűrűsége is eltérő lehetett. Ez attól is függhetett, hogy milyen messze voltak az egyes minták a felszíntől, mennyire mosódott már ki a szemcsék közül a kötőanyag, vagy például a pórusok és kapillárisok irányítottsága is befolyásolhatta a mérési eredményeket.

A mintacsoportok kialakításakor kértük, hogy a kváderkövek méretre vágása során fontos, hogy a felszíntől számított min. 5 cm-es réteget vágjanak le, pontosan a fent említett okok miatt. Fontos lett volna a mintatestek eredeti helyzetét a kőanyagon belül megjelölni, de sajnos ez utóbbi nem történt meg.

Mindettől függetlenül, véleményünk szerint, ha a jövőben lehetőség nyílik egy olyan vizsgálatsorozatra, amelyben sokkal több mintatest áll rendelkezésre, és amelyek méretre vágásakor jelölve van az elhelyezkedésük az eredeti kőanyagon belül, ezzel megbízható és a továbbiakban összehasonlításként felhasználható eredményekhez juthatunk. Így az egyes mintatestek saját porozitása, testsűrűsége és sűrűsége megfelelő támpontot tud adni az esetleges szórás okainak keresésekor.



6. ábra I/1 és II sorozat nyomószilárdság és ultrahang terjedési sebesség értékeinek összehasonlítása

b, A betonokon eddig végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a mintatestek méreteinek a dolgozatban végzett vizsgálatok közül csak a nyomószilárdság értékével szabadna összefüggést mutatnia oly módon, hogy az ugyanolyan anyagból készült mintáknál minél kisebb egy mintatest, annál nagyobb a nyomószilárdsága. Az ultrahang terjedési sebességét nem befolyásolhatja a méretváltozás.

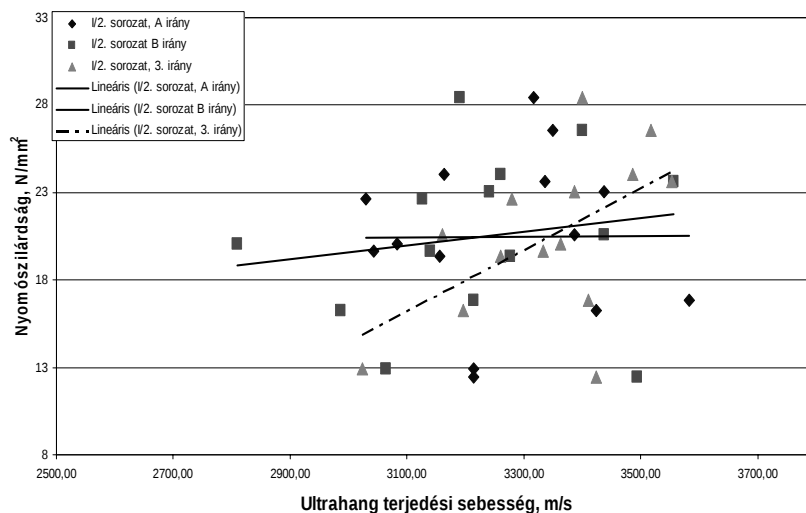
Jelen vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy az általunk vizsgált durva mészkö mintacsoportokra ez nem igaz. A mérések azt mutatták, hogy a homogén szerkezetű I/1 és II sorozat összehasonlításakor egyrészt a kisebb méretű mintatestek nyomószilárdsága kisebb volt, mint a nagyobb élhosszúságú mintatesteké, másrészt az ultrahang terjedési sebessége a mintatest méretével együtt megnőtt (6. ábra).

Ezen eredmények indokának pontos megértéséhez további vizsgálatokra van még szükség.

c, A vizsgálat bebizonyította, hogy az ugyanolyan méretű, homogén illetve lyukacsos felépítésű mintatestek mérési eredményeiben eltérés tapasztalható, miszerint a lyukacsos szerkezetű kőanyag makropórusai közötti kötőanyag sokkal tömöttebb, emiatt magasabb nyomószilárdsági eredményeket eredményezett, mint a homogén mintatesteké. Ez az ultrahang terjedési sebesség értékekkel is összhangban van.

Ezen túlmenően elmondható, hogy különbségek nem csak a láthatóan eltérő szerkezetű mintatest sorozatok között van, hanem a fent említett porozitás, elhelyezkedés, stb.

indokok miatt az egyes sorozatokon belül is. Ennek oka a kőanyag szerkezetében lévő pórusok és ásványok irányultsága lehet, melyek tengelyenként eltérő mérési eredményeket adtak. Az 7. ábrán látható diagramnál különösen fontos, hogy a három illesztett lineáris függvény közül kettő (egyenes vonalak) nagyjából hasonló irányítottságú, mely két mérési irány a nyomószilárdságra merőleges volt. A harmadik lineáris (szaggatott) mutatja azt az irányt a terjedési sebességekkel összefüggésben, mely megegyezik azzal az iránnyal, melyen a nyomószilárdságot mértem. Ez azért lényeges, mert itt jól látszik az a., pontban említett szilárdsági összefüggés. Az ábráról azonban az is leolvasható, hogy a későbbiekben, a helyszíni méréseknél sem lesz figyelmen kívül hagyható a mérési irány figyelembe vétele, hiszen, teljesen más vonal mentén kell majd keresni a megfelelő értékeket. Viszont a gyakorlatban egy szobornál igen kicsi az esély, hogy pontosan meg tudjuk állapítani, éppen melyik irányban végezzük a mérést, vagy hogy egyáltalán pont az irányultsággal párhuzamosan vagy merőlegesen tudjunk méréseket végezni. Ezért a további vizsgálatoknál minden esetben pontosan fel kell jegyezni a mintatest irányát az eredeti kőanyagon belül, így az egyes kőanyagokon belüli összes irányultságot figyelembe véve, elkülönítve lehet kezelni a mérési irány szerint a mintacsoportokat és a későbbiekre vonatkozóan felhasználható eredményeket biztosítani. Ezután a gyakorlatban csak a mérések számát kell növelnünk az egyes mért pontokon, hogy ki tudjuk választani a megfelelő értékekhez tartozó egyenest.



7. ábra I/2 sorozat mindhárom irányában mért nyomószilárdság és ultrahang terjedési sebesség értékeinek összehasonlítása

6 ÖSSZEGZÉS

Véleményünk szerint a ultrahangos szilárdságbecslő vizsgálat igen fontos szerepet tölthetne be a magyarországi kőszobrász-restaurátori gyakorlatban. Alkalmazhatóságára természetes kőanyagokon több lehetőséget is bemutattunk: állapotfelmérés a szilárdítás szükségességének megállapításához, szilárdítás előtti és utáni eredmények összehasonlításával a szilárdítás megfelelő mértékének igazolása, háromdimenziós mérések a kőanyag szilárdsági mértékének grafikus ábrázolásához (statikai felmérés), mállási kérgék vizsgálata a későbbi helyszíni vizsgálatok pontosabb kiértékeléséhez szükséges kiegészítő adatként, mintatestek vizsgálata a helyszíni mérések összehasonlító adataihoz.

Mindezen lehetőségeken kívül a vizsgálati típus alkalmazható lehet a kiegészítések és betétek megfelelő szilárdságának felmérésére, a helyszínen a szállíthatóság eldöntésének igazolá-

sára és a repedési mélységek meghatározására. A jövőben további vizsgálatok szükségesek annak megállapításához, hogy ezen alkalmazási területeken az ultrahangos szilárdságbecslő vizsgálat a természetes építőkövek esetében is valóban megfelelő és felhasználható, mint diagnosztikai módszer.

IRODALOMJEGYZÉK

- Balázs Gy., Tóth E. (szerk.) 1997: *Beton- és vasbetonszerkezetek diagnosztikája I.*, Általános diagnosztikai vizsgálatok, Műegyetemi Kiadó.
- Borján J. 1981: *Roncsolásmentes betonvizsgálatok*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Clauss, H.; Ettl, H.; Pfanner, M. 2006: Das Kindergrabmal in La Roche in Basel, *Restauro*, **3**: 174-181.
- Csizmadia F.-né 2004. *Roncsolásmentes vizsgálatok*, PowerPoint bemutató, Szegedi Egyetem.
- Ettl, H.; Pfanner, M. 2004: Die Marmorreliefs des Münchner Siegestors, *Restauro*, **7**. 454-460.
- Ettl, H.; Sobott, R. 1999: Ultraschallmessungen an in-situ konservierten Marmorreliefs des Siegestors in München, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **1**, Worms am Rhein, Vol 1, pp.92-102.
- Gálos, M.; Rozgonyi, N. 2001: Ultrahanghullám terjedési sebesség meghatározása fúrási magokon, *Bányászati és Kohászati Lapok - Bányászat*, **134**(7): 528-532.
- Heasler, P.G.; Taylor, T.T.; Doctor, S.R 1997: Statistically Based Reevaluation of PISC-II Round Robin Test Data, Prepared for Division of Engineering, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC., 1990; //Impact of PISC Results on Codes, Standards and Industrial Practice, The Materials Challenge, News Bulletin of the Institute for Advanced Materials, JRC Petten, The Netherlands., June, Vol. 10. p. 4-6.)
- Kertész, P.; Marek, I. 1973: Ultrahanghullámok a közetfizikai minősítésben. *Építőanyag*, **25**(4): 121-128.
- Palotás B.; Éva A. 2005: Roncsolásmentes anyagvizsgálat, Hibakereső vizsgálatok, Anyagismeret, BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, pp.36-45.
- Siegesmund, S., Pretzschinger, C., Ruedrich, J., Lindner, H., Weiss, T., Richter, I., Richter, D. & Woyde, M., 2000a: Deterioration characteristics of columns from the Marmorpalais Potsdam (Germany) by ultrasonic-tomography. Proceedings 9th International congress on deterioration and conservation of stone, Venice, Volume 2, pp.145-153.
- Török, Á.; Siegesmund, S; Müller, Ch.; Hüpers, A.; Weiss, T. 2006: Az Országház homlokzatát és a Citadellát alkotó durva mészkövek szövetének hatása időállóságukra, Mérnökgeológia-Közetmechanika Kiskönyvtár **2**, Mérnökgeológia- Közetmechanika., pp.235-244.
- Tóth L.; Critzen, S. 1999: Roncsolásmentes vizsgálatok, azok megbízhatósága és következményei, Roncsolásmentes vizsgálati módszerek, Miskolci Egyetem Bay Zoltán Intézete és a Joint Research Institute, Miskolc-Petten, , pp. 17-19, 30-39.