

REZGÉSMÉRÉS

A

**BUDAI VÁR ALATTI BARLANGRENDSZERBEN ÉS
MŰEMLÉKÉPÜLETEIBEN**

2003. szeptember

Bevezetés

2003-ban a Budai Vár alatti barlang- és pincerendszer veszélyelhárítási munkálatai során rezgésméréseket végeztünk annak megállapítására, hogy a közúti forgalom milyen hatással van a várnegyed alatti barlangokra, és a felettük álló épületekre.

Hazánkban addig az ideig – és tudomásom szerint azóta sem - hasonló vizsgálat nem történt. Nagy-Britanniában 1979-től J.H.A Crockett professzor vezetésével történtek műemléképületek rezgésvizsgálatai. Ugyancsak az Egyesült Királyságban végeztek kényszerrezgés-méréseket: Hood és Marshall kutatók a Transport Road Research Laboratorz in the UK kutatói 1987-ben egy 90 éves szabadon álló ikerházat vizsgálták meg.

A rezgésekről általánosságban

A rezgés definíciója:

Az egyensúlyi helyzetéből periodikusan ellentétes irányokban kitérő testnek, anyagi részecskének vagy fizikai jelenségnek (pl. rádióhullámoknak) változását – vagy e változás egy mozzanatát rezgésnek (oszcillációnak) nevezzük.

A rezgés lehet csillapítatlan, amikor a kitérés állandó, vagy csillapított, amikor a változás az idő függvényében csökken.

Terjedésük szerint lehetnek longitudálisak vagy transzverzálisak.

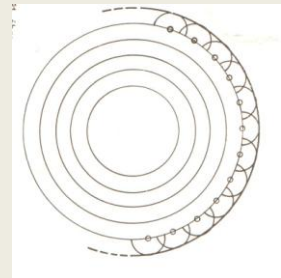
Longitudális, amikor a rezgés iránya megegyezik a mozgás továbbterjedésének irányával. Ilyen bármely halmazállapotú közegben keletkezhetnek, mert terjedésük a közegek összenyomással szembeni ellenállásával van összefüggésben. Mivel mind a folyadékok, mind a gázok ilyen ellenállással rendelkeznek, bennük longitudális hullámok terjednek.

Transzverzális terjedésű a rezgés, amikor iránya merőleges a továbbterjedés irányára. Például, ha egyik végén rögzített kötelet megfeszítünk, és az egyik végét a kötel hosszára merőlegesen harmonikus rezgésbe hozzuk (fel-le rángatjuk), akkor a rezgés transzverzális hullámokkal terjed végig a kötélen. Transzverzális hullámok csak szilárd anyagokban keletkezhetnek, mert átvitelük a közeg merevségével kapcsolatos, amivel a folyadékok és gázok nem rendelkeznek.

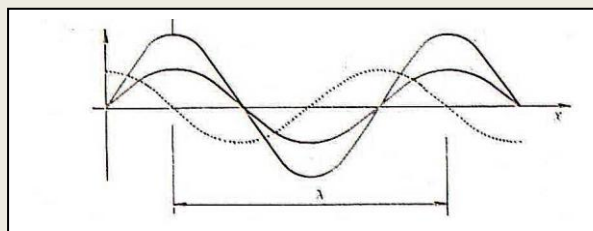
A rezgések terjedésének irányát az anyag – később tárgyalandó – tulajdonságai határozzák meg. Mivel a folyadékok rugalmassági állandója 0, ezért a folyadékokban a rezgés csak longitudális irányban terjed. Szilárd anyagokban mind longitudális, mind transzverzális rezgés keletkezik.

Huygens és Fresnel elve szerint a rezgések úgy terjednek, hogy egy már meglévő rezgő elemei részecske minden pontjából új elemi rezgések indulnak ki, és ezek összetevődve alkotják a továbbterjedő rezgések hullámát.

Szilárd anyag határát elérve a rezgés ún. felületi hullámokat alkot.

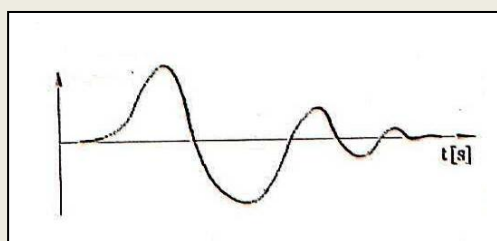


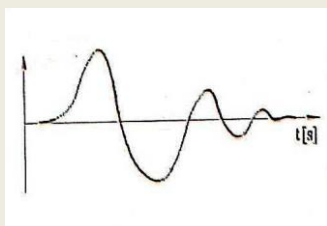
Csillapítatlan harmonikus rezgés hullámképe



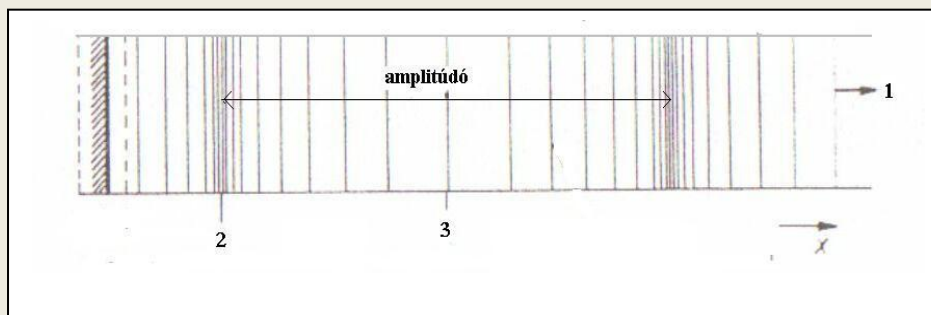
A csillapítatlan harmonikus rezgés (λ = hullámhossz)

Csillapított harmonikus rezgés hullámképe

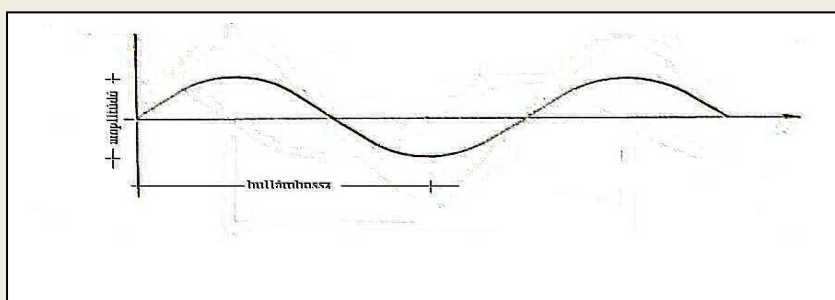




A csillapított harmonikus rezgés



Longitudális hullám
 1 – hullám haladási iránya
 2 – „hullámvölgy”
 3 – „hullámhegy”



Transzverzális hullám haladása

A rezgést az alábbi tulajdonságokkal jellemezhetjük:

- amplitúdó: a rezgés kitérésének nagysága (A), mértékegysége: m, vagy mm ábrázolása leggyakrabban az idő és a kilengés függvényében számegyenesen történik.
- frekvencia: az egymáshoz legközelebbi, azonos fázisban levő részeinek távolsága $f = 1/T$, mértékegysége: Hz
- rezgés körfrekvenciája: (ω mértékegysége: ° (fok))
- a rezgéssebesség: a kitérés a rezgő test egy-egy pontján csak bizonyos idő elteltével jelenik meg. Az adott pontnak a rezgés forrásától mért távolsága és az eltelt időnek a hányadosa a hányadosa a rezgéssebesség. Jele c , mértékegysége: mms^{-1}
- rezgésgyorsulás: a , mértékegysége: mms^{-2}

Az amplitúdót ritkán használjuk. Az elektromosságban, a híradástechnikában illetve hangtanban a rezgés frekvenciája az elsődleges mérőszám. A műszaki gyakorlatban – és a vonatkozó szabványokban – a fő használatos rezgéstulajdonság a rezgéssebesség, vagy a rezgésgyorsulás. Ennek oka, hogy a kis kilendülést okozó

rezgéseknél (és az épületek illetve a gépek, közlekedés által okozott rezgések) az amplitúdó nem ad kiértékelhető mértéket.

A rezgések terjedése az anyagokban

Minden szilárd anyagnak a rezgésekkel szembeni viselkedése más és más. A kötöttebb anyagok jobban vezetik a rezgéseket, míg a lazább szövetűek rosszabbul. Általában a rezgésvezetés arányban van az anyag sűrűségével, ám vannak kivételek: például az ólom sokkal rosszabbul vezet a rezgéseket, mint az acél, vagy az alumínium, noha sűrűsége többszöröse ezeknek.

Egyes szemcsés anyagok sűrűsége, veszteségi tényezője és a nyíróhullám terjedési sebessége mutatószámai

Anyag	sűrűség ρ kg/m ³	veszteségi tényező η	nyíróhullám terjedési sebessége (c) m/s
Száraz homok	1550	0,12	76
Száraz homok 12 % gyapottal keverve	1500	0,15	68
Homok + 20 % víz	1800	0,07	119
Téglatörmelék	1250	0,21	53
Szénsalak	950	0,25	50
vasforgács	1950	0,14	55

Longitudális hullámok terjedése egyes kőzetekben

anyag	sebesség
mészkö	2000 – 6250
gránit	5600
diorit	6400
gabbró	6800
bazalt	5400
agyag	1200-2800
víz	1430 –1590

A szilárd anyag határát elérve a rezgés a hullámokhoz hasonló módon viselkedik: a kifelé haladó rezgés az anyag határán visszaverődik, csillapodik vagy megtörik. A befelé haladó rezgés a szilárd anyag határán visszaverődik, csillapodik, megtörik és behatol az anyagba.

Amennyiben a rezgés merőleges az anyag felületére, az törés nélkül hatol az anyagba és tovább terjed. **A rezgés egy része új határfelületről visszaverődik, többi része pedig behatol abba.** Ezért az inhomogén anyagokban a rezgések igen bonyolultan, az anyag összetevőinek tulajdonságait követve terjednek.

Rezgések terjedése az építési anyagokban, szerkezetekben

A fő építési anyagok közül homogén anyagnak számítanak az üveg és az egyes falazóanyagok önmagukban (pl. téglá, falazókő, útburkolókő), inhomogén anyagnak számít a beton, a vasbeton az aszfalt. Az építési szerkezetek közül inhomogén szerkezetűek a téglá, kő és vegyes falazatok, az útpálya szerkezetek, a földémszerkezetek.

A Budai Várban az alábbi inhomogén szerkezetípusok fordulnak elő:

vasbeton

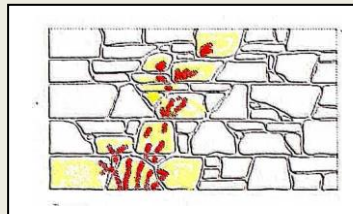
kő – habarcs – téglá habarcs – kő

téglá – habarcs – téglá

kő – habarcs – kő

Ezeknek az összetett anyagoknak a rezgésekkel szembeni tulajdonságainak vizsgálata és szabatos meghatározása még nem történt meg még, ezért a vizsgálat során igyekeztünk erre is kitérni.

A rezgések terjedése a makrokörnyezetben az alábbiakban határozható meg



Rezgések terjedése kőfalazatokban

Az összetett építési anyagokban, szerkezetekben a terjedést a fentebb már említett elsődleges anyagtulajdonságok mellett igen nagymértékben befolyásolják a kötőanyagok minősége és megléte. A Budai Vár területén az építési szerkezetekben mindhárom fontos kötőanyag előfordul: az aszfaltozott illetve kockaköves útburkolatokban a bitumen, az útalapokban és a téglafalazatokban a cement illetve a cementhabarcs, míg a régi, több száz éves falazatokban a mészhabarcs.

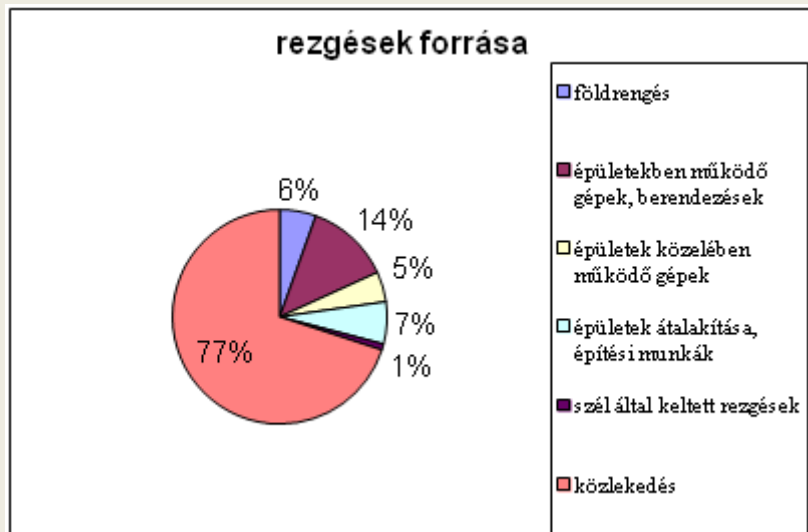
Az épületszerkezetekre jutó rezgésterhelések

Az épületszerkezetekre közvetett és közvetlen módon juthatnak rezgések. Közvetlen rezgések keletkezhetnek az építményben működő gépek rázó, ütőhatására, magán az épületen, szerkezeten végzett munka hatására. Különleges közvetlen rezgések a szeizmikus rezgések, ezek tárgyalását, vizsgálatát külön tudományág végzi, a szeizmológia.

Közvetett rezgések lehetnek az épület környezetében működő gépek, szerkezetek által keltett rezgések, vagy az épület, építmény környezetében végzett robbantás, építési munka.

Az épületek szerkezeteire ható rezgések leggyakrabban a közlekedés hatására alakulnak ki. Ezek lehetnek légrezgések (zaj), illetve közvetett testrezgések. A vizsgálatunk a zajhatással nem foglalkozott, de nem szabad elfelejteni, hogy az épületekben való tartózkodásra és a komfortérzetre ez a rezgésforrás is nagy befolyással van. Ennek oka, hogy az ablakok, nyílászárók, ezek keretszerkezetei gyakran olyan anyagból (üveg) és olyan szerkezeti összeépítéssel történik, mely miatt a közlekedési zaj rezgésáthajtást fejt ki az épületek belsejében.

Az épületek szerkezetére ható közvetett rezgések leggyakoribb forrása a közlekedésből eredő rezgés.



Az épületek, építmények rezgése hatással van az épületek állagára, statikai állapotára, befolyásolja a bennük tartózkodó személyek élettani-lélektani körülményeit is.

A rezgések élettani-lélektani hatását elsősorban az alábbi tényezők befolyásolják:

- a rezgés intenzitása, erőssége
- a rezgés időtartama és gyakorisága (amennyiben a rezgés hosszan tart, nehezebben elviselhető, mint a rövidebb időtartamú, illetve a ritkább gyakoriságú),
- igen fontos tényező a rezgés iránya az emberi testhez képest: a kísérletek kimutatták, hogy a gerincoszlopra merőleges rezgést jobban elviseli az emberi szervezet, mint a gerincoszloppal párhuzamos rezgéseket,
- a rezgések elviselése szempontjából a környezet is fontos szerepet játszik: egy haladó járművön (pl. busz, vonat) a rezgéseket jobban elviseli az ember, mint egy épületben. Még nehezebben viseli el a rezgéseket egy – látszatra – instabil építményen (pl. hídon).
- általában a 0,1 Hz alatti és a 200 Hz feletti rezgéseket az emberi szervezet már nem érzékeli
- a rezgés tapasztalásának helye: a szilárd talajhoz kapcsolódó földszinti padlózatán nagyobb rezgést elvisel az emberi szervezet, mint az emeleti födémeken.

A rezgések épületszerkezetre történő hatása.

Míg az emberi szervezetre ható rezgés jól érzékelhető, a szerkezetekkel szembeni hatás a köznapi gyakorlatban már csak akkor érzékelhető, ha valamilyen károsodást okoz.

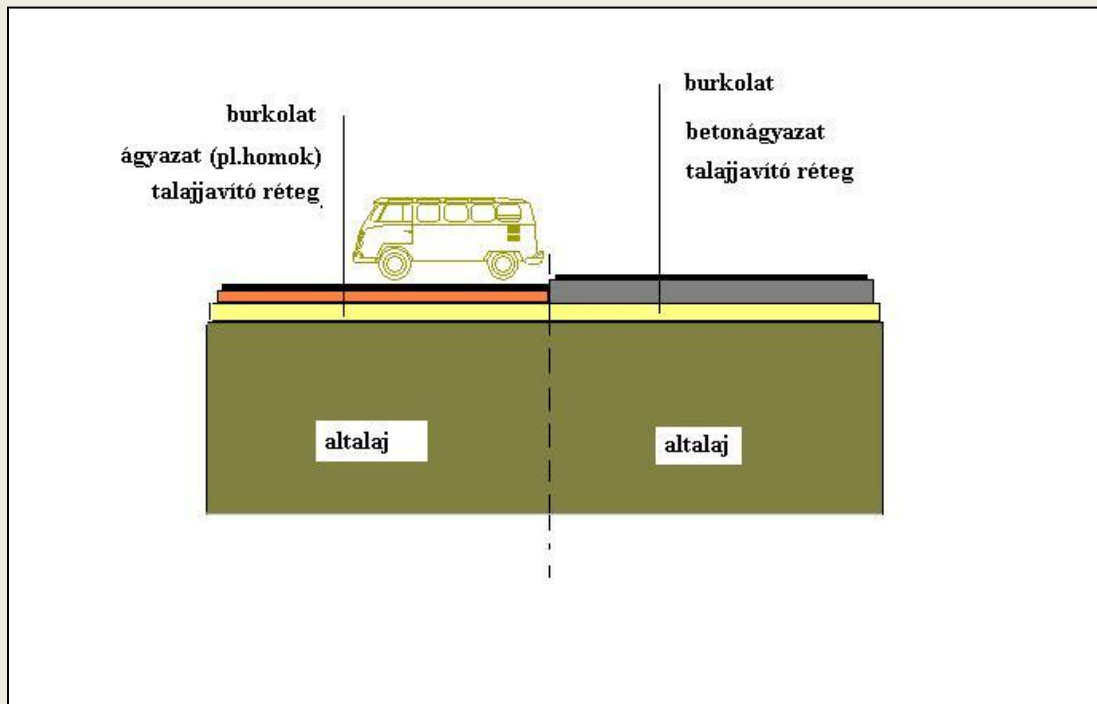
Az ilyen rezgések csak extrém körülmények között befolyásolja a szerkezetek teherbírását, ám igen befolyásolja használhatóságukat: repedéseket, lazulásokat eredményez, a csatlakozószervezetek együttmozgását, illetve csatlakozását károsítja.

Az épületszerkezetekben végbemenő rezgésfolyamatokat nem csak maga a rezgés, hanem a rezgés átadásának, közvetítésének módja, és az épületszerkezet tulajdonságai is erősen befolyásolják.

A rezgés átadásának módja:

A közlekedésből származó közvetett rezgések (tehát melyek nem a hidakon, hanem az épületeken jelennek meg) rezgések átadása kétféleképpen történhet: az épületszerkezeteknek a közlekedési útpályával való közvetlen érintkezése által, illetve az épület alapja alatt található talaj közvetítése által.

A közlekedési pályák szerkezete általában az alábbi:



A járművek az útburkolaton haladva rezgést keltenek. E rezgések tulajdonságai az alábbiaktól függenek:

- A jármű súlya: könnyen belátható, hogy a nehezebb jármű nagyobb rezgésterhelést ad át
- A jármű szerkezeti felépítése: az egységes, összefüggő szerkezetű jármű (pl. személygépkocsi, zárt teherautó) kisebb rezgéseket közvetít ugyanolyan haladási körülmények mellett, mint a nyitottabb, vagy összetettebb jármű (pl. platós gépkocsi, személyszállító gk. stb.)
- A jármű haladásának körülményei: a folyamatosan haladó jármű kisebb rezgést ad át, mint a forduló, megálló, vagy éppen elinduló gépkocsi. Egy adott ponton áthaladó jármű egyszeri impulzust ad, míg az egy helyben a motort működtető jármű hosszú időn át terheli rezgéssel a környezetét.

Vizsgálatunk során a fő hangsúlyt az áthaladó járművek által keltett rezgésekre helyeztük, ám két helyen (Dísz tér 15. és Evangélikus templom) a helyben járó, megálló és elinduló jármű – vári kisbusz rezgéseit is vizsgáltuk. Az összefoglaló javaslatok

alapján ezek figyelembevételével teszünk javaslatot bizonyos közlekedésszervezési tennivalókra

- A pálya szerkezete igen fontos tényező. Más módon adja át a rezgést az aszfaltburkolat, mint a beton, vagy kockakő burkolat. A hullámterjedés sebessége a bazaltban 5400 mms^{-1} , míg az aszfaltban $1900\text{-}3400 \text{ mms}^{-1}$ - látható, hogy a kockakő burkolat sokkal jobban vezeti a rezgéseket, mint az aszfalt.

A Budai Várban általános a bazalt kockakő burkolat, ezért vizsgálataink ezekre vonatkoztak. A kockakő burkolat alatt általánosnak mondható a betonágyazat. ez jó rezgésvezető képessége miatt igen kis csillapítással adja át a rezgéseket az épületek szerkezetének. Ez főleg azokon a helyeken merül fel, ahol az útalap ill. útszerkezet olyan járdában folytatódik, mely szintén beton alapú. Fokozza a rezgéstovábbítást az út alatt található üregesedés, illetve az út alatt húzódó közművek hatása.

- Az útpálya alapja annyiban befolyásolja a rezgés haladását, hogy más a rezgésvezetése a kavicsos, homokos útalapnak, mint a beton útalapnak. Ez a fenti táblázatból – az egyes anyagok minőségének mutatószámaiból könnyen belátható. A kavicságy mintegy rezgésgátló paplanként működik az útpálya alatt, csillapítva a rezgéseket. Ezzel szemben a beton útalap igen erősen közvetíti a rezgéseket. Maga a beton is jó rezgéstovábbítási tulajdonsággal rendelkezik, de az alap, és az alatta található szerkezeti viszonyok is közrejátszanak ebben. Ennek oka a következő: a beton útalap lemezszerkezet, melynek vastagsága a felületéhez képest igen kicsiny. Lássunk egy példát: egy 6 méteres szélességű, 20 cm vastagságú beton útalap arányai: 1:30. Egy ilyen arányszámmal rendelkező lemez – könnyen belátható – igen érzékeny a rezgésekre. Az útalapok általában rugalmas kavicságyazaton fekszenek fel. De az utak alatt (és ez a Budai Várra különösen jellemző) az ágyazati anyag az ideálistól igen sok ok miatt eltérhet: közműfektetések után, útjavítások esetében az ágyazta pótlása nem megfelelően történik meg. Az utak alatti szerkezetek (közművek, üregek, pincék) az ágyazat folytonosságát, egységességét megbontják. Ezzel a lemezszerkezet alátámasztása eltér az ideálistól – és ez a rezgések továbbítására igen jelentős befolyással lehet az útalap, és az útpálya esetében.
- Az útpálya és útalap – mint lemezszerkezet – által közvetített rezgések különösen nagy hatással lehetnek azokra az épületekre, melyek alappincézettek, és az útpálya a pincefalnak fut neki. Ha a pincefalnak nincs merevítése (harántfala, vagy pillére), a rezgés szinte csillapítatlanul terjedhet a falban tovább. Ennek szomorú, de meggyőző példájával lehet találkozni még napjainkban is a meglévő II. világháborús óvóhelyek egyikében-másikában: a falon felirat, tábla figyelmeztet: „*Légiriadók alatt a falnak támaszkodni tilos*”. Ennek oka, hogy a nagy intenzitású bombázások a talajban olyan rezgéseket rengéseket közvetíthettek az óvóhely falára, melyek a figyelmetlen ott tartózkodóknak súlyos sérüléseket okozhattak.

A természetes építőkövek közül a tömör, rideg szerkezetűek (márvány, bazalt, mészkő) jobban, míg a lazább szerkezetűek (tufa, homokkő) rosszabbul vezetik a rezgéseket. Szintén jobban vezetik a rezgést az égetett agyagárak, ezek közül is azok, melyek felületburkolásra készültek, azaz „kongó” téglák (keramit, klinker téglák). Az anyagfajtán kívül igen fontos az építmény szerkezeti felépítésének módozata is: az alapozás, a szerkezeti váz, a falazat és födémvastagság, a falazatok és födémek egymáshoz való viszonyának módozata is. Általánosságban elmondható, hogy a tervezési, szerkesztési és kivitelezési szabályok betartásával készült épületek (melyeknél a súlyok, a feszültségek, a merevség, a kihajlás, a megfelelő kivitelezés stb. követelményei teljesülnek) rezgés szempontjából is megfelelőnek minősíthetők. Azonban az épület használati idejének teltével ezek a tulajdonságok romlanak, az épületek elfogadott és elkerülhetetlen változásai révén.

Vegyük sorba ezek közül a szerkezeti körülmények közül a legfontosabbakat, melyek az épületek rezgésére hatással vannak.

- Alapozás: az épületek alapjai (sík és mélyalapok) a teherbíró talajra kerülnek. A teherbíró talaj lehet merev (szikla), vagy összenyomható (agyag, kavics). míg az előbbi a közvetett rezgések átadásában igen fontos szerepet játszik, az utóbbi inkább csillapítja a rezgések haladását.

A Budai Várban az épületek jelentős része a várhegyet fedő mészkőre került alapozásra. Mint később látni fogjuk, a vizsgált épületszerkezet közül a Bécsi kapu téri evangélikus templom alapjai a mészkőnél mélyebbre nyúlnak, a további négy épület vizsgált falazat azonban a mészkőaplanon fekszik.

- A rezgések közvetítése szempontjából a legfontosabb tényező magának az épületnek, az építményszerkezetnek a felépítése. Könnyen belátható, hogy más és más a téglák, a kő, és a betonfalazatok közvetítő hatása. Ezt nem csak a falazóanyag tulajdonságai befolyásolják, hanem a falazat felépítése, geometriája, az anyagok műszaki-technológiai összeillesztése és maguknak az anyagoknak az egymáshoz való viszonya is.
- A falazatok geometriája: a vastag, széles falazatok a rezgésekkel szemben ellenállóbbak, míg a vékony, rúd vagy oszlop illetve penge falak a rezgésekre hatására hamarabb deformálódnak. Ezt a megállapítást a Euler II. törvényből lehet matematikailag levezetni, de enélkül is jól belátható. A falazatok geometriájának másodlagos összetevője, a falazat tagoltsága annyiból fontos a rezgések szempontjából, hogy a rezgések kedvezőtlen esetben a sarkokon illetve az éleken csúcsosodhatnak ki. Ezért a bonyolult, tagozott felületeken, a kiugró épületrészekben, konzolos szerkezeteken a rezgések nagyobb kárt tudnak tenni, mint az összefüggő, tömbszerű szerkezeteken.

Jó példa erre a kerület egyéb területein (főleg a felső Víziváros és a Krisztinaváros egyes területein) álló több szintes, „modernebb” – azaz száz-százöt éves technológiával épült – házak esete: a fafödémekkel ellátott épületekben a különféle anyagú szerkezetek

összeillesztésénél a rezgések, az épület egyéb jellegű mozgása a csomópontokat már kikezdték.

A falazatok minőségének vizsgálatához ismerni kell az építéskori technológiákat és helyszíni vizsgálatokat kell végezni.

A falazatok rezgésközvetítése a falazóanyagtól, a falazóanyagok közti habarcs vastagságától és minőségétől, valamint a falazás módjától függ.

A téglafalaknál szokásos vízszintes sorok és a téglák közötti hézagok (fúgák) és vízszintes illetve függőleges irányban közvetítik a rezgéseket. Magának a téglának a Young modulusa alacsony, így kevésbé közvetíti a rezgést, ám az élek párhuzamos elrendezése segíti azt a folyamatot, hogy a rezgések továbbhaladjanak.

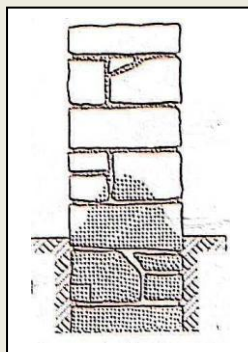
Ebből a szempontból a szabálytalan alakú kőből épült falazatok jobban csillapítják a rezgéseket, mivel elosztják annak terjedését.

De más szempontokból is ellenállóbbak a régi kőfalazatok: a fúgák eleve vastagabbak, szabálytalan elrendezésűek, ami hozzájárul a rezgések eloszlásához.

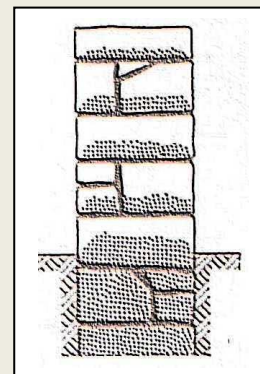
Igen fontos tényező a rezgések terjedése szempontjából a falazóanyagok közötti kitöltés (habarcs) minősége. A mészhabarcsból készült fúgák csillapító tulajdonságúak. Ezzel szemben a cementhabarcs fúgák nemcsak hogy jobban közvetítik a rezgéseket, de összetalálkozásuk esetén (rezonancia) még fel is erősítik azokat.

A cementhabarcs rezgéssel szembeni ellenállása háromszor rosszabb, mint a mészhabarcsé.

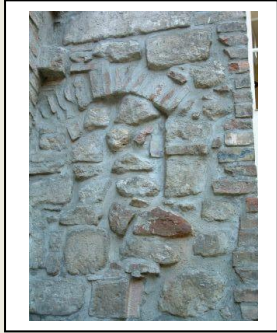
Az alábbi ábrán megfigyelhető a rezgések terjedése a mészhabarccsal és a cementhabarccsal épült falazatban: az utóbbinál minden egyes falazóelem határán a rezgés nem csak tovább terjed, de erősödik is – bár ez az erősödés a rezgésforrástól távolodva kisebb és kisebb, de jóval magasabb a határa, mint a mészhabarcs falazatban. A kőből falazatott szerkezetek szabálytalan – és általában a téglafalakénál vastagabb – fúgarétegei hozzájárulnak a rezgések csillapításához.



Rezgések terjedése a mészkőhabarccsal készült falazatban



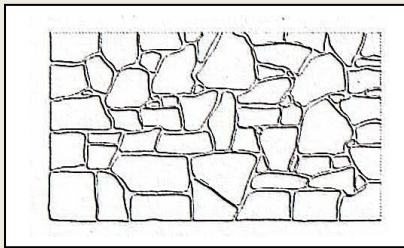
Rezgések terjedése cementhabarccsal készült falazatokban



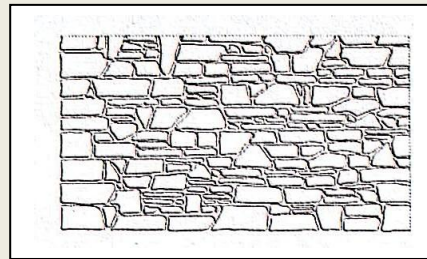
Tipikus kőfalazat a Várban



Tipikus vegyes falazat a Várban



Kőfalazatok fugaelrendezése



Vegyes falazatok fugaelrendezése

A vizsgálat során a Bécsi kapu téri evangélikus templom, az Országház utca 16. és a Dísz tér 15. sz. épület téglafalazatú volt. Míg e két utóbbi falazata – tekintettel régebbi építési idejükre – mészhabarcs kitöltésű volt, a templom falazata erősen cementes mészhabarccsal épült – a mérések a fenti megállapításokat igazolták.

A fent vázolt hatások és okok összetettsége miatt általános szabályt nem lehet a kőfalazatokra meghatározni, ezt mindig az adott helyzet, az adott falazat ismeretében lehet kikövetkeztetni. Éppen ez az oka annak, hogy a vonatkozó szabvány is a határozott mérőszámok helyett a szakember belátására bízta a határérték megállapítását.

Az épület károsodásának, az elméleti határértékek megállapításának elengedhetetlen eleme a szerkezeti vizsgálatokon túl a helyszíni rezgésmérés elvégzése.

A rezgések mérése

Mint arról a bevezetőben már szó volt, a rezgéseket többféle mérőszámmal jellemezhetjük. A legáltalánosabb - és a köznapiban gyakorlatban érthető, megfogható - a rezgés amplitúdójának leírása, meghatározása, de mivel nincs egyik fizikai mennyiséggel sem összefüggésben, gyakorlati értéke korlátozott. Az effektív érték (angol rövidítése RMS) az amplitúdó legfontosabb értéke, mert az időbeni lefutást is figyelembe véve olyan értéket ad, amely közvetlenül összefügg az energiataralommal, így a rezgés rombolóhatásával.

A műszaki gyakorlatban az amplitúdó mérése igen körülményes és nehezen kivitelezhető feladat. Egy nagyobb tárgy, gép, épületszerkezet tönkremeneteléhez az esetek 80 %-ban magában a testben fellépő rezgések vezetnek, és egy tömör test részecskéinek amplitúdóját (azaz kimozdulását) szinte lehetetlen megmérni. Ezért alakult ki az a módszer, hogy a rezgések más jellemzőit mérjük.

A rezgést leírhatjuk a rezgés sebességével és gyorsulásával is. Ezen mérőszámok vizsgálatakor a rezgés formája, periódusa nem játszik közre, ezért jól alkalmazható minden körülmények között, és egységes mérőszámot ad. Ez főleg az abban az esetben fontos, ha nem csak egy adott frekvenciájú rezgéssel van dolgunk, hanem olyan összetett hatással, melyben bizonyos határok között több frekvencia, vagy esetleg egyenletes frekvenciaeloszlás lép fel. A tapasztalat szerint a rezgés erősségét a 10 Hz és 1 kHz közötti sávban a rezgéssebesség RMS értéke adja meg a legjobban. A tudományos vizsgálatok megállapították, ennek az a magyarázata, hogy az adott sebességszint megfelel az adott energiaszintnek mind a kis, mind a nagyobb frekvenciákon.

A nemzetközi szabványok és a vonatkozó jogszabályok ezért a rezgések hatásainak vizsgálatakor a rezgéssebesség és a rezgés gyorsulás mérését írják elő. Korszerű műszerekkel lehetővé teszik azt is, hogy a több, különféle frekvenciájú rezgést integrálva egységes adatokat kapjunk, vagy ha szükséges, akkor szűrők alkalmazásával egy adott frekvenciára is mérni tudjunk.

A mérés módszerét mindig az adott feladat határozza meg. A szabványok (nemzetközi és hazai) az emberi tartózkodásra azonban meghatározzák a mérési frekvenciát, hiszen –mint azt az előbb már említettük – az emberi test egy bizonyos frekvenciahatár közé eső rezgésre a legérzékenyebb. A mérést meghatározzák a műszerek, berendezések tulajdonságai (ezekről lejjebb), ezért a mérési spektrumot úgy kell megválasztani, hogy a műszer, a kiértékelő készülék legoptimálisabb mérési tartományába essen (ahol a legkisebb a szórás, zavar).

A rezgésmérésre az elmúlt évtizedek során igen sok érzékelőt, műszert fejlesztettek ki.

Az egyszerű elmozdulásmérő mechanikus elven működik. Fix ponthoz rögzítve az érzékelő csúcsot az elmozdulást szenvedő tárgy (általában gép, gépalkatrész) testéhez érintik, vagy rögzítik, és a mozgó test kilendüléseit mérik. E módszernek (azon kívül, hogy az amplitúdómérés egyébként sem ad jól felhasználható, a szabványokhoz igazodó adatot) igen nagy hibaszázaléka van.

A rezgéssebességet, rezgés gyorsulást mérő berendezések optikai vagy elektromos rendszerűek lehetnek.

Az optikai rezgésmérők csak telepített berendezéseknél alkalmazhatók, műszaki felépítésük, paramétereik és biztonsági előírásaik miatt. Általában gépek rezgésmérésére szolgálnak. A külső hatásokkal szembeni érzékenyséjük miatt a

kapacitív érzékelők szintén telepített berendezéseknél használatosak. A kapacitív érzékelők igen érzékenyek a hőmérsékletváltozásra, valamint a különféle dinamikus hatásokra (pl. szállítás stb.) ezért ezeket szinte majdnem minden esetben csak telepített körülmények között használják.

Az inductív érzékelő működési elve, hogy egy mágneses térben mozgó vezetőtekercs mozgása során a tekercsben áram keletkezik, és ennek az áramnak a tulajdonságai (erőssége) függ a mozgás mértékétől, gyorsaságától.

A műszaki gyakorlatban a legelterjedtebb rezgés gyorsulás, rezgéssebesség mérő berendezések piezoelektromos elven működnek. E rendszer alapelve, hogy a kvarc (szilícium-dioxid, amit természetes formában homokként ismerünk) kristályai nyomás hatására áramot fejlesztenek. Ez az áram igen kicsiny (néhány ezred volt), ám erősítővel mérhető.

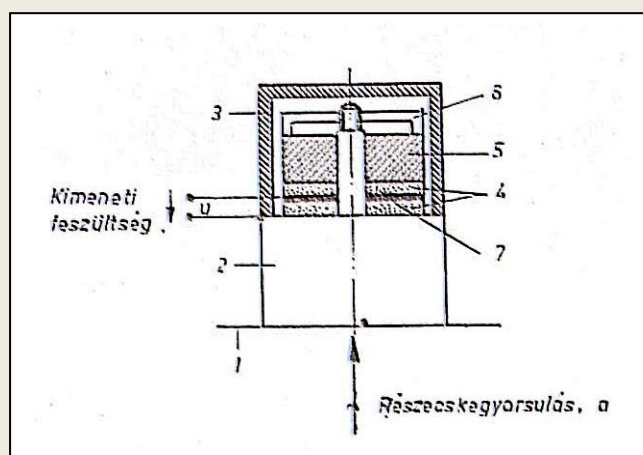
A piezoelektromos gyorsulásérzékelő használható a legjobban a műszaki gyakorlatban, mert nagy frekvencia és dinamika tartománya jó linearitással párosul minden mérendő sávban. A piezoelektromos gyorsulásérzékelő fő alkatrésze az a kvarclapocská, mely rendszerint mesterségesen orientált ferroelektromos kerámialapocská. A lapocskát érő nyomó, húzó vagy feszítőerő gerjeszti azt az áramot, melyet mérünk.

A piezoelektromos rezgésérzékelők – a kristály elhelyezkedésétől függően – különböző irányokra különböző érzékenységgűek. Ezért gyakorlati megoldásukban két féle ismert: a kompressziós és a nyírási elven működő. Mindkettőnél a kvarcelemet befogó ház úgy készült el, hogy az érzékenysége beszabályozható és egyben rögzíthető legyen. Tekintettel arra, hogy magának az érzékelő kristálynak a tömege igen kicsiny, a ház megfelelő kialakításával, az ellentartó rúgó méretezésével beállítható úgy a rendszer, hogy saját frekvenciája 20000 Hz felett legyen. Ebben az esetben a saját frekvencia nagyságrendekkel nagyobb, mint a műszaki gyakorlatban mérendő frekvencia, és ebben az esetben a kvarckristályban a piezoelektromos feszültséget létrehozó összenyomódás a rezgés gyorsulásával arányos.

Az elektromos jel integrálása révén a részecske sebesség (v) egyszerűen kiszámolható:

$$v = \int a dt$$

A piezoelektromos gyorsulásérzékelő elrendezési vázlatát és műszaki kivitelét a rajz mutatja.



A gyorsulásérzékelőt és a berendezést kalibrálni kell. A hitelesítést a gyári előírások alapján kell ismételni meghatározott időszakokban.

A mérések legkritikusabb tényezője a mérőfejek rögzítése. Amennyiben nem megfelelő szilárdsággal rögzítjük a mérőfejet, a mérés ponttalan lesz.

A rezgésmérők rögzítését több féleképpen lehet elvégezni. A csavaros, ragasztott rögzítések a stabil mérési helyeken alkalmazandók. A több helyen végzendő mérés, vagy az időszakonként mérés esetén legmegbízhatóbb módja a mágnesen rögzítés.

(A gyártók lehetővé teszik a mérőfejek kézben tartását is – ún. mérőtű – ám ezek megbízhatósági foka igen alacsony, és a mérés nem rekonstruálható). A rezgésérzékelők rögzítési helyét épületek esetében a szabványok meghatározzák akkor, ha az azokban foglalt határértékek mérése a cél.

A mérésekre igen nagy befolyással vannak a különféle külső hatások. Ezért a mérések helyét úgy kell megválasztani, hõ a rezgésmérõ fejeket, a berendezéseket ne érhesse közvetlen napsütés, esõ, mágneses, akusztikai és egyéb hatások.

A mérőfejből érkező jeleket az értékelő berendezés erősítőjén keresztül jut a feldolgozó részbe. A mérőfej közötti kábel elektromos tulajdonságai (védelem az elektromos zajok ellen, impedancia stb.), valamint magának a mérőműszernek az elektromos tulajdonságai is befolyásolják a mérés pontosságát. Ennek oka, hogy a piezoelektromos gyorsulásérzékelők kimenő impedanciája igen magas.

A rezgésméréseket feldolgozó műszerek fejlesztése folyamatos. A rezgésmérő műszereken mellett használatosak olyan rezgésanalizátorok, melyek képesek azonnal egy-egy rezgés kibocsátó gép, berendezés azonnali, komplex állapotdiagnosztikáját elvégezni.

A berendezések fontos része az a szűrőegység, mely a megfelelő frekvencia, illetve rezgésjellemzők kiválasztására szolgál.

Rezgésmérés a budai vár alatti barlangrendszerben és műemléképületeiben

2002-ben a BME Épületszerkezeti és Épületfizikai tanszéke már végzett kísérleti méréseket a Budai Vár 3 épületén. Az akkori mérések célja az volt, hogy megállapításra kerüljön: adódnak-e át olyan rezgések az épületekre, melyek károsíthatják azok szerkezetét. A mérések azt mutatták, hogy a vonatkozó szabványokban és előírásokban szereplő határértéket sehol nem érik el – sőt meg sem közelítik a rezgések.

Ennek több oka is volt.

Először az előírások igen magas határértéket állapítanak meg. A vonatkozó szabványok (felsorolásukat lásd alább) egyébként nem csak számszerűségükben, de fogalmi meghatározásaikban, a körülmények rögzítésében is igen nagyvonalúan kezelik a rezgésekre vonatkozó előírásokat.

Másodszor: a vári épületek szerkezetüknél fogva (vastag, kőből épült falak) nem annyira érzékenyek a rezgésekre, mint a modern technológiával épült, téglá, falazóelem, vagy betonfal szerkezetes épületek. A vári épületeknél tehát rezgésből eredő összeomlás, vagy olyan károsodás, mely a használatot lehetetlenné teszi, nem valószínűsíthető.

Ennek ellenére a méréseket szükséges volt folytatni, és pedig több okból:

- az épületek homlokzatán igen-igen sok helyen keletkeznek repedések
- a vári közúti forgalom nem csökkent, sőt, növekedett
- a házak, úttek alatt húzódó barlangokra a közúti forgalom rezgőhatása nem ismert.
- lehetőség szerint megoldást kell találni a rezgések hatásának csillapítására
- a 2002-es mérések csak az épületszerkezetre vonatkoztak, nem mérték a barlangokban, a föld alatti szerkezetekben keletkező rezgéseket, és főként azért, mert nem szimultán mérések voltak, azaz a föld alatti és föld feletti szerkezetekre vonatkozó egyidejű mérések.

A rezgések meghatározására és mérésére az alábbi szabványok vonatkoznak

MSZ 12875:1979	A rezgésmérés általános előírásai
MSZ 13018:1991	Rezgések épületre gyakorolt hatása
MSZ 18163-2:1998	Rezgésmérés. Az emberre ható környezeti rezgések vizsgálata építményekben
MSZ 206-1:1983	Rezgéstani fogalom meghatározások. Alapfogalmak
MSZ 206-2:1983	Rezgéstani fogalom meghatározások. Mechanikai rezgések

A szabványokon kívül az alábbi jogszabályok rendelkeznek az épületek rezgéséről:

- 253/1997. Korm. rendelet az országos építésügyi szabályzatról (53.§)

- 12/1983. (V. 12.) MT rendelet a zaj- és rezgésvédelemről

2002-ben új EÜ rendelet jelent meg az épületek zaj- és rezgésterheléséről, mely az előző érvényben lévő rendelet határértékeit még megemelte.

- 8/2002. (III. 22.) KöM-EüM együttes rendelet a zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról

Tekintettel arra, hogy a BME mérése azt mutatta, hogy a vári forgalom által okozott rezgések nem haladják meg a határértékeket, más megközelítésben kell vizsgálni a

problémát. A két legfontosabb szempont: a forgalom rezgő hatásának vizsgálata az épületekre, barlangokra, pincékre, illetve az ott keletkező rezgések hatása, átadása az épületszerkezetekre.

A fenti célok elérésre két paramétert kell teljesíteni a mérések végrehajtásánál:

- azonos időben több ponton történjen a mérés
- pontosan meghatározható, és újra demonstrálható olyan hatásnak kell érnie a szerkezeteket, mely hatás minden méréskor azonos nagyságú és időtartamú

A végrehajtott rezgésmérések – azon túl, hogy ahol mód volt rá, ott a szabványok előírásainak megfelelően történtek, alkalmasak kell, hogy legyenek az alábbi következtetések levonására:

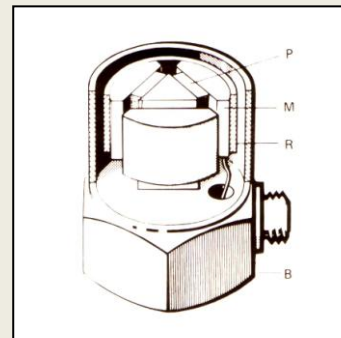
- a rezgések terjedése az épületekben
- ahol arra mód volt, a rezgések hatása a föld alatti szerkezetekre (itt legfontosabb a barlangokra való hatás)
- a rezgések folyamatos szintjének meghatározására
- különféle összetételű épületszerkezetek viselkedése a rezgésekre, különös tekintettel a folyamatosan ható és az egyszeri, impulzus rezgések közötti különbségre.

A mérések általános leírása:

A méréseket 10 Hz-en végeztük, a szabvány 1 – 100 Hz-ig határozza meg a mérési frekvenciát.

Mérésünk során a Brüel & Kjaer cég 2511 típusú rezgésérzékelő berendezését, és 3510 típusú rezgésanalizátorát használtuk. A berendezéseket a Magyar Tudományos Akadémia Mérésügyi Szolgálat a bocsátotta rendelkezésünkre. A berendezés fotóját az 1. sz. fotómelléklet mutatja be.

A rezgéshez mindkét műszer esetén a Bruel & Kjaer cég által gyártott 4370 rezgéssebességmérő fejet használtuk. A fejet kalibrálta: MTA MSZ.



A fejt rajza

A rezgések kényszerítésének módja:

A mérés alapelve az volt, hogy az általános – és egyszer már mért, vizsgált – háttérrezgések mellett azonos nagyságú és mesterségesen keltett rezgések mérése is történjen meg.

Ennek indokai a következők voltak:

- a keltett és vizsgált rezgések jól megkülönböztethetők legyenek a háttérrezgéstől
- a rezgést keltő erő pontosan meghatározható legyen

- a rezgés minden vizsgált épület esteében azonos időtartamú és nagyságú impulzusokat keltsen
- a rezgési vizsgálat szükség esetén megismételhető legyen.

Ennek érdekében a mérésekhez a rezgéseket egy darab 23.380 kg súlyú gépkocsival keltettünk olyan módon, hogy a gépkocsi a mérési pont vonalában az úttesten keresztül fektetett pallón hajtott át. A gépkocsi 2 tengelyes jármű volt, a hátsó tengelyen 2-2 kerékkel.

Ennek megfelelően az általa keltett dinamikus erő összetevői az alábbiakból számíthatók:

(m) súly a hátsó tengelyre vonatkoztatva: $28800 \text{ kg} \times 4/6 = 19200$

(s) esési magasság: 5 cm (0,05 m)

(g) gyorsulás: $9,81 \text{ m/s}^2$

Az erőimpulzus nagysága:

$$F = mg = 188352 \text{ kg}$$

A jármű által közvetített sebesség az út felületén:

$$v_y = g \cdot \sqrt{\frac{2s_y}{g}}$$

$$v_x = 10 \text{ km/h, } (2778 \text{ mms}^{-1})$$

$$v_y = 0,9904 \text{ mms}^{-1}$$

$$v_{er} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2778 \text{ mms}^{-1}$$

A mérőpontok rögzítése

A méréshez az egységes rögzítés és méréseredmény érdekében az alábbi megoldást dolgoztuk ki:

- a falazatokba az előre meghatározott helyeken (ezeket a következő részben ismertetjük) 3 mm átmérőjű nagyszilárdságú anyagból készített csavaros fejű rögzítőszögek (betonszög, vagy „Hilti-szög”) kerültek belövésre.
- az elhelyezés előtt – ahol erre szükség volt – a falazat vakolata leverésre került, annak érdekében, hogy ne a rezgésekkel szemben csillapíthatással rendelkező vakolati anyag, habarcs, hanem a szerkezetet alkotó építőelemre kerüljön a mérőpont.
- a szögek teljes hosszukban a falazati anyagba mélyednek, feltámaszkodásukat a fém gallér biztosítja. A műanyagallért a belövés előtt eltávolítottuk. E megoldás célja az volt, hogy a rezgésátadás minél nagyobb hosszon történjen meg, éselkerülhető legyen a szög hosszú testéből – kinyúlásából – eredő saját rezonancia.

A szögek menetes végére 3,0 cm x 3,0 cm méretű acéllemez került felcsavarozásra. A mérés egységesítése érdekében minden mérőpontra ez a lemez került rögzítésre.¹ Erre az acéllemezre rögzítettük a mérőfejet mágneses illesztőegység segítségével.

¹ A mérőlemez rögzítését a 3. sz. fotómellékelt mutatja be.

Ezzel a megoldással minden mérési ponton egységes mérőrendszer került kialakításra. A két műszer paramétereit azonosak, a mérőfejek mérete, rögzítése megegyezik, ezért az azonos feltételű mérés kritériumai teljesültek.

A mérési eredmények leolvasása a műszer skálájáról: leolvasásra csúcsértékek kerültek, ezekből a 30 mp-es intervallum került megállapításra.

A 6,5 perces mérési időn belül az impulzusmérésre minden mérésnél legalább 2 esetben sor került. Ezzel a módszerrel az épületek által felvett háttérrezgés, és a kényszerített impulzusrezgés mérése egyaránt megtörtént.

A rezgésmérések leírása

A rezgésmérések időpontja: 2003. július 29.

Időjárás: Borult idő, időnként átfutó záporral. Szélcsendes idő. Hőmérséklet 23-25 fok között változó.

A méréseket végezte: Lakosi Kálmán, Gubicz Imre, Majdán János

A mérések lebonyolítása a következőképpen történt:

Egy-egy épületen egyszerre két ponton – azonos specifikációjú műszerrel, azonos beállításokkal történtek a mérések.

A mérés menete:

1. az előre elhelyezett pontokra felszerelésre került a mérőlemez.
2. a műszerhez csatlakoztatásra került a rezgésmérőfej
3. a rezgésmérőfejet mágneses közdarabbal rögzítettük a mérőlemezre
4. a műszer bekapcsolása után 4 perc várakozási időt hagytunk, hogy a beindításból eredő rezonancia és egyéb hatások „lecsengése” megtörténjen.
5. a műszer skáláján a lecsengés után a mutató a valós értékeket mutatta
6. leolvasások: csúcsértékek leolvasása, illetve a gépjármű áthaladásakor keletkezett impulzusérték leolvasása
7. a leolvasások 6,5 percig folyamatosan történtek
8. a leolvasás értékei rögzítése

Az impulzusokkeltés a fent már leírt módon, tehergépkocsi áthaladásával történt. A gépkocsi áthaladási sebessége 15 km/óra, az akadályon történő áthaladás helyét (impulzusokkeltés helye) a mellékelt helyszínrajzok tartalmazzák.

Az adatok rögzítésére HP laptop-ot használtunk.

Az egyes mérőpontok és a gépkocsi áthaladásának összehangolására mobiltelefon kapcsolatot vettünk igénybe. Ahol arra mód volt, a gépkocsi többszöri áthaladásával kontrolláltuk az eredményt.

A vizsgálandó épületek és mérési pontok kiválasztásakor az alábbi szempontokat vettük figyelembe:

- minden, a Budai Várra jellemző épületszerkezet-típus vizsgálatra kerüljön,
- ennek megfelelően a vizsgált épületek között van vegyes, téglá és betonfalazatú, tömbszerű és toronyszerű építmény, illetve vázas épület is
- az épületek a Váron belül is kiemelt jelentőségűnek számítanak (közösségi jellegű, vagy a városkép szempontjából kiemelt jellegűknél fogva)
- az épületek környezetében a közúti forgalom a vári forgalomra jellemző legyen, illetve az épület a forgalom által fokozottan terhelt legyen
- ahol mód volt rá, olyan épületet igyekeztünk kiválasztani, mely kapcsolódik a vár alatt húzódó barlangrendszerhez
- lényeges szempont volt, hogy az épület a rezgésmérés miatt nem károsodhat (mérőpontok felszerelése, a rezgés által keltett hatás stb.)

1. mérési hely: Kapisztrán tér Magdolna torony

Az építmény rövid leírása:

Szabadonálló toronyépítmény – az egykori helyőrségi (Mária Magdolna) templom megmaradt tornya.

Maga a templomépület a XII. század elején épült, a középkorban a magyar lakosság egyháza volt. A templom az 1944-45-ös ostrom során erősen megsérült, az 50-es évek elején lebontották. A tornyot 1944-ben több bombatalálat érte, nyolcszögű III-IV. emeletének északnyugati sarokpillére leomlott, tetőzete nagyrészt elpusztult. A torony helyreállítása 1950-52 között történt meg.

A torony alsó fele négyzetes formájú, sarkain a harmadik szintig felnyúló támbordákkal. Az alsó rész négyzetesen faragott mészkövekből áll. Az alsó részhez a templom megmaradt része – bejárati részként - csatlakozik.

Felső fele nyolcszög alaprajzú, építőanyaga vegyes (tégla és faragott kő). Mind az alsó, mind a felső rész magas, keskeny. gótikus ablakokkal áttört. A toronyba egy oldalsó lépcsőházban futó csigalépcső soron lehet feljutni. A felső szinteken utólagosan beépített vasbeton födémek találhatóak.

Az épület szerkezeti szempontból karcsúnak nyilvánítható. gazdag tagozatú (azaz külső és belső falsíkja többszörösen törött).

A torony alatt ismereteink alatt pince, barlang nem húzódik, bár a bejárati szint az Úri utca síkjánál mélyebben helyezkedik el, a Kapisztrán tér síkjához igazodik.

Az épület környezetében található közlekedési útvonalak kockakő burkolatúak, a járda asszfalt burkolatú. A toronyhoz csatlakozó térszín burkolata kiskockakő.

A torony közvetlen közelében húzódó Úri utca arányaiban kisebb forgalmú, a torony keleti oldalán, ám attól messzebb húzódó Országház utca nagy forgalmú.

Az épület az úttesttől 6,5 m-re helyezkedik el.

A mérési helyek kiválasztása:

A földszinten fal útra merőleges és úttal párhuzamos síkja. Mérési távolság az impulzuskeltés pontjától: 8,6 m. Magasság az úttesttől: 1,2 méter. A toronyban mérés helye a második födémén került kijelölésre, magassága az úttesttől: 28,20 m².

Mérési irányok: úttengelyre merőleges és azzal párhuzamos.

A mérési pontok olyan építőköre kerültek rögzítésre, melyek vakolat nélküliek.

Mérések eredményei (30 mp-es csúcsok)

Út tengelyére merőleges mérések (mms⁻¹)

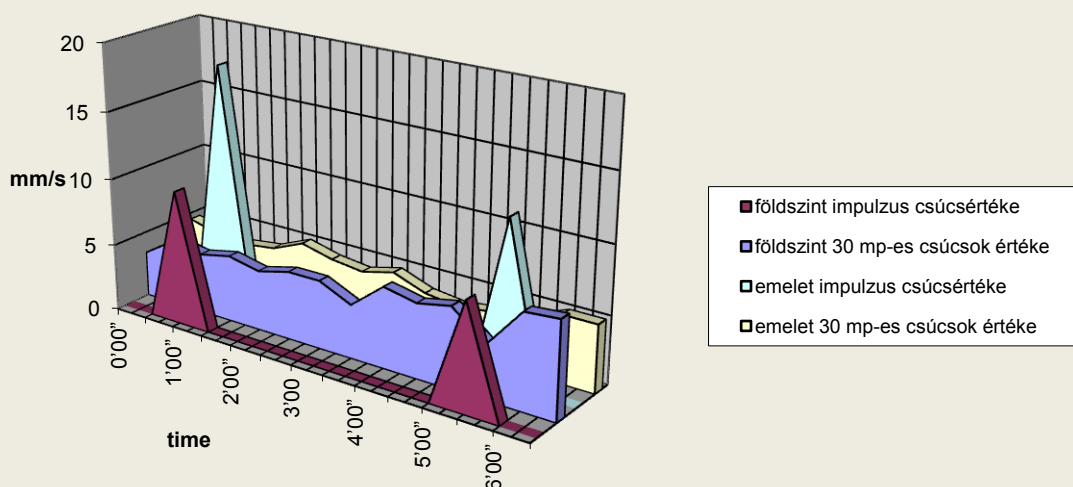
idő ', ''	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	emelet 30 mp-es csúcsok értéke	emelet impulzus csúcsértéke
0'00''	3,4		4,5	
0'30''	4,9		3,9	
1'00''	4,5	10,0	3,7	18,0
1'30''	5,0		4,0	
2'00''	4,5		5,0	
2'30''	5,1		4,4	

² lásd 5. és 6.sz. fotó melléklet

3'00	5,1		4,1	
3'30"	4,0		4,7	
4'00"	6,0		3,8	
4'30"	5,5		3,5	
5'00"	6,0		3,8	
5'30"	4,0	8,00	4,0	12,00
6'00"	7,0		5,0	
6'30"	7,2		5,0	

Impulzusok időpontja: 0'55"
5'34"

Magdolna torony útra merőleges mérések



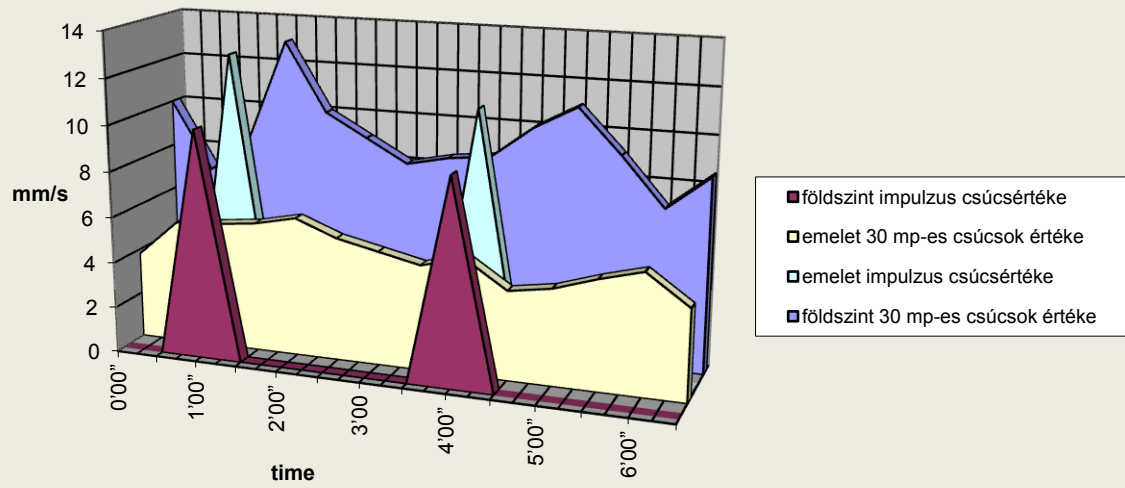
Út tengelyével párhuzamos mérések (mms⁻¹)

idő ', "	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	emelet 30 mp-es csúcsok értéke	emelet impulzus csúcsértéke
0'00"	10,0		3,8	
0'30"	7,0		5,4	
1'00"	8,5	10,0	5,5	12,6
1'30"	13,0		5,7	
2'00"	10,0		6,1	
2'30"	9,0		5,4	
3'00	8,0		5,0	
3'30"	8,4		4,6	
4'00"	8,6	9,0	5,1	11,0
4'30"	10,0		3,9	
5'00"	11,0		4,2	
5'30"	9,1		4,8	
6'00"	7,0		5,3	
6'30"	8,5		4,0	

Impulzusok időpontja: 1'07"

4'11"

Magdolna torony úttal párhuzamos



2. mérési hely: Országház utca 16.:

Az épület rövid leírása

Egyik oldalán zárt sorú, másik oldalán szabadon álló egyemeletes lakóház, kora klasszicista megoldásokkal. A középkori maradványok felhasználásával a XVIII. század első felében épült az utcai traktus, a hátsó szárny a XVIII. század végén épült meg. Falazata vegyes kő és téglafalazat. Falazat vastagsága a földszinten meghaladja a 80 cm-t, az alapozási vastagság megállapítására csak épületbontással kerülhetett volna sor.

A II. világháborúban csak kevéssé sérült meg. A 10 lakást tartalmazó lakóépület legutolsó felújítására a 80-as évek közepén került sor.

A falazatok ekkor belső vegyi szigetelést kaptak, külső, belső homlokzatfelújítás történt.

Az épület tömör, tömbszerű szerkezetű, szerkezeti arányai közelítik az 1: 1,6-os arányt. Falazata nem tagolt, csak kisebb kiugró részek találhatók rajta (párkány stb.). Ablakai, nyílászárói nem nagy felületűek, igazodnak az épület arányaihoz.

Az épület közelében húzódó úttest burkolata nagykockakő, a járda burkolata aszfalt. Az útvonal igen nagy forgalmú, a vári kisbusz halad el rajta. Fontos körülmény, hogy az egyirányú utca az épület előtti részen emelkedik, az utca elejéhez képest majd 5 méter. Ezért a gépkocsiknak nagyobb motorteljesítményt kell igénybe venni, mint sík úton történő haladásnál.

Az épület alatt az útra merőleges pince helyezkedik el, az épület előtti úttest alatt 8-10 éter mélységben barlangrendszer húzódik. A barlangrendszer mérési pont alá eső területe kiépített, oldalfala beton és téglá, főtéje vasbetonnal erősített.

A mérési pontok:

Pince: az ún. első pinceszinten (jelenleg kiállítótér) az utcai homlokzati fal alatti alap vegyes falazatában, terméskő szerkezeti elembe³.

Földszinti mérőpont: a kapuzat bal oldalán a faragott mészkőkapuzat. Mindkét helyen két-két mérőpont került felszerelésre.

³ lásd 7. és 8. sz. fotómelléklet

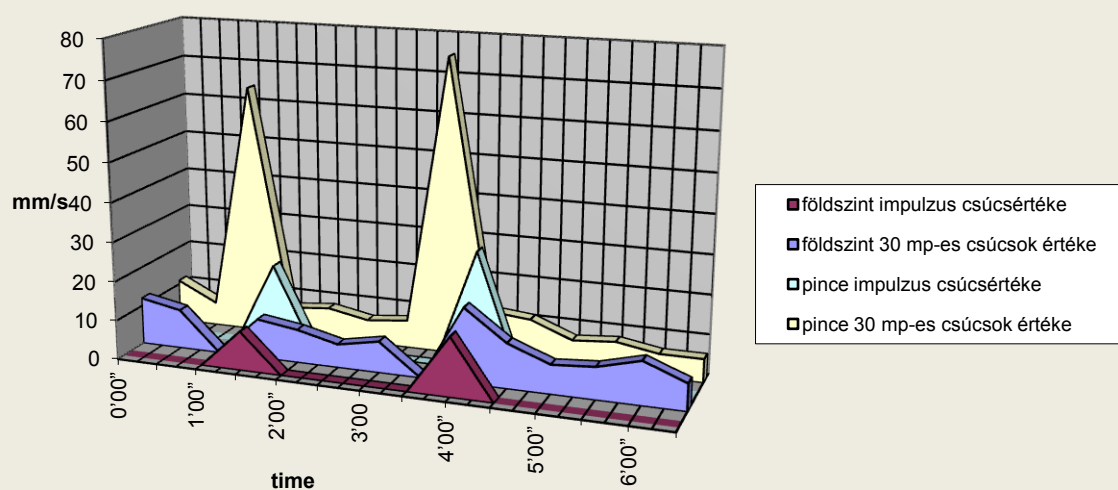
Mérések eredményei (30 mp-es csúcsok)

Út tengelyére merőleges mérések (mms^{-1})

idő ',''	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	pince 30 mp-es csúcsok értéke	pince impulzus csúcsértéke
0'00"	12,0		11,0	
0'30"	10,0		6,0	
1'00"	100,0 (busz)		64,0	
1'30"	10,0	10,0	7,0	21,0
2'00"	8,5		8,0	
2'30"	6,0		6,0	
3'00"	8,0		7,1	
3'30"	97,0 (busz)		75,0	
4'00"	19,0	15,0	12,0	30,0
4'30"	11,4		11,0	
5'00"	7,4		6,9	
5'30"	8,2		7,8	
6'00"	11,0		6,0	
6'30"	6,9		6,0	

Impulzusok időpontja: 1'09"
4'11"

Országház utca 16. útra merőleges

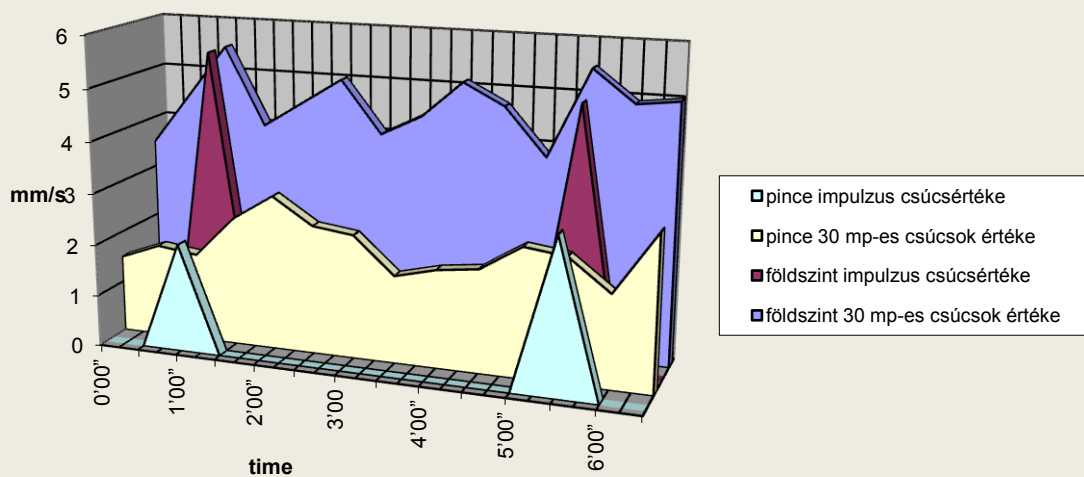


Út tengelyével párhuzamos mérések (mms^{-1})

idő ',"	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	pince 30 mp-es csúcsok értéke	pince impulzus csúcsértéke
0'00"	3,5		1,5	
0'30"	4,5		1,8	
1'00"	5,5	5,5	1,7	2,1
1'30"	4,0		2,5	
2'00"	4,5		3,0	
2'30"	5,0		2,5	
3'00"	4,0		2,4	
3'30"	4,4		1,7	
4'00"	5,1		1,9	
4'30"	4,7		2,0	
5'00"	3,8		2,5	
5'30"	5,5	5,0	2,4	3,0
6'00"	4,9		1,8	
6'30"	5,0		3,0	

Impulzusok időpontja: 0'54"
5'23"

Országház utca 16. úttal párhuzamos



3. mérési hely: Bécsi kapu téri Evangélikus templom

A tér felé szabadon álló épület, oldalsó és hátsó frontja kisebb épületekhez csatlakozik. A templom a XIX. század végén épült, az egykori Szent György téren állt evangélikus templom lebontása után, Kalina Mór tervei alapján. Egyhajós, homlokzati tornyos templom.

Falazatának anyaga a kor jellemző építési anyaga, nagyméretű téglá, a habarcs javított mészhabarcs, cementhabarcs.

Az épület alapjai egyes részeken lenyúlnak a mészkőpaplan síkja alá.

Az épület szerkezete és tömbaránya karcsúnak tekinthető. Falazata földszinten vastag, ám a felső mérési ponton (torony 2. szint) már arányaiban és szerkezetében is igen karcsú.

Az épület alatt kiépített pince található, az épület előtt az úttest alatt barlangrendszer húzódik. A pince kiépített falazatú és főtéjű, a barlangrendszer részben kiépített.

A templom környezetében húzódó útvonalak igen nagy forgalmúak, a Vár teljes északi irányú forgalma itt halad át.

Az útburkolatok nagykockakő burkolatúak, a járda aszfaltozott. A templom közvetlen közelében halad a vári kisbusz, a templom előtt – a lehető legkisebb távolságban annak falától – megállója található.

Az épület kiválasztását több ok is indokolta: a közelében haladó nagy forgalom, egységes, téglá szerkezete (mely már kevés található), valamint az, hogy közösségi épületként igen nagy látogatottságú épület a Budai Várban. Fontos szempont volt, hogy az épület alatt és mellett ismert állapotú pincék, barlangok húzódnak.

Mérési pontok: tekintettel arra, hogy az épület homlokzata a közelmúltban került felújításra, a minél kisebb károsítás érdekében a fölszínen egy mérőpontot helyeztünk el. A mérőpont magassága az úttesthez viszonyítva: 2,00 m

A toronyban két, az útra merőleges és az úttal párhuzamos mérőpont létesült. A mérőpontot az úthoz legközelebb eső – a Bécsi kapu felé néző – falhoz rögzítettük, az épület padlószintjétől mért magassága 11,80 m⁴. A mérés időtartama alatt a torony órájának szerkezete működött, ám a felújított elektromos szerkezet a mérést nem befolyásoló mozgást idézett csak elő (a falszerkezettől elválasztott tengely, és az óraszerkezet csak percenként egyszer indult meg).

⁴ lásd: 9. és 10. sz. fotómelléklet

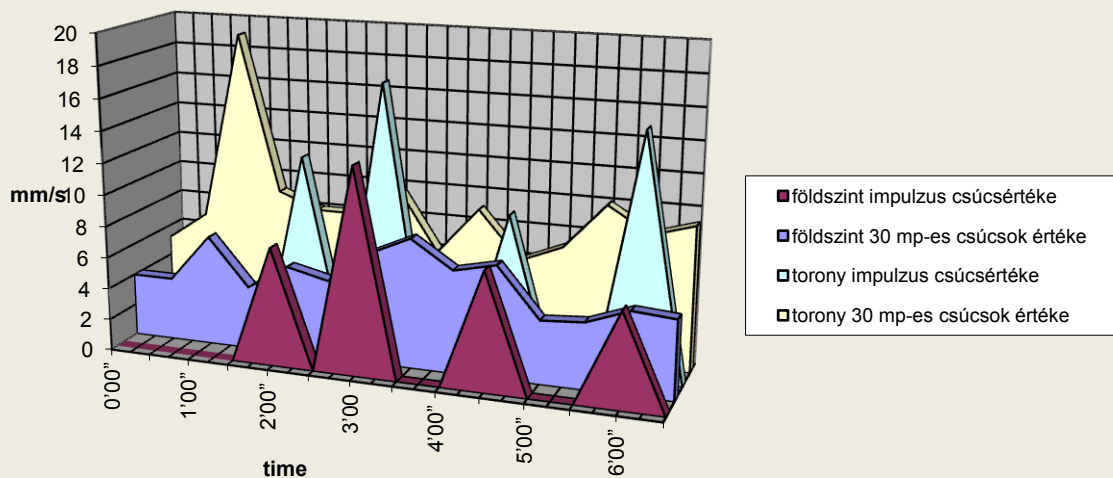
Mérések eredményei (30 mp-es csúcsok)

Út tengelyével párhuzamos mérések (mms^{-1})

idő ', ''	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	torony 30 mp-es csúcsok értéke	torony impulzus csúcsértéke
0'00''	4,0		5,2	
0'30''	4,0		7,0	
1'00''	7,0 busz		19,0	
1'30''	4,0		9,0	
2'00''	5,6	1.: 7,5	8,0	12,0
2'30''	5,0		8,0	
3'00''	7,0	2.: 13,0	10,0	17,0
3'30''	8,2		6,0	
4'00''	6,5 busz		9,0	
4'30''	7,1	3.: 7,5	6,0	9,5
5'00''	4,0		7,1	
5'30''	4,2		10,0	
6'00''	5,2	4.: 6,0	8,4	15,3
6'30''	5,0 busz		9,2	

Impulzus időpontok: 1: 1'56''
 2: 3'04''
 3: 4'53''
 4: 6'10''

Bécsi kapu téri Evangélikus templom



4. mérési pont: Dísz tér 15:

Egyemeletes zárt sorú beépítésű lakóház. A kapualjtól délre eső szárny a jelenlegi állapotában a XVIII. században létesült, a kapualjat, és a további részeket később építették hozzá. A II. világháborút követő helyreállítás során teljes falfeltárás és rekonstrukció történt. Az 1984-85-os felújítás során csak kisebb munkákat végeztek, szerkezeti átépítés nem történt. Az épület egyes részei vegyes falazatúak, az emeleti rész téglafalazatú.

A dísz téri homlokzat erősen tagolt, nagy méretű ablakokkal, kapuzatokkal.

Az épület arányai tekintetében tömörszerű. Szerkezeti szempontból a padlástéri falazatok karcsúnak tekinthetők.

Az épületben a földszinten postahivatal, az emeleten a Kulturális Örökségvédelmi Hivatal egyik részlege működik.

Az épület előtti úttest nagykockakő burkolatú, a járda aszfaltozott. Az úttest igen nagy forgalmú, a Várból déli irányba kihajtó minden jármű keresztül halad az épület előtti útkeresztmetszeten. A vári kisbusznak megállója van az épület előtt.

Az épület alatt pince található, az épület előtt az úttest alatt összefüggő, kiépített barlangrendszer. A barlangrendszer beton idomkövekkel megerősített.

Az épület kiválasztását frekventált helyzete, valamint az alatta és előtte húzódó pincék és barlangok indokolták.

Mérési pontok:

1. pont: Épület előtti barlang, az útpálya tengelyében. Mélysége: 5,60 m a felszíntől mérve.

2. pont: épület padlásán található harántfal, mely téglá szerkezetű. A magassága az úttesttől mérve: 11,00 m⁵

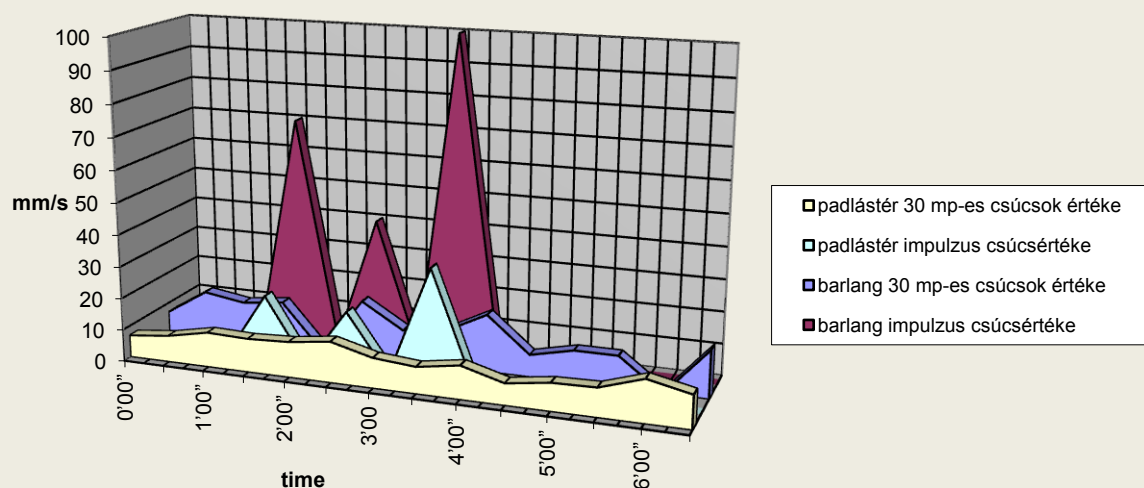
⁵ lásd: 11. és 12. fotómelléklet

Mérések eredményei (30 mp-es csúcsok)
Út tengelyére merőleges mérések (mms^{-1})

idő ', ''	barlang 30 mp-es csúcsok értéke	barlang impulzus csúcsértéke	padlástér 30 mp-es csúcsok értéke	padlástér impulzus csúcsértéke
0'00''	7,0		7,0	
0'30''	15,0		8,4	
1'00''	13,0		11,0	
1'30''	14,5	70,0	10,6	20,3
2'00''	20,0 busz		11,2	
2'30''	17,8	40,0	12,9	18,2
3'00''	10,0		9,5	
3'30''	11,3	100,0	8,4	34,7
4'00''	18,0		10,5	
4'30''	7,0		6,8	
5'00''	10,0		8,7	
5'30''	10,0		9,0	
6'00''	29,4 busz		13,3	
6'30''	15,0		10,4	

Impulzusok időpontja: 1: 1'28''
2: 2'14''
3: 3'20''

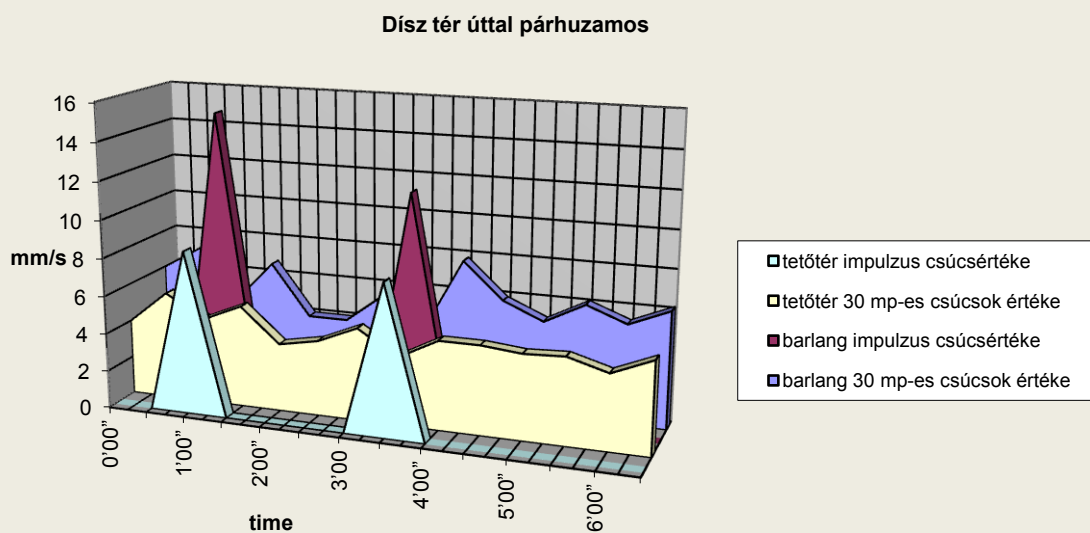
Dísz tér 15. útra merőleges



Út tengelyével párhuzamos mérések (mms^{-1})

idő ',"	barlang 30 mp-es csúcsok értéke	barlang impulzus csúcsértéke	tetőtér 30 mp-es csúcsok értéke	tetőtér impulzus csúcsértéke
0'00"	6,0		4,0	
0'30"	7,2		5,7	
1'00"	4,5	15,0	4,5	8,6
1'30"	6,7		5,4	
2'00"	4,0		3,6	
2'30"	4,0		4,0	
3'00"	5,6		4,9	
3'30"	3,9	11,6	3,6	8,0
4'00"	7,8		4,7	
4'30"	5,9		4,7	
5'00"	5,0		4,5	
5'30"	6,1		4,6	
6'00"	5,3		4,0	
6'30"	6,2		4,9	

Impulzus időpontja: 1'09"
3'15"



5. mérési pont: Tárnok utca 9-11 (iskola)

Az épület a hetvenes években épült. vasbeton szerkezetű kétemeletes építmény. Az épület homlokzata erősen tagolt, nagy méretű ablakok találhatók rajta. A vasbeton vázban az ablakok szerelőfalban helyezkednek el. Az épület Tárnok utcai traktusa a 80-as évek végén megsüllyedt, feltehetőleg az alatt húzódó barlangrendszer hatására. A süllyedést a mai napig jelzi a folyosó padlóján és falán jól kivehető repedés.

Az épület tömbje nem, a szerkezeti kialakítása (falazatai) karcsúnak minősíthetők. A vasbeton harántfalak és hosszfalakat pillérek osztják meg.

Az épület előtti úttest nagykockakő burkolatú, a járda aszfaltosított. Az úttest igen nagy forgalmú, kétirányú forgalom halad rajta. A vári kisbusz is elhalad az épület előtt.

Az épület alatt barlangrendszer található, melynek mélysége kb. 11-12 méter.

Mérési pontok:

1. pont földszinti utca homlokzat vasbeton pillér.
2. Második emeleti harántfal, illetve az ablak alatti parapetfal⁶.

⁶ lásd: 13. és 14. sz. fotómelléklet

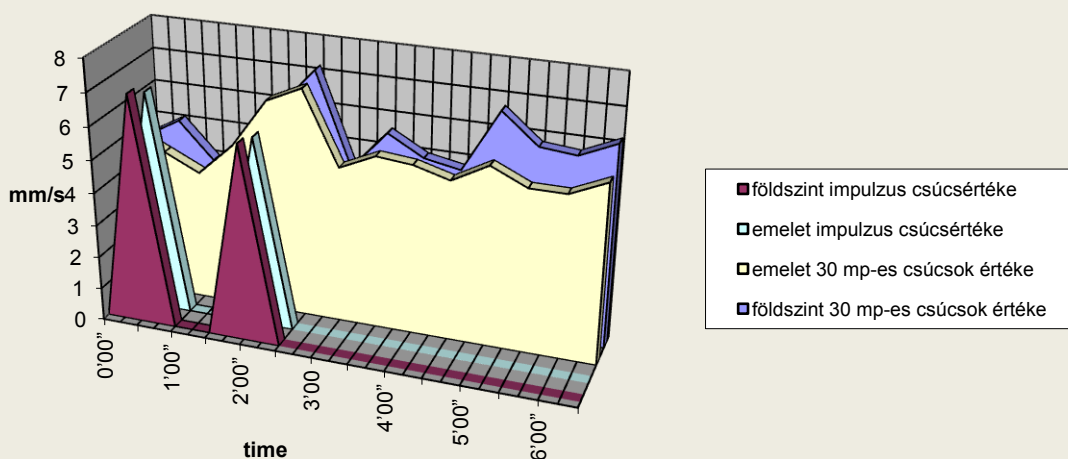
Mérések eredményei (30 mp-es csúcsok)

Út tengelyére merőleges mérések (mms^{-1})

idő ', ''	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	emelet 30 mp-es csúcsok értéke	emelet impulzus csúcsértéke
0'00''	4,5		5,0	
0'30''	5,1	7,0	4,5	6,7
1'00''	4,0		4,0	
1'30''	4,0		5,0	
2'00''	6,0	6,0	6,5	5,8
2'30''	7,2		7,0	
3'00''	4,4		4,8	
3'30''	5,6		5,3	
4'00''	5,0		5,2	
4'30''	4,8		4,9	
5'00''	6,7		5,5	
5'30''	5,8		5,0	
6'00''	5,7		5,0	
6'30''	6,2		5,5	

Impulzusok időpontja: 0'22''
1'50''

Tárnok u.9-11. útra merőleges

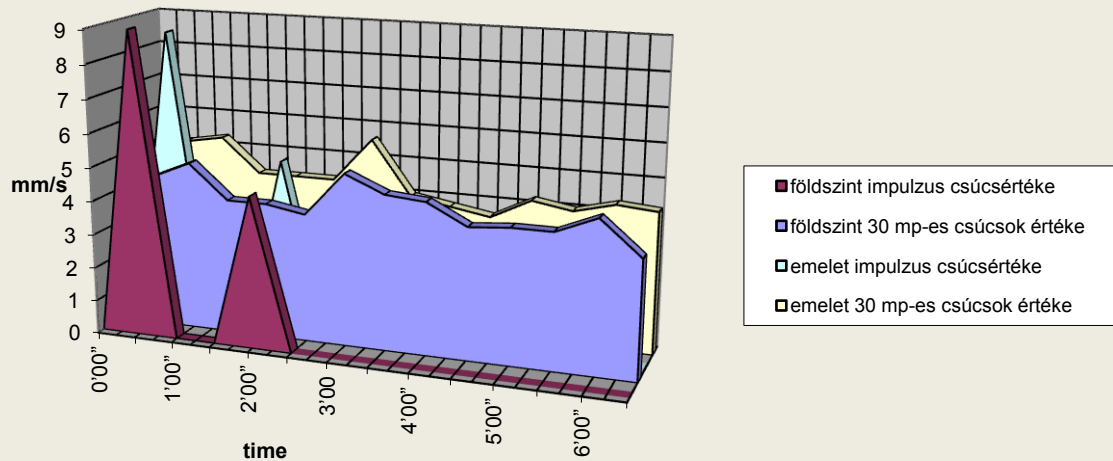


Út tengelyével párhuzamos mérések (mms⁻¹)

idő ',"	földszint 30 mp-es csúcsok értéke	földszint impulzus csúcsértéke	emelet 30 mp-es csúcsok értéke	emelet impulzus csúcsértéke
0'00"	4,5		5,0	
0'30"	4,5	9,0	5,1	8,6
1'00"	5,0		5,3	
1'30"	4,0		4,3	
2'00"	4,0	4,5	4,3	5,0
2'30"	3,8		4,3	
3'00"	5,1		5,6	
3'30"	4,6		4,0	
4'00"	4,5		3,8	
4'30"	3,9		3,6	
5'00"	4,0		4,2	
5'30"	4,0		4,0	
6'00"	4,5		4,3	
6'30"	3,5		4,2	

Impulzusok időpontja: 0'50"
2'10"

Tárnok utca 9-11. úttal párhuzamos



MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELÉSE:

A mérések átfogó elemzése megerősítette a BME azon megállapításait, hogy a vári épületek szokásos körülmények között a szabványban megengedett értéket meg nem haladó rezgésterhelést szenvednek. Az extrém esetekben (jelen esetben kényszerrezgés) pl. nagy súlyú gépkocsi áthaladása, az épületek közelében rázkódást keltő tevékenység végzése esetén azonban az épületek – felépítésüktől, szerkezetüktől függően – érzékenyebben reagálnak. Különösen érvényes ez azoknál az épületeknél, melyeknél a szerkezet, a felépítés miatti karcsúság párosul a nagy vibrációt okozó nehézgépjármű forgalommal. Bár szerkezeti elváltozást nem okoz, de – használati módja miatt - a Tárnok utcai iskola épülete is érzékeny a hosszan tartó, és a határérték 55-60 %-át már elérő rezgésekre.

1. Magdolna torony:

A háttérrezgések a 13018:1991 szabvány szerinti határértéket a felső födémen nem lépték túl.

A gerjesztett rezgés csúcsértéke a határértéket túllépte, ám mivel az ehhez hasonló mértékű rövididejű rezgés keltése nem valószínűsíthető az építmény környezetében, intézkedés nem szükséges.

A mérések azt mutatják, hogy a háttérrezgés egyenletesen oszlik el, és az emeleti szinten alacsonyabb, mint a földszinten. Annak oka a falak viszonylagos vastagsága, és vegyes szerkezete, mely okok miatt az egyenletes, folyamatos rezgések erős csillapítással haladnak a falazatban. Ezzel szemben az impulzusszerű zajok a toronyban magasabb mérési értéket mutatna: ez a torony karcsúságának tudható be. A mérési adatokból következtethető, hogy az építményt az állagára káros rezgés nem éri.

2. Országház utca 16:

A 10 Hz-en mért rezgések értéke az épület alapján az útra merőleges irányban jóval meghaladják a 13018:1991 szabvány határértékeit, az úttal párhuzamos rezgések értéke azonban az alatt marad.

Mind a háttérrezgés, mind az impulzusrezgés az épület szerkezetére az utcai homlokzaton erős hatást fejt ki, mely hatás az épület alatti mészkőrétegen felerősödik. A pincében mind a háttérrezgés, mind az impulzusrezgés erősebben jelentkezik, ám az épület szerkezetében – köszönhetően a falazat nagy szerkezeti vastagságának – nem okoz elváltozást.

A vári kisbuszok áthaladása a kényszerrezgés 8-10-szerese, mely hatás naponta több mint 80-90-szer ismétlődik. A mérési eredmények szerint a pincerendszer falazatára igen nagy mértékben átadódik az impulzusszerű rezgés (kisbusz áthaladása, kényszerített rezgés). Ennek oka egyrészt a vastag mészkőpaplan rezgéstovábbító hatása, másrészt az utca igen szűk keresztmetszete. Az egymással szemben álló házak alaptestei, az alattuk húzódó mészkőpaplan miatt a keresztirányú rezgéseknek nincs megfelelő helyük a „lecsengéshez”, azaz a csillapodáshoz.

Ezt az is igazolja, hogy az út tengelyével párhuzamos mérési irányokban a rezgések jóval kisebb értékeket mutatnak, azaz a rezgéseknek módjuk van ebben az irányban lefutniuk, csillapodniuk.

3. Bécsi kapu téri evangélikus templom:

A 10 Hz-en mért rezgések értéke az épület tornyának legfelső födémén az úttal párhuzamos irányban 50 – 100 %-al meghaladják a 13018:1991 szabvány határértékeit. Merőleges irányú mérésre nem volt lehetőségünk, de a többi mérés eredményei alapján valószínűsíthető, hogy azok még magasabb értéket mutatnának. A mérés eredményének vizsgálatakor azonban figyelembe kell venni, hogy a mérési hely az épület tömbjén túlnyúló, karcsú szerkezetű, és az épület alsó szintjeinél vékonyabb falazatú szerkezetben lett kijelölve. Tehát ezen a helyen a rezgések az épület egyéb részeinél – pl. a szabvány szerinti „legfelső” födémnél erősebben jelentkeznek. Am éppen érzékenységénél fogva találtuk fontosnak a torony viselkedésének vizsgálatát.

A szabvány 4.2. pontja szerint a födémén mért $20 \text{ mm}^{\text{s}^{-1}}$ csúcstértékű rezgésebbesség esetén nem várható a használati érték csökkenése.

A mérések azt mutatják, hogy a vári kisbusz megállása, indulása, az buszokat kerülő gépjárművek együttes hatása mind az épület falára, mind a toronyra hasonló nagyságú és igen magas dinamikus hatást fejt ki. Ez a hatás sok esetben megközelíti az általunk a vizsgálat során keltett kényszerrezgést. Megfigyeléseink szerint az Országház utcában a kisbusz haladása az úttest tengelyének irányában jóval alacsonyabb értéket ad, mint ezen a mérőponton.

4. Dísz tér 15:

A 10 Hz-en mért rezgések értéke az épület legfelső födémén az útra merőleges irányban meghaladják a 13018:1991 szabvány határértékeit, az úttal párhuzamos rezgések értéke azonban az alatt marad. Az épület alapjainak rezgésmérése nem történt meg, ehelyett az épület előtt húzódó barlangra jutó rezgést vizsgáltuk annak ellenére, hogy a szabvány ilyen szerkezetekre nem ad meg határértéket, a 3.3.5. szakasza csak utal a kiegészítő vizsgálat lehetőségére.

Az épület a rezgéseket jól viseli, bár a vári kisbusz megállóba érkezése és indulása terheli az épületet. Ezen a ponton még közrejátszik az a tény is, hogy kisbusz a Dísz téren változó, 1- 3 perces állásidőt tart, és a közben járó motor zaja, valamint rezgése a nagy méretű földszinti ablakokra, ajtókra, az emelet folyosó ablakjaira hatással van.

A rezgések hatását csökkenti az épületre, hogy a térszín burkolata igen nagy keresztmetszetű, így a rezgések csillapítására van elég hely.

A szabvány 4.2. pontja szerint a födémén mért 20 mms^{-1} csúcstértékű rezgésebbesség esetén sem várható a használati érték csökkenése, így intézkedés nem szükséges.

5. Tárnok utcai iskola:

A mérések alapján megállapítható, hogy az épület szerkezete a rezgésektől nem annyira terhelt, mint a többi vizsgált épület. Ennek több oka is van: a gépkocsi áthaladás folyamatos, és vízszintes, tehát sem emelkedő, sem a lejtőn való fékezés nem károsítja az épületet. Igen fontos tényező, hogy a Tárnok utca maga is széles,

az épületek több, mint 20 méterre állnak egymással szemben, tehát a rezgéseknek van terük a kifutáshoz.

Megfigyelhető, hogy a rezgések szinte ugyanakkora erősséggel jelennek meg az emeleti, mint a földszinti falazatban, ami igazolja azt az elméleti megállapítást, hogy a betonszerkezet a rezgéseket kevésbé csillapítja, mint a kő vagy téglaszerkezetek.

Problémát az jelent, hogy az épület szerkezeti felépítéséből eredően egymáshoz illesztett részei – ablakok keretei, a belső lépcsők – a rezgések hatására megmozdulhatnak, majd egy idő után egymástól elválhatnak.

A tárgyi épület azonban komoly elváltozásokat szenvedett – valószínűleg az alatta húzódó barlang hatására. Mint már említettük az utcai traktusa megsüllyedt, és ez a süllyedés még nem konszolidálódott. Ez a mozgás és a rezgések által keltett hatások felerősíthetik egymást, ezért javasoljuk az épület állagának folyamatos figyelemmel kísérését.

A rezgések hatása a föld alatti szerkezetekre.

Mérésünk során két helyen – a Dísz téren és az Országház utcában – mértük a föld alatt a rezgések hatását. Az első ponton egy már megerősített barlang betonfala, a másik helyen az épület alatt húzódó pince több száz éves falazata volt a mérési felület.

Megállapítottuk, hogy mindkét helyen a közlekedés által keltett rezgések igen erősen jelennek meg: rezgésebbességük többszöröse az épületen megjelenő rezgésnek. Ennek elsődleges oka, hogy a kockakővel burkolt úttest, valamint az alatta található mészkőpaplan igen erősen vezeti a rezgéseket. Az üregek falazata továbbítja a mozgásokat, és egyúttal károsodik is a rezgések hatására.

A gépjárműforgalom által keltett impulzusok a mészkőpaplant – annak ridegsége miatt – erősen károsítják. Ez a hatás fokozódik ott, ahol a mészkő alatt üreg található, tehát nincs meg a lehetősége a rugalmas felfekvésnek (a mészkő alatti márga ugyanis alkalmas a rezgések csillapítására).

A merev mészkőben repedések indulnak meg, és ez - mivel a mészkő húzó- és hajlító-szilárdsága, valamint nyírás elleni ellenállóképessége csak töredéke a nyomás szembeni ellenállóképességnek - az alátámasztatlan felület berogyásához, leszakadásához vezethet.

ÉPÜLETEK REZGÉS ELLENI VÉDELME, JAVASLATOK AZ ELVÉGZETT MÉRÉSEK ALAPJÁN

Nehéz helyzetben van a szakember, amikor az épületek rezgés elleni védelmének módozatait kell meghatározni. Ennek oka az, hogy a tudományos, építészeti szakirodalomban a mai napig nincs korrekt feldolgozása ennek a problémának, és műszaki irányelvek sem ismertek e feladat elvégzéséhez.

Az épületek statikai tervezési elvei a rezgésekkel kapcsolatban két esetre adnak meghatározásokat: a földrengések által keltett rezgésekre és a szél által okozott kilengésekre.

Külön tudományág a gépalapok tervezése, melyen belül minden esetben ki kell térni az alaptest rezgéssel szembeni ellenállására, valamint az alaptest alatti földtömeg rezgésvédelmére.

A jogszabályok és szabványok pontosan meghatározzák az építmények rezgési határértékeit, mind az épületszerkezetek, mind a benne tartózkodók szempontjából – ám nem adnak műszaki megoldást ennek a követelménynek a teljesítésére.

Az egyes települések rendezési tervei, építési szabályzatai külön fejezetet szentelnek a zaj- és rezgésvédelemre, de ez utóbbi problémát megoldottnak látják azzal a kikötéssel, hogy „a rezgésérték nem haladhatja meg a szabványban, a jogszabályokban előírt értéket”.

Amint azt korábban már leírtuk, az általános tervezési irányelvek, szabályok szerint a 476 kg/m²-nél nagyobb súlyú épületszerkezet rezgés ellen védettnek minősíthető. Ez a meghatározás („ökölszabály”) is akadályozza azt, hogy a szerkezetek rezgésvédelmének metódusa kidolgozásra kerüljön.

Jelen vizsgálatok célja az épületrezgések mérése, ám célszerűnek látjuk a vizsgálat következtetéseinek levonása után megoldási javaslat megadását.

Mivel ehhez hasonló vizsgálat és elemzés tudomásunk szerint nem készült még az országban, vállalkozásunkat igen fontosnak tekinthetjük – különösen figyelembe véve azt a tényt, hogy jelen esetben műemlékek védelméről kell gondoskodni.

Az épületek rezgésvédelme.

Egy-egy új épület megtervezésekor, megépítésekor előirányzatra kerülnek azok a műszaki megoldásokat, melyek a különféle állékonysági feltételek teljesítéséhez vezetnek (süllyedés, szél, kidőlés elleni védelem stb.).

Ezek közé – a közúti közlekedés várható drasztikus növekedése okán – hamarosan fel kell venni az épületek rezgéselleni védelmét. Gondoljuk csak át: az építési szabályzatok között csak az elmúlt 20 évben jelentek meg a közlekedés által keltett zajok elleni védelem előírásai, és ma már minden naposak az ilyen hatások elleni védelem megoldásai (zajvédő falak, zajszigetelő nyílászárók stb.).

A rezgés elleni védelem két módon lehetséges: magának az épület szerkezetének olyan kialakítása, mely véd a rezgés ellen, illetve az épülethez jutó rezgések csökkentésének módszere.

Az előbbiek közé tartoznak a „rugalmas” anyagok használata, dilatáció képzése, rezgéscsillapító alap építése. Ezek a megoldások új szerkezetek kialakításakor ma már nem ismeretlen eljárások, a különféle gépeket, berendezéseket magukba foglaló építmények tervezésekor számolnak e hatással.

Rugalmas anyagokat helyezhetnek a gépalapok alá, a rezgést elszennedő tömböt elszigetelik az építmény többi részétől, vagy éppen maga a berendezés, a gép kap rugalmas, rezgéscsillapító rögzítést. Ismertek ún. antivibrátorok is, ezek a rezgések interferenciáját használják ki.

Sokkal nehezebb ugyanezeket a megoldásokat megvalósítani a közlekedés által keltett rezgések esetében. Ennek oka, hogy

- ezek a rezgések önmagukban nem vagy csak ritkán érik el a határértéket,
- a rezgés forrását jelentő berendezés (gépjármű) szerkezete nem változtatható csak bizonyos megkötésekkel
- a közlekedés által keltett rezgések lassan, hosszú idő alatt fejtik ki káros hatásukat,

rendszerint már meglévő épületet kell védeni a rezgés ellen⁷.

Már meglévő épületek rezgés elleni védelme, főleg abban az esetben, amikor – mint itt – műemléképületről van szó, igen összetett és bonyolult feladat. Az épület szerkezetébe történő beavatkozást el kell vetni, ezért két út maradt:

- a rezgések keltésének csökkentése, illetve
- a rezgéseknek a szerkezethez való eljutásának csökkentése.

Mindkét problémára az alábbi műszaki és forgalomszervezési megoldást vázoltuk fel:

A rezgéskeltés csökkentésének műszaki megoldása jelen esetben rugalmas, a rezgések megjelenését erősen csillapító anyagok használata lehet. Mint azt már fentebb részleteztük, a vári közutakra jellemző nagykockakő burkolat bazalt anyaga majd kétszer jobban vezeti a rezgéseket, mint az általánosan használt aszfalt.

Megoldás lehet tehát a rezgéssel különösen veszélyeztetett épületek környezetében a burkolat aszfaltra cserélése. Ennek ellentmond az a tény, hogy a Budai Vár műemléki együtteshez jobban illeszkedik a kockakő burkolat az úttesteken.

A következő javasolt megoldás - amennyiben a burkolat anyaga nem módosítható – az lehet, ha a különösen veszélyeztetett objektumok közelében a bazalt kockakő burkolat alatti betonágyazata homokos kavicságyazatra módosul. Ebben az esetben az útpálya teherbírása lecsökkenhet, de egy általános súlycsökkentési folyamat egyéb szempontokból is hasznos volna a Vár területén.

Amennyiben a burkolatok alatt nem betonágy, hanem a rezgéseket jól csillapító szemcsés anyag helyezkedik el, előnyösen módosulnak a térszín alatti szerkezetekre (pincékre, barlangokra) jutó rezgések is. A burkolatról lefelé irányuló rezgés a kavicságyban elnyelődve nem juthat a mészkőpaplanhoz, ezzel annak károsodása, és rezgés közvetítő hatása is jelentősen csökkenhet.

Műszaki megoldások a rezgések terjedésének csillapítására

Mint azt már az előbbiekben leírtuk, a rezgések haladásának csillapítása rugalmas anyag beépítésével, vagy mozgási hézagok kialakításával oldható meg. Újnan épült épületeknél, gépek alapjainál ismeretes az a megoldás, hogy gumilemezt alkalmaznak erre a célra – megfelelő stabilitási számítások után. Ám a jelen esetben, régi épületeknél ez nem lehetséges.

Mint azt a rezgések terjedéséről, épületszerkezetekre gyakorolt hatásáról szóló részben leírtuk, a forgalom által keltett rezgések jelentős részét maguk az útburkolatok, illetve az alattuk található betonágyazat közvetíti az épületekre.

Ez a közvetítő hatás az imént leírt burkolatcserével vagy burkolatalap cserével csökkenthető.

Mozgási hézag kialakítása

Abban az esetben, ha nincs mód a burkolatok, burkolatalapok cseréjére, megoldás lehet a mozgási hézagok kialakítása. A mozgási hézagok lehetnek felszínközeli, ebben az esetben csak az útburkolat és az alatta található betonágyazat által

⁷ Erre jó példa Hyderebad indiai város egyik jelentős műemléke, a Charminar kapu. Az elmúlt húsz év alatt annyira megnövekedett a kapu alatt a közúti forgalom (melyhez hozzáadódott a szerkezet alatt futó metróvonal által keltett rezgés is), hogy a kapuzat teljes megsemmisülésétől kellett tartani. Az illetékesek a kapu 500 méteres körzetéből javasolták kitiltani a gépkocsiforgalmat, megelőzendő a tovább károsodást.

közvetített rezgéseket csökkentik. E megoldás vázlatos elrendezését az alábbi rajz tartalmazza

A megoldás lényege, hogy az épület fala mellett a burkolat és a burkolatalap vastagságával megegyező rést nyitunk, és azt rezgéscsillapító hézagkitöltéssel látjuk el. Természetesen gondoskodni kell arról, hogy a hézagba a csapadékvíz, az úttest mosására használatos víz ne juthasson be.

A hézag szélességét az útburkolat minősége és a rezgésterhelés nagysága határozza meg.

A hézag karbantartásáról, felügyeletéről gondoskodni kell.

A megoldás lényege: a fal mellett, annak teljes mélységében a meglévő talaj kiemelésre kerül, és egy lefelé keskenyedő trapéz alakban rezgéscsillapító ágyazati anyag kerül a szerkezet mellé. A felső, térszínhez közeli réteg az előzőekben kerül kialakításra.

A töltőanyagnak megfelelő szemcseeloszlásúnak kell lennie ($d_{max}=30$ mm), és gondoskodni kell arról, hogy nagy méretű kövek, törmelék ne kerülhessen be. A tömörítés mértéke maximum $tr_{\square} = 80$ % lehet, ám gondoskodni kell arról, hogy a felszín ne süllyedhessen be (gépjárműforgalom nem haladhat el felette).

A rezgések csökkentése forgalomtechnikai megoldásokat is igényel – mivel a gépkocsiállomány minőségi változása az elkövetkező tíz évben nem várható. A forgalomtechnikai megoldásokkal arra kell törekedni, hogy a veszélyeztetett épületek környezetéből elvigyük, vagy teljesen lecsökkentsük a forgalmat.

A mérések során nem került sor az egyik legfontosabb vári utca vizsgálatára. Immár 26 éve, 1994 óta van zárva a Budai Vár Táncsics Mihály utcája, ahol egyértelműen megállapítható volt, hogy a több évtizeden át itt haladó közúti forgalom okozta azokat a károsodásokat, melyek a mai napig szükségessé teszik az utca lezárását.

Aki emlékszik arra, illetve az azt megelőző időszakra, az tudja, hogy ezen az utcán futott a vári forgalom jelentős része, és itt közlekedett a Deák térről induló, és a Moszkva térre haladó 16-os autóbusz több mint 30 éven át. A napi több tucatnyi áthaladás mind az utca alatti barlangrendszereket, mind az igen szűk utca két oldalán álló épületeket olyan rezgéssel terhelte, amelyek az épületek utcai homlokzatának megrepedéséhez, az úttest alatti barlangrendszer majdnem végzetes károsodásához vezettek.

Az utca lezárva tartása egy ideig igen nagy problémát okozott a Vár életében, de az ott lakók örültek annak, hogy megszűnt az átmenő forgalom az utcájukban. S mára ez az állapot állandósult – az újbóli megnyitással ez a hatás újra felléphet, és nem prognosztizálható előre, milyen hatással

2003-ban javasoltuk, hogy amennyiben a megnyitás elengedhetetlen, csakis személygépkocsi forgalom céljára, és igen határozott fizikai korlátozással megvalósított – tört vonalú útvezetés, vegyes (gyalogos és gépjárműforgalom) ún. holland mintájú forgalomcsillapító vonalvezetés – forgalom kerülhet csak vissza az úttestre. Igen fontos, hogy sem a vári kisbusz, sem más nagy súlyú gépkocsik ne használhassák az utcát.

Akkor szintén azt javasoltuk, hogy történjen meg az Országház utca és a Bécsi kapu tér forgalmának csillapítása. Ezen kívül a Dísz tér esetében károsító tényező, hogy igen gyakran haladnak át itt olyan emeletes, emelt padlójú turistabuszok, melyek diesel motorjuk, folyamatosan működő klímagépük által keltett rezgésükkel ma még fel nem mérhető károkat okoznak.

Az Evangélikus Templom esetében a buszmegálló áthelyezését javasoltuk átgondolni, mert a templom falzatának közvetlen közelében megálló és elinduló autóbuszok igen nagy rezgést adnak az épület falára.

Ezúton mondok köszönetet a munkában részt vevőknek, továbbá Kovács Lászlónénak az akkori Kulturális Örökségvédelmi Hivatal Műemlékek Állami Gondnokságának munkatársának, Vlazsovits Károly úrnak, és Balicza Iván lelkész úrnak a munkában való segítségért.

2020. május

Mednyánszky Miklós
földtani szakértő, műemlékvédelmi szakértő

FOTÓMELLÉKLETEK



1. fotó: A Bruel and Kjaer 2511 rezgésmérő műszer fotója

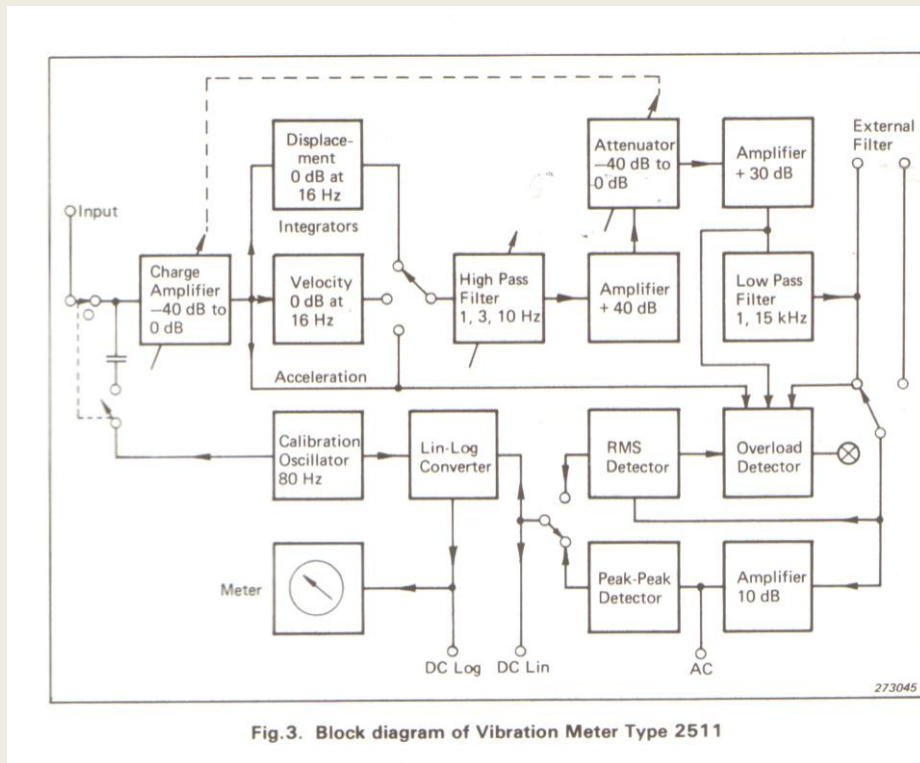


Fig.3. Block diagram of Vibration Meter Type 2511

2.fotó: A 2511-es rezgésmérő műszer blokkdiagramja



3. fotó: A mérőlemez rögzítése



4. fotó: Rezgés mérő műszer mérés közben



5. fotó A mérés előkészítése a Magdolna torony földszintjén



6. fotó: Mérőműszer a Magdolna torony felső szintjén



7. fotó: Mérőfej rögzítése az Országház utca 16. sz. pincefalazatán



8. fotó: Az Országház utca 16.sz. alatti pince (kiállítótér)



9. fotó: Mérési hely rögzítése a Bécsi kapu téri evangélikus templom tornyában



10. fotó: Az evangélikus templom harangtornya



11. fotó Mérőlemez rögzítése a Dísz tér alatti barlang falazatán



12. fotó: Mérési hely a Dísz tér 15.sz padlásán



13. Mérés a Tárnok utca 9-11.sz. alatti iskola emeletén



14. fotó: Mérési hely rögzítése a Tárnok utcai iskolában