2.3 2.5 Beton vizsgálata és szilárdulási folyamatának követése roncsolásmentes módszerekkel

Tárgyszavak: beton; cement; roncsolásmentes vizsgálat; ultrahangvizsgálat.

A mai civilizációs infrastruktúra elemei, sőt létesítményei részben vagy egészben cementkötésű szerkezeti anyagokból, főként betonból készülnek a használati alkalmasságukat, tartósságukat, de még megjelenésük esztétikumát is érintő magas és szigorú követelményekkel.

A beton mint építőanyag tulajdonságait kizárólag kiindulási anyagainak jellemzői és keverékük összetétele, valamint a keményedési folyamat feltételei határozzák meg. A betonban a megkötés és megkeményedés folyamán kialakuló hibák, károsodások jóvátehetetlenek. A friss beton napfény elleni elégtelen védelme egy adalék helytelen aránya, vagy az alkalmazott részecske méretű kőzetapríték nedvszívásának elhanyagolása tervezett rendeltetésére visszavonhatatlanul alkalmatlanná teheti a betont.

Ezért elengedhetetlen a tájékozódás a frissen beépített beton alapvető anyagi jellemzőiről és azok időbeli változásáról, mégpedig a nem mindig reprezentatív mintadarabok helyett magán az építményen, roncsolásmentes vizsgálati módszerek segítségével.

A kezdetben folyékony beton

– kb. 12 óra alatt köt meg (vagyis válik merevvé),
– több nap kell megszilárdulásához (megkeményedéséhez), végül
– hetekbe telik, amíg eléri tervezett szilárdságát és teherbíró képességét.

Mivel ezeknek a beton minőségén kívül külső tényezőktől is függő folyamatoknak a lezáródását nem lehet előre jelezni, az építést meggyorsíthatja, olcsóbbá is teheti a beton állapotának követése megbízható mérésekkel.

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek

A betonkeményedés lefolyásának roncsolásmentes vagy csekély roncsolással járó vizsgálatára a különböző elveken nyugvó eljárások széles spektrumát fejlesztették ki. Ezek egy része a beton valamely mechanikai jellemzőjét, így

– egy betonba eresztett elem kihúzásához szükséges erőt, vagy
– fémszög friss betonba való behatolási mélységét

mérik.

Ezen kívül több vizsgálati elvet alkalmaznak:

– Az ún. érettségi fok mérése (maturity method), amellyel jól lehet követni a beton keményedését, azon alapul, hogy a betonnak korával és hőmérsékletével – egyszerűsítve – kifejezett érettségi foka egyértelműen összefügg nyomószilárdságával, amely így a betonban végzett egyszerű hőmérsékletméréssel előre jelezhető.
– A hanghullámok betonkeményedés-vizsgálatra való felhasználása több elven lehetséges. Leginkább a hanghullámok különböző közegekben mért terjedési sebességéből következtetnek a beton keménységére.
– Hanghullámokkal dolgoznak a visszhangmérésen alapuló eljárások is: a már 1988-ben közölt „impact-echo” és a 2003-ban ismertetett „impuls-echo”.
  Megjegyzendő, hogy az akusztikai mérések eredményei nem általánosíthatók, nagy mértékben függnek a beton összetételétől, leginkább annak kőzettörmelék-, ill. kavicsarányától.
– Német kutatók 2001. évi közleménye beszámol a beton ez ideig csak laboratóriumi célú, mágneses magrezonancián alapuló vizsgálatának (NMR, nuclear magnetic resonance) épületen alkalmazható, hidrogénmag-rezonancián alapuló változatáról (H-NMR). Jelenleg folynak a mélységi mérési eredmények és a nyomófeszültség közötti összefüggés tanulmányozására szolgáló kísérletek.

Az ultrahang visszaverődését mérő új módszer

A német és amerikai egyetemi kutatók által a beton és cementkötésű szerkezeti anyagok keményedésének folyamatos megfigyelésére kifejlesztett új roncsolásmentes eljárás a vizsgálati anyag és egy acélle-

mez határán visszavert nyíróhullámok reflexiós együtthatójának mérésén alapul. A friss betonra erősített acéllemezen elhelyezett ultrahang-érzékelő küldi és veszi a nyíróhullám-jeleket, majd a kiértékelő számítógépbe továbbítja őket. A fejlesztési kísérletekkel meghatározták, hogy a sorozatban mért reflexiós együttható értékeiből mennyiben lehet következtetni a beton hidratálódásának előrehaladására és bizonyos tulajdonságainak ezzel összefüggő alakulására.

Hanghullámok keletkezése, terjedése és visszaverődése

Szilárd testek (pl. beton) mechanikai impulzus általi gerjesztésekor

- kompressziós,
- nyíró és
- felületi (vagy Rayleigh-féle)

tovaterjedő rezgés keletkezik. A háromféle hullámzás egyenletesen, de különböző sebességgel terjed, a leggyorsabban a kompressziós, a „leglassabban” a felületi hullámzás.

Az egyes hullámfajták terjedési sebességének viszonyát kizárólag az adott szilárd anyag harántirányú nyúlása határozza meg. A $\mu = 0{,}18$-as harántnyúlású normál betonban

- a kompressziós és nyíróhullámok terjedési sebességeinek viszonya 0,62,
- a kompressziós és felületi hullámoké 0,57.

A hullámfajták a részecskék általuk keltett mozgásformájában is különböznek egymástól:

- kompressziós hullámok hatására a terjedés irányával párhuzamosan,
- nyíróhullámok hatására arra merőlegesen rezegnek nyugvópontjuk körül,
- a test felülete mentén terjedő hullámok elliptikus részecskemozgást keltenek, amelynek amplitúdója rohamosan csökken a felülettől való távolsággal.

A hanghullámok terjedési sebességét

- a sűrűség és
- a rugalmassági állandók (rugalmassági modulus, nyírómodulus, harántirányú nyúlás) határozzák meg.

Határfelületet két egymással érintkező, különböző akusztikus tulajdonságú anyag képez. Az ilyen sík határfelületre érkező hullámok részben áthaladnak, részben visszaverődnek rajta. A visszavert és áthaladt

hullámok amplitúdójának viszonyát a határ két oldalán levő anyagok Z akusztikus impedanciájának (hangellenállásának) különbsége határozza meg és az R reflexiós (visszaverődési) együttható jellemzi. Az anyagok akusztikus impedanciája sűrűségüktől *(ρ)* és a hangsebességtől *(v)* függ:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{1}$$

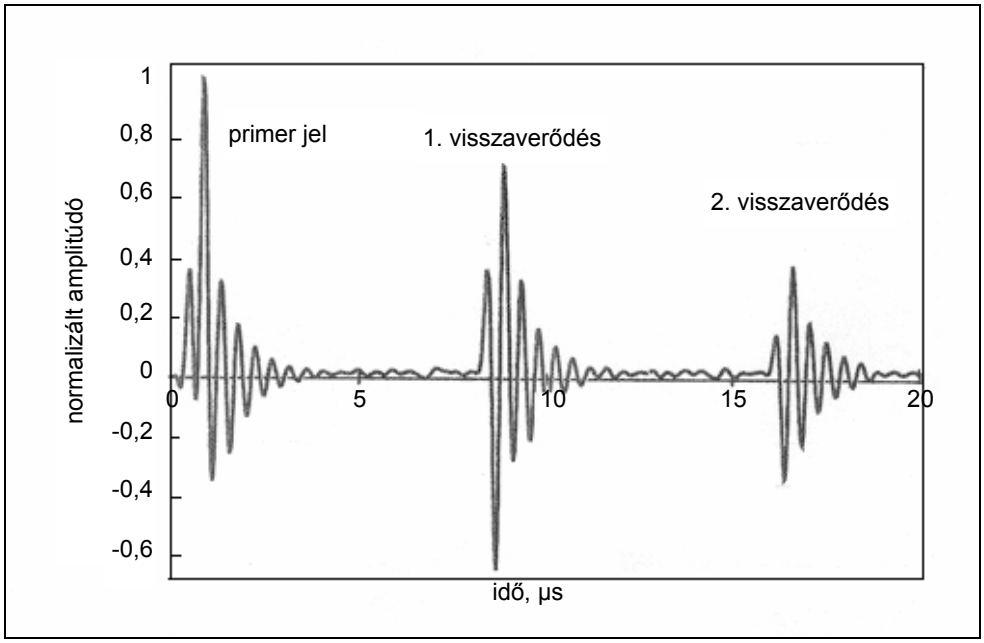
$$Z = \rho v \tag{2}$$

A hanghullámok visszaverődésén alapuló vizsgálati módszer részletei

Az eljárás nagyfrekvenciájú nyíróhullámú visszaverődési vagy reflexiós együtthatójának mérésén alapul, amely betonban a cementnek a hidratálódása nyomán bekövetkező, hanghullámokkal szembeni ellenállásával együtt változik. A reflexiós együtthatót az egymást követő visszaverődések amplitúdójából számítják ki.

A már említett módon a friss betont fedő, kb. 12 cm vastag acéllemezre rögzített ultrahang-érzékelő nyíróhang-impulzust bocsát ki, amely a lemezen áthaladva merőlegesen éri a betont. A még folyékony beton a nyíróhullámok egészét visszaveri, mivel azok folyadékban nem tudnak terjedni, itt tehát a reflexiós együttható értéke 1. Idővel a hidratálódás termékei átmenetet hoznak létre a szilárd állapot felé, így a hullámzás részben visszaverődik, részben továbbterjed a betonban, csökkentve a visszavert hullámok amplitúdóját és ezzel az együttható értékét. A csökkenés a keményedő beton hanghullámok terjedésével szembeni egyre kisebb ellenállása következtében folytatódik. A keményedés vége felé az egész folyamat lelassul, a beton reflexiós együtthatója alig, majd tovább már nem változik.

Az új vizsgálókészülék egyszerre a próbatest vagy épületelem két helyén méri a reflexiós együtthatót. Ehhez két, az ultrahang-generátort érzékelővel kombináló, egymástól függetlenül működő egységet különböző mérőcsatornákhoz kell kötni. Az ultrahang-érzékelőhöz a primer jel után a határfelületről visszavert, tehát az acéllemez vastagságát kétszer „megjárt” hullámok jutnak szabályos időközönként *(1. ábra),* mégpedig csökkent amplitúdóval.



1. ábra A primer és visszavert ultrahanghullámok jele

Az acél anyagától és a nyíróhullám frekvenciájától függő csillapítást az okozza, hogy a beton a hullámok egy részét elnyeli. Az elnyelt rész nagysága, majd a reflexiós együttható az acél/levegő-határfelületen végzett mérések eredményéből számítható ki. Ez utóbbihoz a hullámok időben rögzített amplitúdó jeleit (A_1, A_2) át kell vinni a Fourier-transzformáció tartományába:

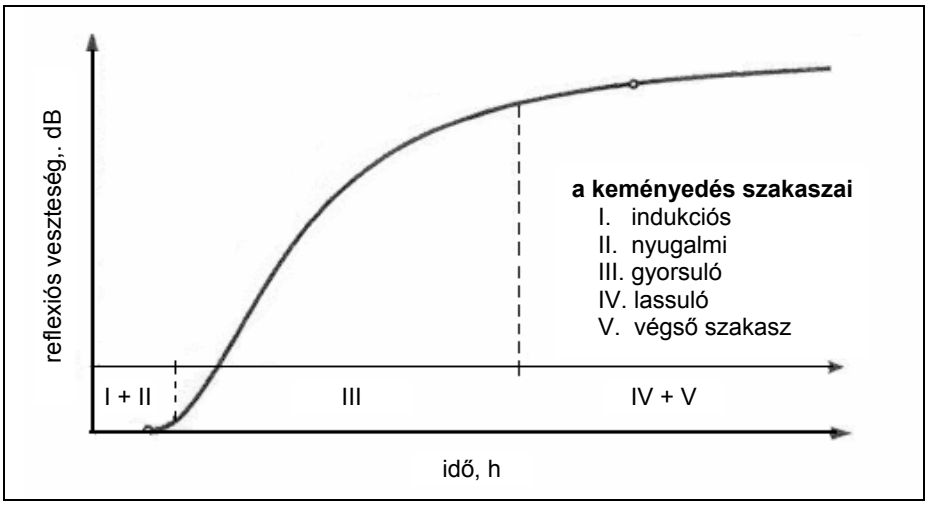
$$R = \frac{A_2}{A_1} \tag{3}$$

az első jelet bizonytalan meghatározása miatt nem lehet bevonni a reflexiós együttható kiszámításába.

Az egyenletben szereplő relatív rezgésamplitúdó-különbségek akusztikai egysége a decibel (dB). Decibelben fejezik ki a gyakorlatban használatos visszaverési (reflexiós) veszteséget, R_v-t, amely nem más, mint a nyíróhullámok beton/acél-határfelületen visszaverődve elszenvedett relatív amplitúdóvesztesége.

$$R_v = -20 \log R \tag{4}$$

A beton/acél-határfelületen a hidratálódás folyamán mért reflexiós veszteség időgörbéjén az indukciós periódustól a telítésig több szakaszt lehet megkülönböztetni *(2. ábra)* és határozottan kijelölni: a cementhidratálódás és -telítődés kezdetének pontját.



2. ábra A reflexiós veszteség alakulása cementkötésű szerkezeti anyagok hidratálódása folyamán

Kísérleti eredmények

A visszaverés elvén a cementet tartalmazó kötőanyagok, azaz beton, híg cementkeverék és habarcs tulajdonságainak leírására használt számos paraméter közül kiválóan lehet mind minőségileg, mind mennyiségileg jellemezni az anyagok keményedési folyamatát, ezen belül

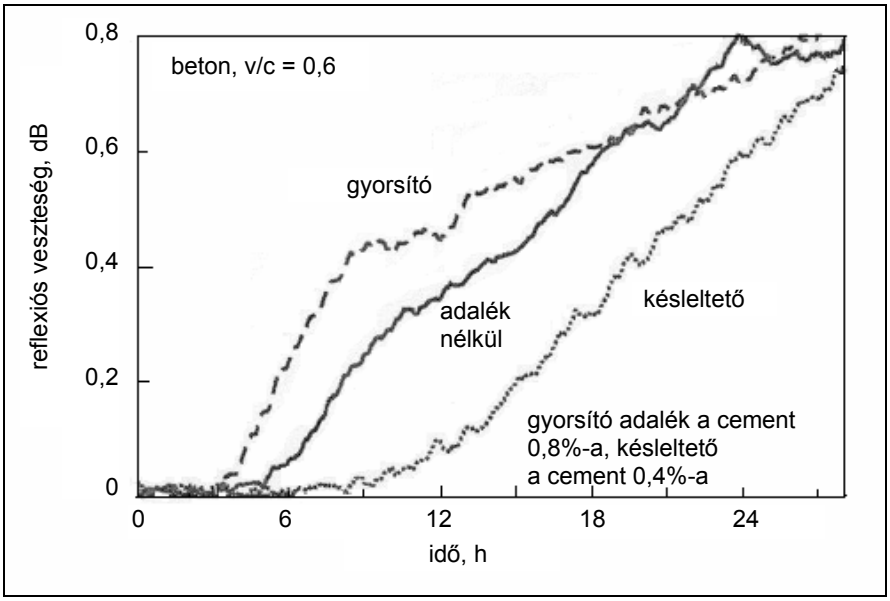
– a nyomószilárdság,
– a nyírómodulus és
– a hidratálódás alakulását.

A beton megkötése és a mért reflexiós veszteség közötti minőségi összefüggés vizsgálatához 0,6-os víz/cement (v/c) arányú,

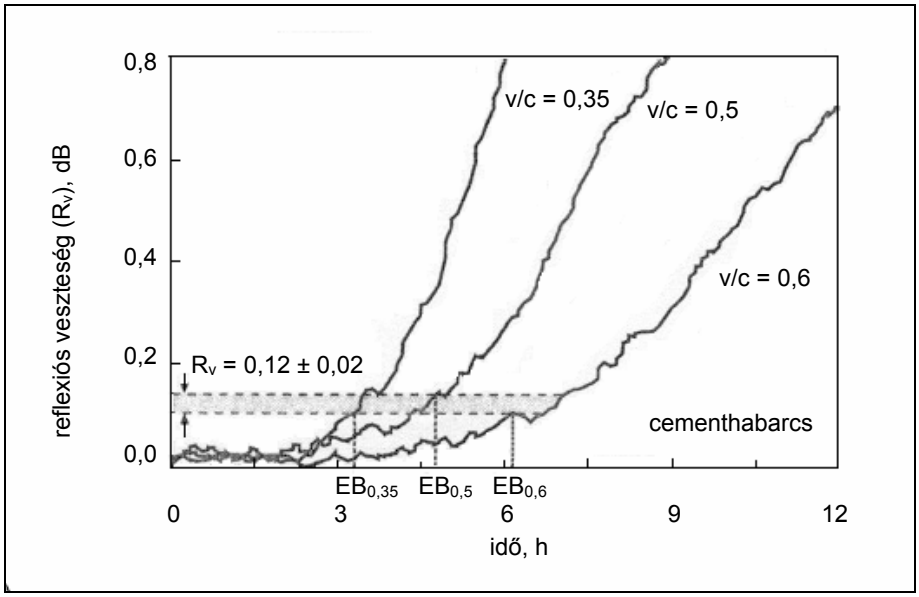
– adalékmentes, továbbá
– gyorsítóval és
– késleltetővel adalékolt

betont használtak.

A visszaverődési veszteség időbeli alakulása jól tükrözi az adalékok hatását a hidratálásra *(3. ábra).*



3. ábra Adalékok hatása az ultrahang-visszaverődésre (időbeli lefutás) keményedő betonban



4. ábra Összefüggés a reflexiós veszteség és a keményedés kezdete között különböző v/c értékű cementhabarcsokban

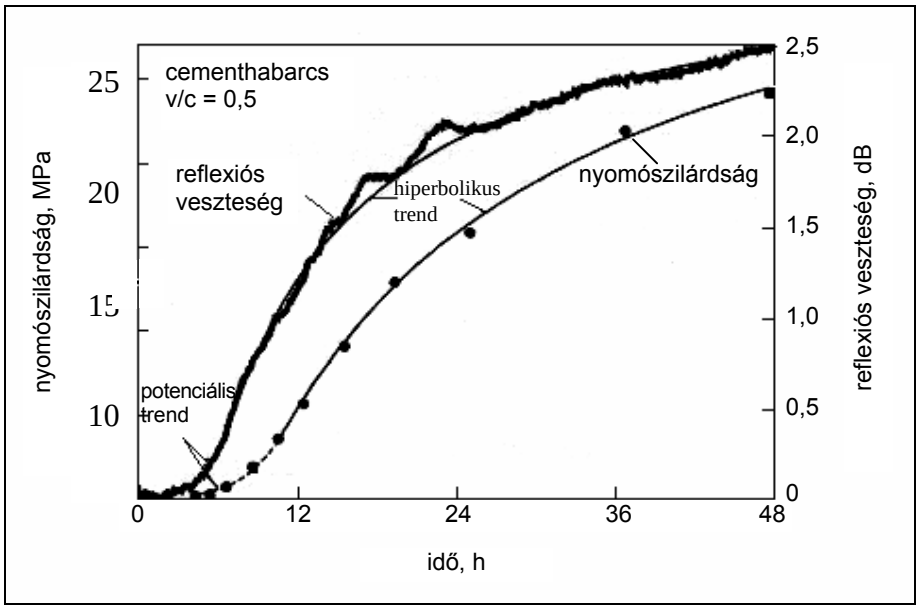
A megkötés kezdete és a reflexiós veszteség közötti mennyiségi összefüggésről különböző víz/cement (v/c) arányú cementhabarcsokkal nyert kísérleti eredmények tanúskodnak, amelyek a hidratálódásnak a

víz/cement arány által befolyásolt kezdeti időpontjának trendjét követik *(4. ábra).* A megkötés kezdetének időpontjában mért reflexiós veszteség értéke azonban függetlenül a habarcs víz/cement (v/c) értékétől, állandó jelleggel R_v = 0,12±0,02 dB.

Ebből arra lehet következtetni, hogy a reflexiós veszteséget közvetlenül határozzák meg a hidratálódó cement belső szerkezetét leíró mutatók. Ez a szerkezet az egyes hidratációs szakaszok összeépülése során, a mikro- és nanométeres dimenziók szintjén alakul ki, tehát valószínű, hogy a reflexiós veszteség a cement más alapvető tulajdonságainak létrejöttét is befolyásolja.

Nyomószilárdság

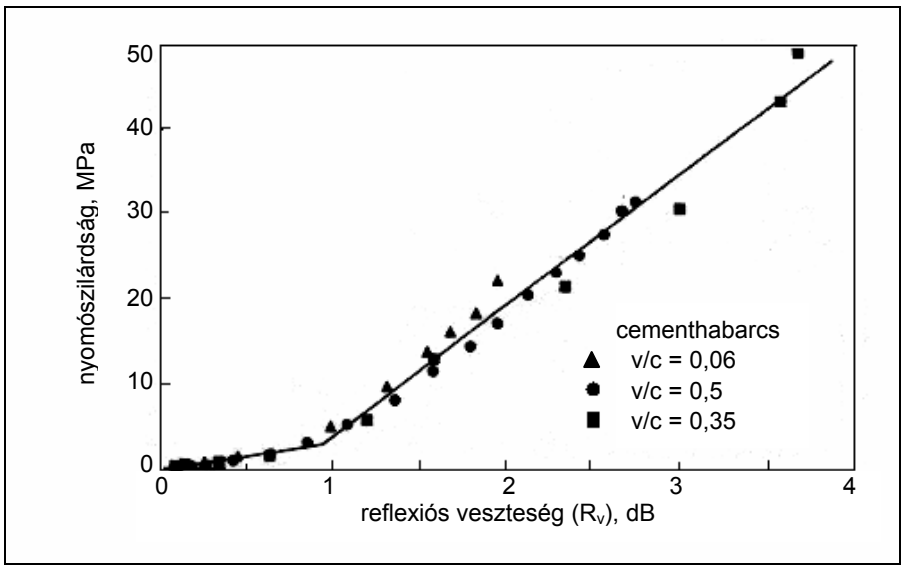
A kísérletekhez használt 0,5 v/c értékű cementhabarcs nyomószilárdsága és reflexiós vesztesége a megkötés folyamán hasonló exponenciális görbe mentén alakul *(5. ábra),* amit portlandcementtel nyert korábbi vizsgálatok már kimutattak.



5. ábra Friss cementhabarcs reflexiós veszteségének és nyomószilárdságának időbeli alakulása

A reflexiós veszteség és a nyomószilárdság hasonló trendgörbéi indokolták a két mutató közvetlen összefüggésének vizsgálatát, amelyet három különböző v/c értékű cementhabarcson végeztek el a megkötés

első négy napja alatt. Megállapítható az értékpárok közötti, v/c-től független lineáris összefüggés *(6. ábra).* Legkésőbb 165 óra elteltével pedig a nyomószilárdság több különféle változatot kínál a cementkötésű építmények nyomószilárdságának roncsolásmentes meghatározására, és ezáltal pl. betonelemek minőség-ellenőrzésére.

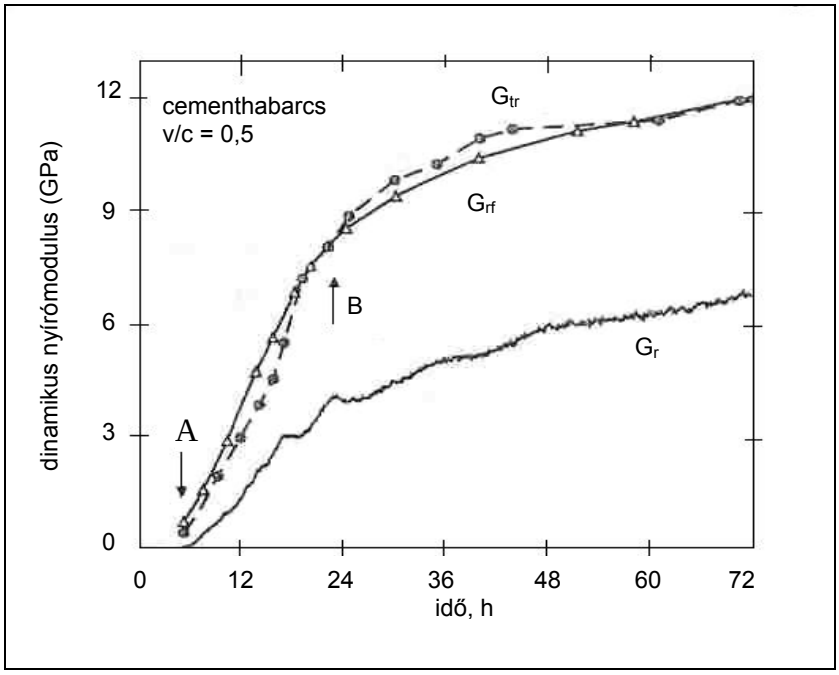


6. ábra Összefüggés friss cementhabarcs reflexiós vesztesége és nyomószilárdsága között

Nyírómodulus

Az eddigi empirikusan megállapított eredmények mellett felvetődik az igény a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak fizikai összefüggésekből levezetett meghatározására. Kérdés tehát, hogy a keményedő cementnek milyen fizikai tulajdonságai befolyásolják elsősorban a reflexiós együttható értékváltozását.

Az (1) és (2) empirikus egyenletek tanúsága szerint ilyen mutatók a sűrűség (amely azonban a cementkötésű szerkezeti anyagok hidratálódása folytán csak kevéssé változik), valamint a hanghullámok ugyanezen idő alatt erősen változó terjedési sebessége. Minthogy pedig ez utóbbi döntő módon a nyírómodulus értékétől függ, célszerűnek látszott a reflexiós veszteség e függésének meghatározása, mégpedig további két módszerrel: a rezonancia-frekvencia és az anyagon áthaladó nyíróhullám-sebesség alapján.



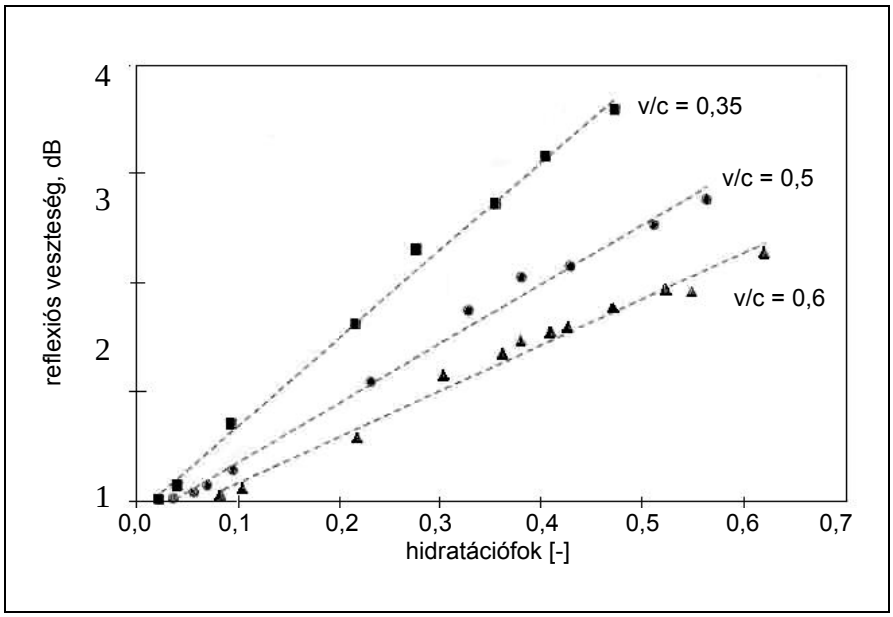
G_{rf} – rezonanciafrekvencia-módszerrel felvett görbe; G_{tr} – transzmisszión alapuló módszerrel felvett görbe; G_r – reflexión alapuló módszerrel felvett görbe.

7. ábra 0,5 víz/cement arányú cementhabarcs rezonanciafrekvencián, hullámvezetésen (transzmisszión) és hullám-visszaverődésen (reflexión) alapuló módszerekkel meghatározott dinamikus nyírómodulusának időbeli alakulása

A habarcsok dinamikus nyírómodulusára három független roncsolásmentes módszerrel nyert időgörbék lefutása minőségileg hasonló, amennyiben a nyíróhullám-sebesség alapján meghatározott nyírómodulus-növekedés kezdetének és a rezonanciafrekvencián alapuló módszer esetén ezen érték meginduló lassulásának időpontja megegyezik (*7. ábra,* „B” időpont), ezzel szemben a nyírómodulus reflexiós veszteségből számított értéke mindvégig a másik kettő alatt marad. Ennek az a legvalószínűbb magyarázata, hogy mind a rezonanciafrekvencián alapuló, mind a transzmissziós módszer a vizsgált test teljes térfogatára adja meg a nyírómodulust, a reflexiós veszteségből számított érték viszont a habarcsból csupán a cementfázisra érvényes.

A kísérleti eredményekből leszűrhető, hogy a visszaverés módszerével mért reflexiós veszteség a vizsgált anyag dinamikus nyírómodulusának alakulásától függ, ezt pedig alapvetően az acéllemezzel közvetle-

nül érintkező anyag (a jelen esetben a határfelületen létrejövő cementkő) tulajdonságai határozzák meg.



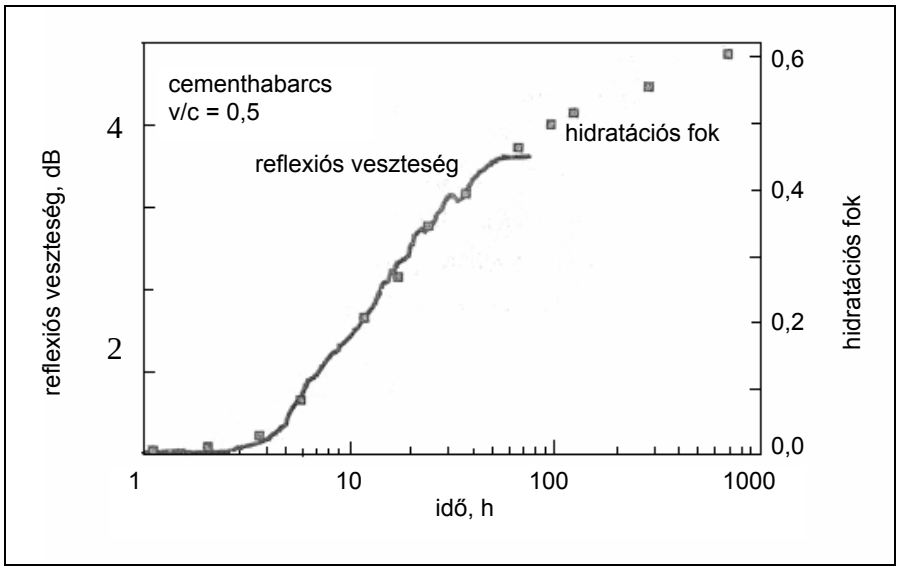
8. ábra Összefüggés különböző víz/cement arányú cementhabarcsok reflexiós vesztesége és hidratációfoka, ill. keményedése között

A hidratálódás foka

A cementkötésű szerkezeti anyagok viselkedését és számos tulajdonságát döntő módon alakító hidratálódási foknak a reflexiós veszteségtől való függését három (v/c = 0,35, 0,5, 0,6) cementkeveréken vizsgálták termogravimetriás elemzéssel *(8. ábra)*. Ennek során egy meghatározott korú, 900 °C-ra hevített minta tömegcsökkenését mérik, amely a fizikailag kötött víz elvesztésével korrigálva, megfelel az el nem párologtatható, ill. a cementben kémiailag kötött víz tömegének, ez pedig közvetlenül függ a hidratálódás előrehaladásától. A teljes hidratálódás állapotában kémiailag megkötött vízmennyiség ismeretében ki lehet számítani a cement mindenkori hidratálódási fokát.

Feltűnő az egyezés a hidratációs fok és reflexiós veszteség időbeli alakulása között, különösen a keményedés (azaz a hidratálódás) első 50 órájában *(9. ábra).* A három habarcsminta reflexiós veszteségének a hidratálódásuk fokától való lineáris függése arra utal, hogy az utóbbit nagy statisztikai biztonsággal lehet kiszámítani a reflexiós veszteségből (9.

ábra). Figyelmet érdemel, hogy a reflexiós veszteség – ellentétben a nyomószilárdság megállapított viszonyával – adott v/c értékre, a keverék korai és előrehaladott állapotában egyaránt ugyanazon összefüggésben van a hidratálódás fokával.



9. ábra 0,5 v/c arányú cementhabarcs reflexiós veszteségének és hidratálódási fokának (keményedésének) időbeli lefutása

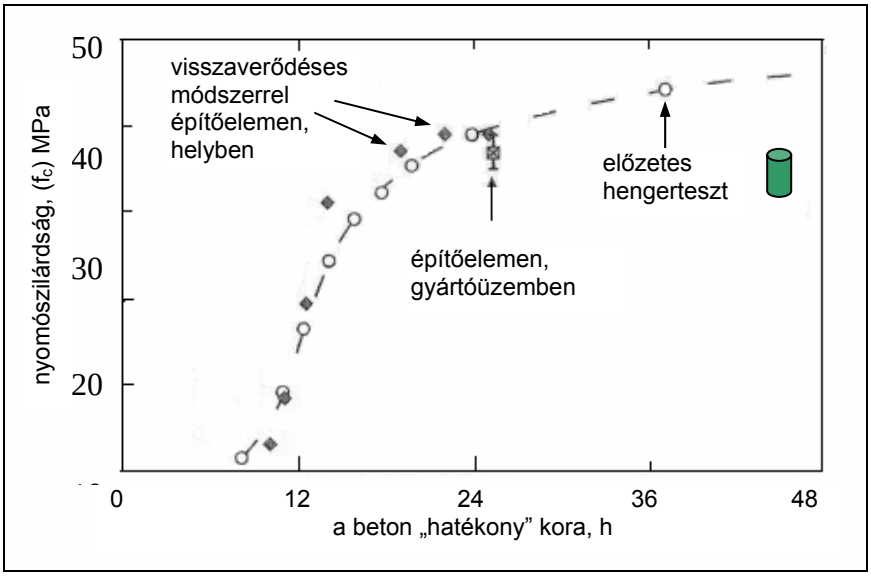
A görbék nagyobb v/c értéknél kisebb emelkedése arról is tanúskodik, hogy kis v/c adott hidratációs foknál nagy reflexiós veszteséget idéz elő. Ez annak a következménye, hogy kis v/c értéknél a kapilláris porozitás is csekély, tömörebb mikroszerkezetű cementnek pedig kisebb a hanghullámokkal szembeni ellenállása, így a cement/acél határfelületen a hullámok nagyobb része hatol a cementbe, és nő a reflexiós veszteség.

Kísérletek „terepen”

A különféle keverékmintákon végzett laboratóriumi kísérletek után kipróbálták az új módszer használhatóságát (a vasút- és mélyépítésben használatos) frissen betonozott gerenda jellegű tartószerkezeten is. Egy e célra kialakított berendezés segítségével a beton nyomószilárdsága és a reflexiós veszteség közötti összefüggést meghatározták a laboratóriumi görbék felhasználásával.

A reflexiós veszteség módszerével és a szokásos hengerteszt alapján mért nyomószilárdságot a beton ún. effektív életkorának függvényé-

ben tüntették fel. A viszonyítási hőmérséklet 25 °C, amely arra az esetre érvényes, ha aktuális keménységi fokát egy adott, állandó referencia-hőmérsékleten) érte volna el. Az így létrehozott időskála lehetővé teszi különböző hőmérsékleti hatások alatt megkötött betonok szilárdulási folyamatának összehasonlítását. (Az effektív beton-kormeghatározás az Arrhenius-egyenleten alapul.)



10. ábra Beton különböző módszerekkel meghatározott nyomószilárdságának összehasonlítása

A beton nyomószilárdsága és az áthaladt hanghullámok reflexiós vesztesége között laboratóriumban felállított összefüggésből számított és a hengerteszttel előzetesen, ill. a betonozás alkalmával mért nyomószilárdság értékei között jó egyezést találtak *(10. ábra).* (Az utóbbi, az üzemellenőrzéshez tartozó vizsgálathoz mintahengereket készítettek, és egy hőfokérzékelő segítségével a tartószerkezet hőmérséklet-változásának megfelelő körülmények között tárolták őket.) A reflexiós veszteségből számított nyomószilárdság-értékek a hengeres betonmintákon mértek hibahatárain belül vannak.

Az ultrahang-visszaverésen alapuló módszer alkalmasnak bizonyult beton építőelemek nyomószilárdságának roncsolásmentes helyszíni mérésére, igaz, csak a reflexiós veszteség és a nyomószilárdság közötti összefüggés ismeretében (ill. ennek előzetes laboratóriumi meghatározása után). Ez a visszaveréses vizsgálati eljárásnak kétségtelen hátránya, viszont megalapozott az a feltételezés, hogy a terepkísérletek kap-

csán meghatározott szilárdság–reflexiós veszteségfüggvény nemcsak adott keverékre, hanem nagyobb betoncsaládra is érvényes.

Betonkeményedés vizsgálata ultrahanggyengülésen alapuló módszerrel

A beton megszilárdulásáig végbemenő folyamatok kvantitatív vizsgálatára szolgáló legújabb eljárást a londoni Imperial College Gépészeti Intézetének munkatársai fejlesztették ki, egy az epoxigyanta megkötésének figyelésére, tulajdonságváltozásainak követésére kidolgozott módszernek cementtel kötött szerkezeti anyagokra való alkalmazásával. A módszer beton megkötése és megszilárdulása korai szakaszának tanulmányozásán alapul ultrahanghullámok beágyazott rúd alakú hullámvezetője segítségével.

Az ultrahanghullámok tengelyirányú terjedése hengeres rúdban lehet

– longitudinális (hosszanti),
– torziós (csavarodó),
– flexiós (hajlításos).

Szabad és rugalmas hullámvezetőben a hullámzás nem gyengül (nem csillapodik), terjedése a vezető geometriájától és anyagi tulajdonságaitól függ. A más anyagba beágyazott hullámvezető felszínén terjedő hullámzás (rezgés) hullámokat gerjeszt a körülvevő közegben, feltéve, hogy a vezetett hullámzás fázissebessége nagyobb annak térfogati sebességénél a beágyazó tömegben.

Az így keltett térfogati hullámok csillapodást (gyengülést) okozva energiát vonnak ki a hullámvezetőből, amelynek mennyisége a hullámvezető és a körülvevő közeg anyagi minőségétől, valamint a frekvenciától függ.

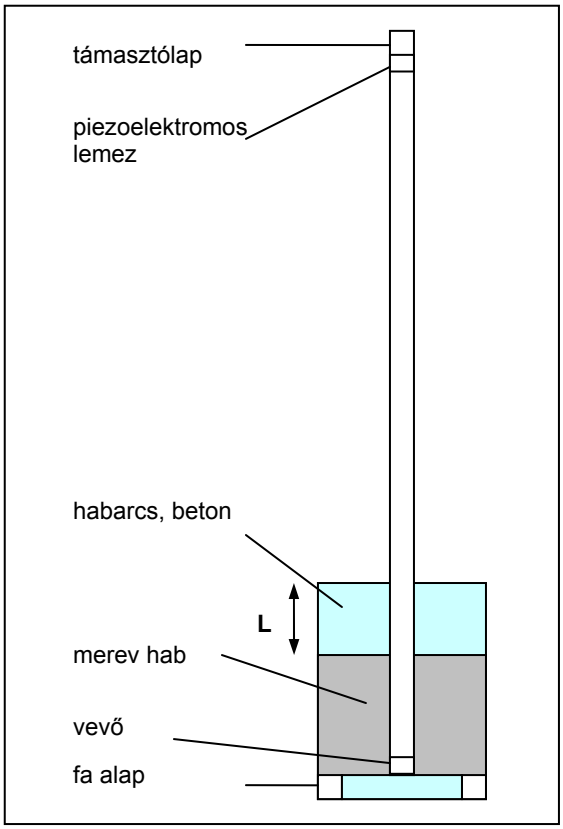
Kísérleti berendezés

A mérőeszközben *(11. ábra)* az 5 mm átmérőjű acél hullámvezető rudat 50 mm magasságban habarcs (cement, homok és víz keveréke) vette körül. A rúd végén levő piezoelektromos elem főleg tengelyirányban gerjesztette a rudat, nagyrészt elnyomva az alapvető flexiós hullámzást. Az elem hátoldalán levő tömeg növeli az energiaátvitelt a hullámvezetőbe. A piezoelektromos elemet külső villamos impulzussal gerjesztették. A ciklusok számát és az impulzus középfrekvenciáját úgy választották meg, hogy a kívánt frekvenciatartományon belüli hullámokat keltsen.

A hullámkibocsátás („kiszivárgás”) a körülvevő közegbe a beágyazás egész hosszában gyengíti a hullámvezető végén vett jelet (a szabadon levő rúdhoz képest). A csillapítás:

$$\alpha = -\frac{1}{L} ln \frac{A}{A_o}$$

az egyenletben L a beágyazott rúdhossz, A_o és A a beágyazás előtt, ill. utána kibocsátott jel amplitúdója.



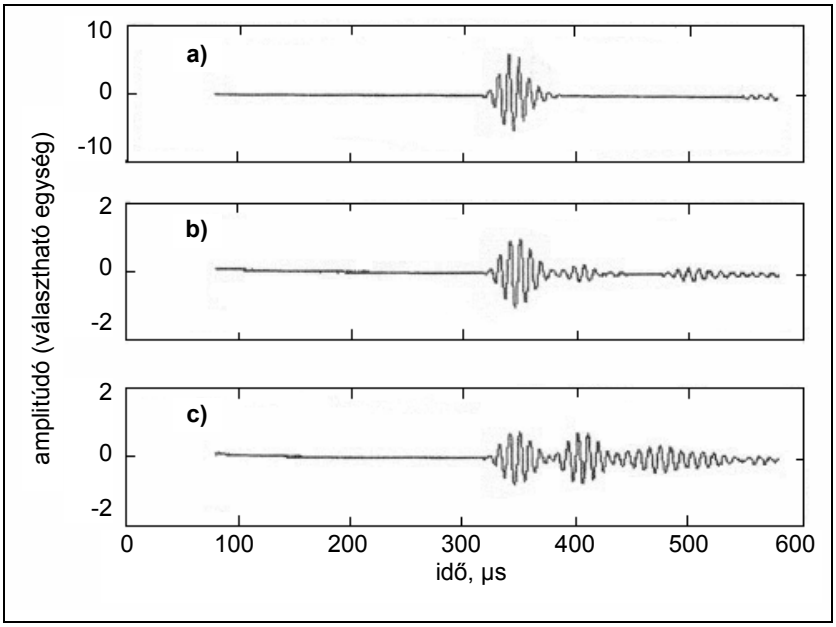
11. ábra Az ultrahanggyengülésen alapuló betonvizsgáló berendezés vázlata

A rendszeres időközönként végzett mérések helyes értelmezése és azok összehasonlítása céljából különböző akusztikai tulajdonságú (de izotrópnak feltételezett) anyagokba ágyazott acélrudakra csillapítási előrejelzéseket készítettek a DISPERSE modellező szoftver felhasználásával. A 110 kHz-es kísérleti frekvenciának megfelelő, nagyrészt tengely menti hullámzás a beágyazó közegben nyíróhullámokat kelt, így a csillapítás mértéke a közeg nyírósebességétől függ. Mivel 110 kHz-nél a vezetett hullámzás arányos ezzel a sebességgel, a csillapítás könnyen ki-

számítható. A közeg sűrűségét, amely befolyásolhatja a csillapítást, a habarcsé és a betoné közötti 2200 kg/cm^3-es középértékben adták meg.

Ultrahang-gyengüléssel nyert eredmények

A habarcs – mint a betonnál egyszerűbb összetételű közeg – a kiöntés után 24 és 48 óra után is kibocsátja a kezdetivel megegyező frekvenciajelet *(12. ábra),* de ezt később a habarcson kívüli rúdszakasz jelei követik.



a) a habarcs kiöntésekor, b) 24 óra, c) 48 óra elteltével

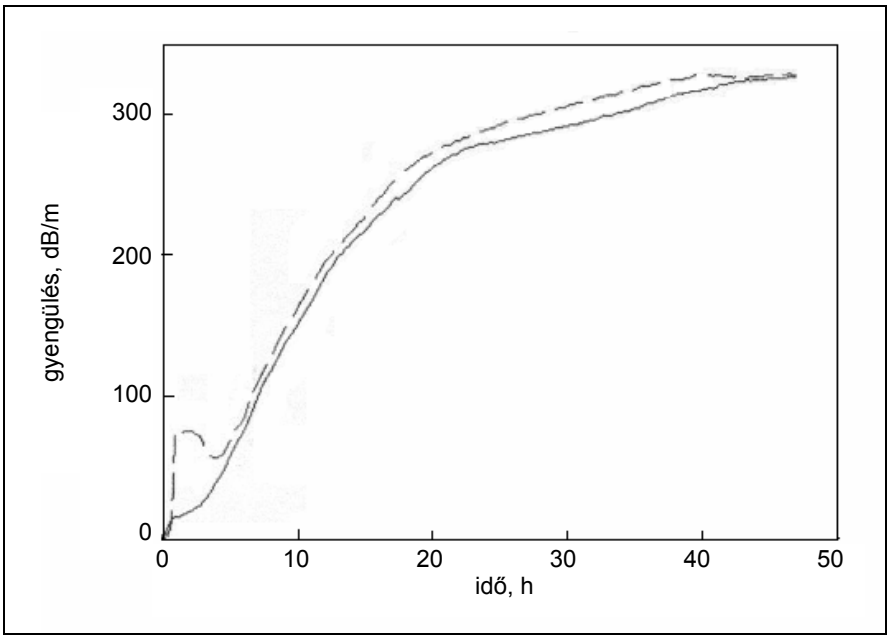
12. ábra Ultrahanghullámok lefutása a mérőrudat körülvevő közegben

A csillapításmérési eredményekből a megadott módosítással nyert C_s nyírósebességből a

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

egyenlet alapján a ρ sűrűség (1730 kg/m^3) ismeretében kiszámítható a G nyírómodulus. Ennek értéke a kezdeti folyékony állapotban csak enyhén emelkedik *(13. ábra),* ezt kb. a 20. óráig lineáris, majd mérsékelt növekedés követi. A habarcs két nap után számított 1720 m/s nyírósebességének 5,6 GPa nyírómodulus felel meg. A kísérlet megismétlése megnyugtató egyezést eredményezett. (A csillapításnak az első öt napban

megfigyelhető kis hirtelen növekedése a piezoelektromos lemezre való átvitelt befolyásoló nedvességnek tulajdonítható, száradás után a jel idő-görbéje normalizálódik.)

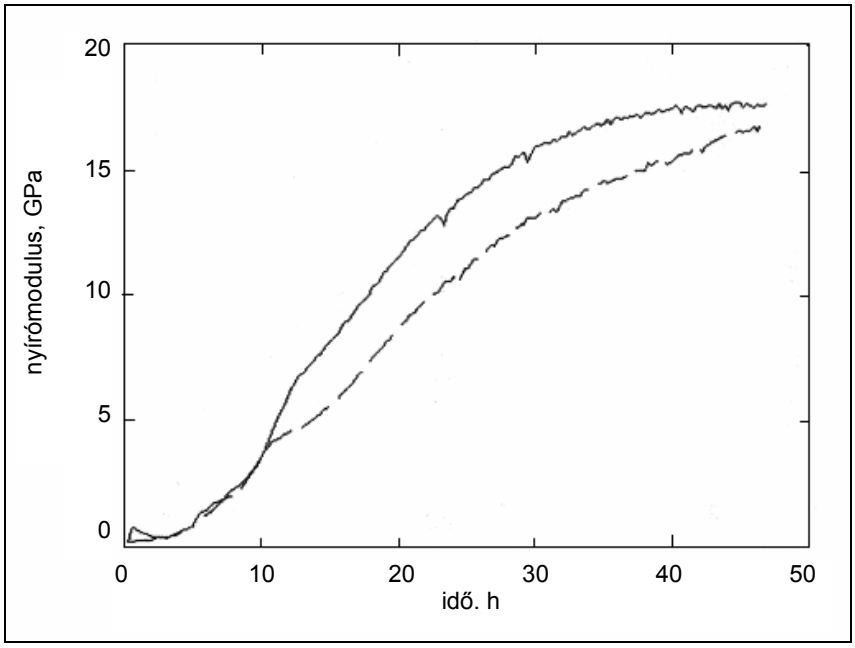


13. ábra Ultrahanggyengülés (csillapodás) két habarcsmintában

Az ultrahang-gyengülési kísérletekhez választott beton cementtartalma 380 kg/m^3, szabad víz/cement aránya 0,4, sűrűsége 2319 kg/m^3 volt (az utóbbit a megkötés alatt állandónak feltételezték.) Ez esetben a betonrészecskéken való szóródás túlságosan legyengítette a nyíróhullám- (ill. rezgés-) átalakítóval nyert 500 kHz-es hullámokat ahhoz, hogy mérhető sebességgel áthatoljanak a betonon.

A beton számított nyírósebessége 2670 m/s és 2316 kg/m^3-es sűrűséggel számított nyírómodulusa 16,5 GPa volt 48 óra után *(14. ábra).* A két párhuzamos mérés időgörbéje ezúttal csak kezdeti és – tendenciájában – végső szakasza egyezik meg, ami a két minta különböző alakjával, vagy a hőmérséklet-különbséggel magyarázható.

Az eredmények tanúsága szerint a beágyazott hullámvezető módszere a nyírómodulus időbeli alakulásának diagramja alapján alkalmas beton (és cementtartalmú szerkezeti anyagok) megkötésének és kikeményedésének követésére. A mérőeszköz egy elég vastag betonszakaszban bárhol elhelyezhető.



14.ábra A nyírómodulus alakulása két keményedő betonmintában

A kísérletekben a hanghullámok bevitele a hullámvezető egyik, fogadása a másik végén történt, holott egyszerűbb az impulzusvisszhang-megoldás, egyetlen rezgésátalakító elhelyezésével a rúd kiálló végén. Ezt az eredeti, epoxigyantán végzett kísérletekben alkalmazott elrendezést itt nem vették át, mivel ebben a hullámok kétszer haladnak át a vezetőn, ami a betonban nagy kiáramlást és a pontos méréshez túlságos csillapodást okoz. Ezen segíteni lehetne 5 helyett 10 vagy 20 mm átmérőjű rudat, vagy akár a fegyverzetként használt vasat alkalmazva hullámvezetőként.

Összeállította: Dr. Boros Tiborné

Voigt, Th.; Dehn, F.: Zerstörungsfreie Prüfung von jungem Beton mittels einer Ultraschallreflexionsmethode. = Bautechnik, 81. k. 6. sz. 2004. p. 468–479.

Pu, S. H.; Cegke, F.: Monitoring the setting and early hardening of concrete using an ultrasonic waveguide. = Insight, 46. k. 6. sz. 2004. p. 350–354.