

Talajdinamikai paraméterek meghatározása és alkalmazása

A hazai építőmérnöki gyakorlatban a talajok mechanikai vizsgálata eddig legfőképp statikus vagy kvázi statikus esetekre irányult. Napjainkban ugyanakkor számos nemzetközi kutatás foglalkozik a dinamikus talajviselkedés megértésével és leírásával. Ez annak köszönhető, hogy a tervezési gyakorlatban is egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a növekvő közúti és vasúti eredetű dinamikus hatások csakúgy, mint a földrengésre való méretezés. Írásunkban áttekintjük a talajok dinamikus terhek alatti viselkedésének anyagmodelllezési vonatkozásait. Ehhez kapcsolódóan röviden bemutatjuk a laboratóriumi és helyszíni mérési módszereket, végül a témához kapcsolódó külföldi cikkeket ismertetünk.

Napjainkban a vasúti közlekedés fejlesztése Magyarországon és külföldön is az építőmérnöki szakma egyik fontos területe. A meglévő pályarendszer a megnövekedett forgalom, a nagyobb tervezési sebességek és a sokszor igen kedvezőtlen altalajadottságok miatt folyamatos karbantartást igényel. Emellett pedig távlati cél a nagysebességű vasútvonalak kiépítése, kifejlesztése, hogy ezáltal csatlakozzunk a nagysebességű transzeurópai vasúti hálózathoz. E cél elérésére európai uniós irányelvek is köteleznek minket.

Az igen puha, telített és sokszor szerves altalajra épített pályaszakaszok vizsgálata és megerősítése régóta központi kérdés, de a mai gyakorlat általában még ezeket a legrosszabb szakaszokat is helyettesítő statikus terhekre méretezi – pontosabb eljárások hiányában. A pontosabb számításokhoz, hatékonyabb megoldásokhoz fontos lenne ezért, hogy a vasúti teher altalajra jutó ciklikus és dinamikus hatásait is vizsgáljuk, ehhez azonban elengedhetetlen az altalaj dinamikus modellezéséhez szükséges bemenő paraméterek meghatározása.

A nagy sebességgel közlekedő vonatok számos különleges kihívás elé állítják a mérnököket, a szigorú biztonsági előírások miatt például különösen nehéz teljesíteni a pálya geometriájára vonatkozó követelményeket. További problémákat okozhat emellett – egyebek között – a zajterhelés és a vasúti forgalom okozta rezgések, melyek a talajban továbbterjedve



Dr. Richard P. Ray

egyetemi tanár

SZE Szerkezetépítési és

Geotechnikai Tanszék

✉ ray@sze.hu

☎ (30) 298-6010



Szilvagyai Zsolt

egyetemi tanársegéd

SZE Szerkezetépítési és

Geotechnikai Tanszék

✉ szilvagyai@sze.hu

☎ (30) 530-4204



Wolf Ákos

egyetemi tanársegéd

SZE Szerkezetépítési és

Geotechnikai Tanszék

✉ wolf@sze.hu

☎ (30) 641-0431

káros hatással lehetnek más mérnöki szerkezetekre, köztük az épületekre is.

A vasút által keltett dinamikus és ciklikus hatások vizsgálata során, a teljes rendszer felépítését figyelembe véve kaphatunk csak pontos eredményt. Meg kell határozni a terhelés jellemzőit (mely függ a vonatok jellemzőitől, a tervezési sebességtől), a felépítmény (sín, sínleerősítés, aljak, ágyazat) elemeinek jellemzőit és ezek esetleges hibáit, valamint az alépítmény és az altalaj tulajdonságait is. A fentiek közül talán az altalaj az a rendszerelem, amelyet a tervezés és kivitelezés során a legkevésbé befolyásolhatunk. A vasúti közlekedés okozta dinamikus és ciklikus hatások értékeléséhez – esetleges csökkentéséhez – szükséges megoldások tehát az altalaj dinamikus viselkedésének pontos ismeretében mérlegelhetők. A továbbiakban röviden összefoglaljuk a legfontosabb dinamikus talajparamétereket, amelyek szükségesek az említett vizsgálatok elvégzéséhez, áttekintjük e paraméterek in situ és laboratóriumi meghatározási módjait, és három kiválasztott cikk révén röviden kitekintünk a nemzetközi kutatásokra.

Dinamikusan terhelt talajok viselkedése

Anyagmodellek

A talajok dinamikus terhelés alatti viselkedésének leírására használt anyagmodel-

lek meglehetősen komplexek. Egy ilyen modellben figyelembe kell venni, hogy a talajok fázisos összetételűek, a szilárd talajszemcsék között pórusok találhatóak, melyeket bizonyos mértékig (vagy teljesen) víz tölthet ki. Mechanikai szempontból a talajokat anizotróp és nemlineáris anyagoknak kell tekintenünk. Számos kutatás igazolta, hogy például száraz szemcsés talajok esetén csak a nagyon kis alakváltozások tartományában tekinthetünk el a nemlinearitástól (nyírási alakváltozás $\gamma < 10^{-4}\%$). Megfigyelhető, hogy az alakváltozás (és ezzel összefüggésben a feszültség) növekedésével a nyírással szembeni ellenállás fokozatosan csökken, a kezdeti lineárisan rugalmas szakaszhoz tartozó nyírási modulus (G_{max}) romlik (1. ábra). Ezzel párhuzamosan a talaj hiszterézises viselkedést mutat, és az alakváltozás növekedésével nő az energiaelnyelő képessége, amelyet a csillapítással (D) jellemezhetünk.

A nyírási modulus akár az eredeti érték 5-10%-ára is csökkenhet. A leromlás jellegű viselkedés leírására számos kutató dolgozott már ki anyagmodelleket (Jardine 1986, Ramberg-Osgood 1948, Benz 2008). Ezek a modellek ún. leromlási görbe és csillapítási görbe megadásával kezelik a talajok igen kis alakváltozási tartományban tapasztalt viselkedését, és csak akkor adhatnak reális, pontos eredményeket, ha a szükséges modellparamétereket kellően gondos laboratóriumi vagy helyszíni mérésekből határozzuk meg.

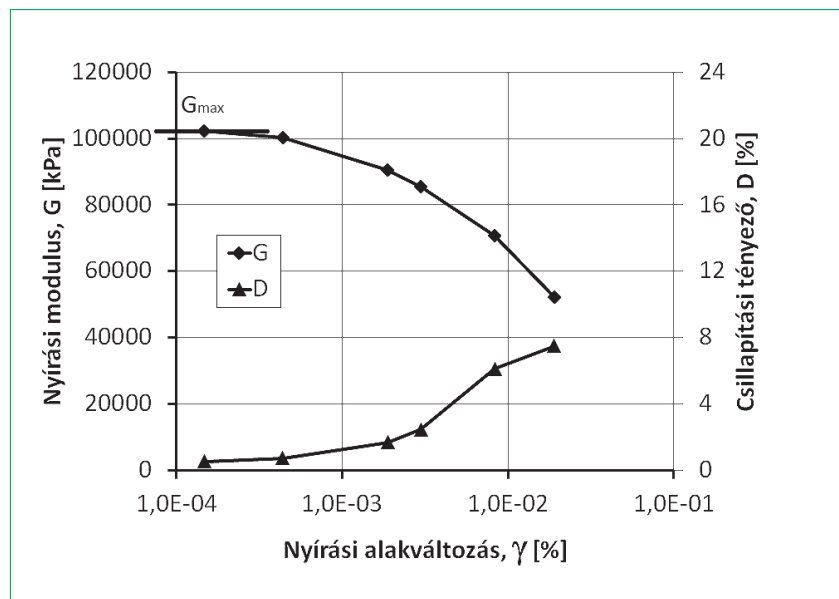
Más megközelítésben, a hagyományos „statikus” körülmények között végzett geotechnikai laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehet figyelembe venni a kis alakváltozásokhoz tartozó nagyobb merevséget. A vasúti közlekedés okozta rezgések jellemzően ilyen nagyságrendű alakváltozási tartományba tartoznak (2. ábra). Az említett anyagmodellek közül néhány már a korszerű geotechnikus végeleemes programokban is elérhető (Plaxis – Hardening Soil Small Strain Stiffness).

Megjegyezzük, hogy a talajkörnyezetet a gyakorlati számításokban és még a kutatások területén is leggyakrabban vízszintes, homogénnek és izotrópnak tekintett rétegekre bontva vizsgáljuk, ezek a feltételezések általában elfogadható közelítésnek tekinthetők. A nemzetközi szakirodalom a vasúti közlekedés keltette rezgések vizsgálatához pedig leggyakrabban a lineárisan rugalmas viselkedést is feltételezi (nagy hangsúlyt fektetve a merevség felvételére).

Talajparaméterek

A.3. ábrán egy ciklikusan terhelt talajminta tipikus feszültség-alakváltozás görbéit láthatjuk különböző alakváltozási szinteken. A görbéket ciklikus torziós nyírásvizsgálatból kaptuk. Megfigyelhető, hogy minden esetben a terhelés után, a tehermentesítés során a feszültségpálya nem követi az eredeti feszültségpályát, hiszterézis hurok alakul ki. A hurok a talaj energiaelnyelő képességét fejezi ki. Az energiaelnyelést számos mechanizmus okozza, így például a talajszemcsék közötti súrlódás, továbbá a szemcseváz és a pórusvíz közötti relatív elmozdulások. A hurok által közrezárt terület arányos az energiaelnyelő képességgel, ennek leírására használatos a csillapítás, amely az alakváltozás növekedésével nő, így egyre nagyobb alakváltozási szinthez egyre nyitottabb hiszterézis hurok tartozik. Az ábrán az is megfigyelhető, hogy az egy ciklusra vett átlagos nyírási modulus, amelyet a hurok csúcspontjait összekötő egyenes meredekségével definiálhatunk, a nyírási alakváltozás növekedésével egyre kisebb, azaz a hurkok egyre nagyobb alakváltozási szinten egyre „laposabbak”, ezért beszélünk a modulus romlásáról.

A viselkedés leírásához szükségünk van a kezdeti nyírási modulusra (G_{max}); a modulus romlását leíró görbére (4. ábra), amelyet gyakran a pillanatnyi és a kezdeti modulus hányadosával szoktak megadni (G/G_{max}); valamint a csillapítás-alakválto-



1. ábra. Leromlási görbe és csillapítási görbe – ciklikus torziós nyírásvizsgálat eredményei

zás függvényére, azaz a csillapítási görbére. Ezeket a paramétereket különböző helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok segítségével határozhatjuk meg. A helyszíni vizsgálatok előnye, hogy mintavételezés nélkül, vagyis a természetes állapot zavarása nélkül végezhetünk méréseket, és egy nagyobb talajkörnyezetre vonatkozó „eredő” értéket mérhetünk. Hátrányuk ugyanakkor, hogy csak az adott állapot (tömörség, víztartalom stb.) jellemzői mérhetők, és sokszor csak közvetetten kapunk paramétereket. A laboratóriumi mérésekben vizsgálhatjuk a különböző feszültségi állapotok és más állapotváltozások hatását is (pórusvíznyomás változása), viszont ilyenkor néhány „kis”

minta eredményeit kell felhasználnunk egy nagyobb közeg viselkedésének leírására.

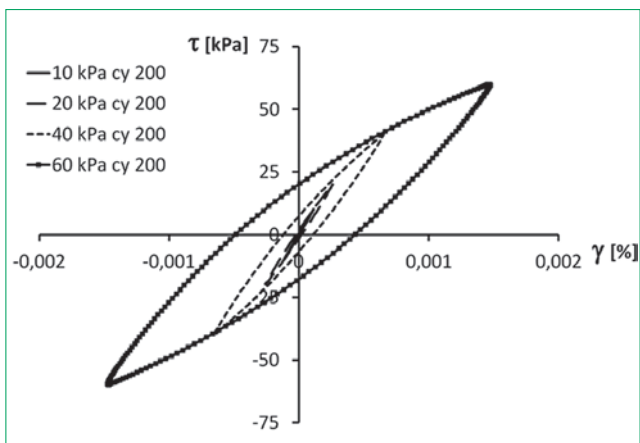
Helyszíni mérések

A helyszíni mérésekkel általában a nyíróhullámok terjedési sebességét (v_s) tudjuk meghatározni, esetenként a felületi hullám terjedési sebességének mérésére irányulnak a vizsgálatok. Ezekből empirikus úton számíthatjuk a talaj dinamikai paramétereit.

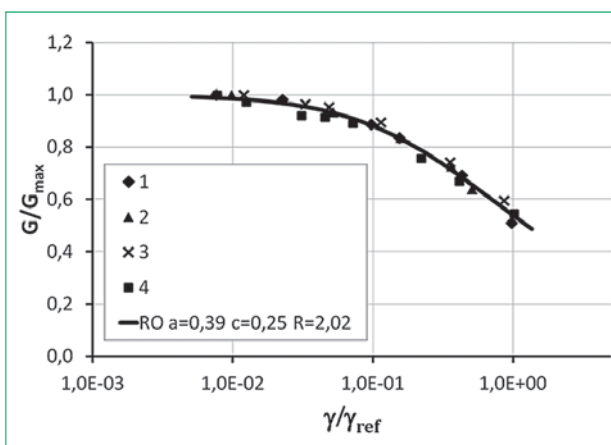
A helyszíni mérések során jellemzően egy ponton, valamilyen módon (mechanikus kalapács, robbantás, ejtő súly) gerjesztett, rövid idejű vagy állandó hullám

Nyírási alakváltozás	kis ← közepes ← nagy ← törés				Helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok
	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	
Jelenség	hullámterjedés, rezgések		repedések, süllyedéskülönbségek		szeizmikus hullámok terjedésének mérése
Lineárisan rugalmas	←→		←→		
Nemlineárisan rugalmas	←→				helyszíni rezgésvizsgálatok, rezonanciás vizsgálat
Rugalmas-képlékeny	←→				ciklikus terhelésvizsgálat
Törési állapot	←→				DMT, CPT, közvetlen nyírás
Teherismétlődés hatása	←→				ciklikus triaxiális vizsgálat, közvetlen nyírásvizsgálatok
Alakváltozások jellemző tartománya	lineárisan rugalmas	lin. rugalmasnak tekinthető	rugalmas-képlékeny, felkeményedő		gépalapok
	←→				földrendések
	←→				jól tervezett alpozások
	←→				építkezés puha altalajon

2. ábra. Talajok viselkedése különböző alakváltozási tartományokban (Ishihara 1996 nyomán)



3. ábra. Torziós nyírásvizsgálat eredményei különböző alakváltozási (feszültségi) szinten – minden esetben a 200. terhelési ciklust ábrázoltuk



4. ábra. Homok leromlási görbéje – rezonanciás és torziós nyíróvizsgálatok alapján

egy vagy több pontra való beérkezési idejét határozzák meg. A mérési eljárások alapvetően két fő csoportba sorolhatók. Az egyikben valamennyi mérőműszert a felszínen helyezik el, míg a másik fő csoportban a nagyobb pontosság érdekében vagy a vevőt, vagy az adót, vagy mindkettőt fúrólukban rögzítik.

Előbbi eljárások közül a legelterjedtebb a szeizmikus refrakciós módszer – ahogy a nevében is szerepel – a hullám két réteg határán való iránytorésének elvén alapul. A felszínen keltett hullámok a réteghatáron megtörnek, a kritikus szöggel beérkező hullám a réteghatáron terjed tovább, mely az úgynevezett kritikus távolságon túl először éri el az egyenletes távolságokban elhelyezett geofónokat. A csekély mélységig alkalmas eljárással a felszín közeli rétegekre jellemző nyíró-, illetve longitudinális hullám terjedési sebességeket lehet meghatározni. A módszer költségvonzata csekély a többihez képest, ám csak akkor használható, ha a rétegsébségek a mélységgel nőnek.

Fúrólukban végezhető mérések a downhole, up-hole és crosshole vizsgálatok. A downhole mérés során egy fúrólukban 0,5–1,0 m mélységközökkel végigvezetnek egy érzékelőt (geofónt vagy

gyorsulásmérőt), mellyel a felszínen keltett longitudinális és transzverzális hullámok beérkezési idejét mérik. A különböző mélységekből származó adathalmazból – figyelembe véve a réteghatárokon való iránytorést – határozható meg a talajzónákra jellemző hullámterjedési sebesség. Az up-hole vizsgálat esetén a műszerek elhelyezése fordított, a fúrólukban történik a hullámgerjesztés, a felszínen meg az érzékelés. A crosshole vizsgálat során két vagy több fúrólukra van szükség, hiszen mind a hullámgerjesztő műszer, mind pedig az érzékelők egy-egy fúrólukban helyezkednek el. Egy mérés során a műszerek azonos mélységben helyezkednek el, majd ezután a mérést 0,5–1,0 m mélységközökként ismétlik. E módszer tekinthető a legpontosabb eljárásnak az in situ mérési technológiák közül, s a pontosság tovább fokozható a fúrólukak számának növelésével. A fúrólukas eljárások a furat készítéséből fakadóan meglehetősen költséges mérési módszerek.

A nemzetközi gyakorlatban, s hazánkban is egyre jobban terjed a lényegében a downhole eljárással analóg szeizmikus statikus szondázási vizsgálat (SCPT), mely a hagyományos statikus nyomószondázás (Cone Penetration Test – CPT) egyik vál-

tozata. Ekkor a vevő nem egy fúrólukban, hanem a – geotechnikai tervezési feladatokhoz manapság már szinte minden esetben alkalmazott – CPT (CPTu) berendezés fejében van kialakítva, így a hagyományos tervezési feladatokhoz nyert alapadatokon túl a talaj dinamikusan viselkedéséről is kapunk információt.

Az in situ méréseknél még megemlítenendő a szeizmikus tomográfia, a felületi hullámok módszere, melyek mára már háttérbe szorultak.

Laboratóriumi mérések

A leggyakrabban alkalmazott laboratóriumi vizsgálatok a dinamikusan talajparaméterek meghatározására a következők:

- talajhenger rezonanciás vizsgálata,
- ciklikus nyírásvizsgálat (közvetlen nyírás vagy torziós nyírás),
- ciklikus triaxiális vizsgálat,
- nyíróhullámok közvetlen mérése bender elementtel.

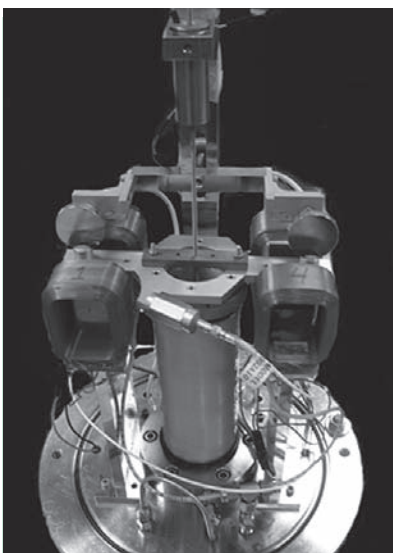
A vizsgálatok közötti legnagyobb különbség a talajmintában keltett alakváltozások (feszültségek) szintjében van (5. ábra). A már említett nemlineáris viselkedés miatt különösen fontos, hogy a valós problémánál fellépővel azonos alakváltozási tartományban végezzük a méréseinket. Ennek megfelelően a vizsgált

Dr. Richard P. Ray egyetemi tanár, 2011-től a Széchenyi István Egyetem Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszékének oktatója. A SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola előadója, több doktorandusz témavezetője. Korábban az amerikai South Carolina University egyetemi tanára volt, ahol 1983 és 2011 között oktatott és végzett kutatást Főbb szakterületei: a talajdinamika, talajok és alapozások rezgésvizsgálata, laboratóriumi és helyszíni mérések, számítógépes modellezés, alapozástervezés, talajvízáramlás és szennyezések talajban való terjedésének vizsgálata. Számos nemzetközi kutatás-fejlesztési projektben vett részt, kutatási eredményeit számos publikációban adta közre. Tudományos szakmai tevékenységéért több kitüntetést kapott. Tervezőmérnökként a többi között talajfolyósodással, földrengésre való méretezéssel, alapozástervezéssel, állékonyságvizsgálattal is foglalkozott.

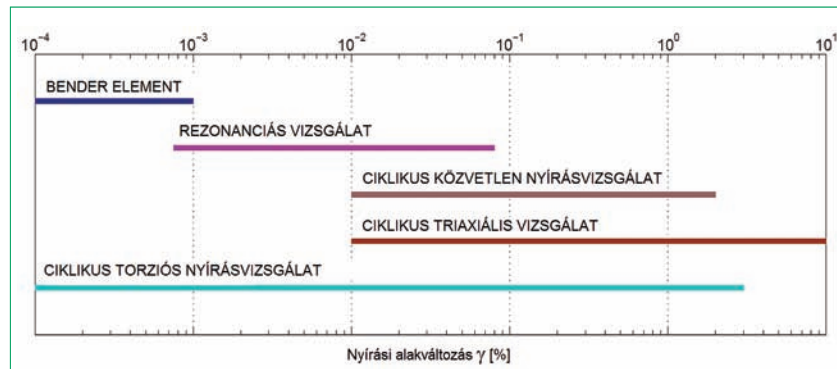
problémánál várhatóan fellépő alakváltozások mértéke befolyásolja a vizsgálati módszer kiválasztását. A rezonanciás vizsgálat során egy hengeres talajmintát terhelünk ciklikusan, torziós módon. A terhet a talajhenger tetejére helyezett mágneses-tekerceses terhelőfej adja át a mintára, és a vizsgálat során gyorsulásmérővel méri a minta választ (alakváltozását) rezonanciafrekvenciás terhelés mellett (6. ábra). A mérésből a nyíróhullám terjedési sebessége számítható, amelyből – a sűrűség ismeretével – számítható a nyírási modulus. A mintát szabad rezgés állapotába hozva mérhető a csillapítás is. Ezután a vizsgálat különböző cellanyomás, alakváltozási szint, terhelési idő mellett ugyanazon a mintán újra elvégezhető, hiszen a terhelés során nem érjük el a törési állapotot.

A ciklikus nyírásvizsgálatot is a leggyakrabban hengeres mintán végzik. A vizsgálat során a mintát a rezonanciás vizsgálatához hasonlóan terhelik, de nagyobb alakváltozási szinten. A vizsgálat során a talajmintában a vízszintes terhelő erőpár hatására a minta alakváltozásai hasonlóak, mint a függőlegesen terjedő nyíróhullámok által okozott alakváltozások, amelyek a földrengéskor fellépő hullámok közül a mérnöki tervezés szempontjából a legfontosabbak.

A ciklikus triaxiális vizsgálat az egyik leggyakrabban alkalmazott dinamikus vizsgálat, mivel a berendezéssel rendkívül sokféle terhelés modellezhető (7. ábra). A vizsgálatot a hagyományos triaxiális



6. ábra. Rezonanciás vizsgálatra és torziós nyírásra is alkalmas berendezés (Széchenyi István Egyetem, Geotechnikai Laboratórium)



5. ábra. Laboratóriumi vizsgálatok alakváltozás-tartományai

vizsgálatnál alkalmazott módon, hengeres talajmintán, oldalról támasztó cellanyomás segítségével végzik. A vizsgálatot használhatjuk a leromlási görbe és a csillapítási görbe meghatározásához is.

A bender elementes mérés során piezoelektromos anyagokkal keltenek hullámokat a talajmintában, és egy vevővel méri a nyíróhullám terjedési sebességét. A mérés az igen alacsony alakváltozási szintek vizsgálatára használható, nagy előnye, hogy más vizsgálatokkal kombinálva is használhatjuk, másrészt pedig, hogy a vizsgálatot különböző irányokban elvégezve a talaj esetleges anizotróp tulajdonságairól is kapunk információt.

Vasúti közlekedés okozta rezgések vizsgálati lehetőségei – külföldi kutatások

A vonat keltette dinamikus rezgések altalajra és szerkezetekre gyakorolt hatása nemzetközi tekintetben is új témának mondható, hazai kutatások geotechnikai vonatkozásban ez idáig nem készültek. Ugyanakkor számos nemzetközi kutatás folyik a vonatok dinamikus hatásának és a szerkezetek erre adott reakciójának minél pontosabb megismerésére, a hatékony méretezés, tervezés, üzemelés minél pontosabb kiszorgálására. Az alábbiakban három publikáció ismertetésével tekintünk ki a nemzetközi kutatásokra.

Costa és társai (2010) az altalaj és töltésanyag nemlineáris viselkedésének a felépítmény válaszára gyakorolt hatását vizsgálták, s ennek számításba vételére egy ekvivalens lineáris eljárást használtak. Az alkalmazott 2,5D numerikus modellel, melyen egyik irányba csak a terhelésben lehet változás, a svédországi Ledsgard környékén végzett nagyszámú monitoring mérés visszszámítását célozták meg. Az

elvégzett analízisek jó egyezést mutattak a mérési eredményekkel.

Varandas és társai (2011) azt vizsgálták, hogy a folyópálya és műtárgy közötti átmeneti zónában, térben és időben hogyan változik a mélyebb rétegekre irányuló teherátadás. A hollandiai kutatás keretében Gouda város környezetében egy vasbeton keret feletti átvezetést analízáltak végelemes módszerrel, melynek validálásához helyszíni monitoring mérési eredmények álltak rendelkezésre. A kutatás eredményeként megalkotott végelemes modell a szerkezet viselkedését jól írta le, eredményeikben rámutattak arra, hogy az átmeneti zónában, ezen belül pedig különösen ott, ahol lebegő talpfák vannak, jelentős igénybevételek ébrednek a csatlakozó szakaszokhoz képest.



7. ábra. Ciklikus triaxiális berendezés (Széchenyi István Egyetem, Geotechnikai Laboratórium)

Wolf Ákos 2009 óta a győri Széchenyi István Egyetem oktatója, 2012-től egyetemi tanársegéd a SZE Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszékén. 2010-ben kezdte PhD-tanulmányait a SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskolában. Fő kutatási területe: a cölöpök ciklikus és dinamikus teher alatti viselkedése. 2005-től, diplomája megszerzésétől a Geoplan Kft. geotechnikai tervezőjeként vett részt számos nagy hazai beruházás geotechnikai előkészítésében.

Battini és Ülker-Kaustell (2011) számos korábbi publikációjukra hivatkozva rámutatnak arra, hogy az ágyazátvezetéses, kis és közepes feszítávolságú hidak esetében a számított és mért sajátfrekvencia között jelentős eltérés mutatkozhat, a sajátfrekvencia a rezgés amplitúdójának függvénye. Battini és Ülker-Kaustell a hidak függőleges dinamikai vizsgálatához javasol egy modellezési fogást, amely az ágyazati réteg hatását hivatott számításba venni. Az ajánlás igazolására két esettanulmányon mutatják be annak alkalmazását.

Summary

In the Hungarian civil engineering practice up to now soil behavior has mainly been investigated in the frame of static or quasi-static approaches. However, nowadays in the international research field many researches focus on understanding and describing dynamic soil behavior. There is an increasing need to perform such researches because dynamic effects such as earthquake loading and vibrations induced by high speed trains are becoming more and more important in design. This paper gives an overview of constitutive modelling topics related to dynamic soil behavior and focuses on the main dynamic soil parameters which are used in the models. A short summary is given on laboratory and in-situ tests which may be used for determining these parameters. Finally three research papers are presented which indicate the state of the art investigations concerning vibration mitigation problems connected to railway traffic.

Összefoglalás

Az egyre növekvő közúti és (gyors)vasúti forgalomból származó rezgések, valamint a földrendésekkel fellépő dinamikus hatások figyelembevétele egyre fontosabb tervezési feladat. Az altalaj dinamikus viselkedésének elemzése különösen fontos lehet egyrészt olyan pályaszakaszok tervezésénél, illetve felújításánál, ahol a talajkörnyezet mechanikai jellemzői igen kedvezőtlenek, másrészt olyan, csak komplexen vizsgálható kapcsolódási pontoknál, mint például a folyópálya és egy hídszerkezet találkozása. A nemzetközi szakirodalomban ma már számos kutatás vizsgálja a vasúti pályarendszert az altalaj dinamikus viselkedését is figyelembe véve, hiszen – ahogy az említett esetekben is láthattuk – csak így érték el számításaikkal a mérésekben tapasztalt eredményeket.

A Széchenyi István Egyetem Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszékén a dr. Richard P. Ray vezetésével tevékenykedő kutatócsoport célja, hogy a rendelkezésre álló laboratóriumi berendezések (rezonanciás vizsgálóberendezés, ciklikus triaxiális berendezés, bender elemek) segítségével jobban megérthessük és leírassuk a jellemző hazai talajok dinamikus viselkedését, hogy ezáltal a tervezésben pontosabb számítások segítségével hatékonyabb megoldások születhessenek. ◀◀

Irodalomjegyzék

- Battini, J.-M., Ülker-Kaustell, M.* (2011): *A simple finite element to consider the non-linear influence of the ballast on vibrations of railway bridges*, *Engineering Structure*, 33, pp. 2597–2602.
- Benz, T.* (2006): *Small Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Ph.D. Dissertation. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart. p. 209.
- Costa, P.A., Calçada, R., Cardoso, A.S., Bodare, A.* (2010): *Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 pp. 221–235.
- Houbrechts, J., Schevenels, M., Lombaert, G., Degrande, G., Rücker, W., Cuellar, V., Smekal, A.* (2011): *RIVAS WP 1.3 Deliverable 1.1 Test procedures for the determination of the dynamic soil characteristics*. International Union of Railways. pp. 47–86.
- Ishihara, K.* (1996): *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford University Press. pp. 1–96.

Szilvági Zsolt 2009 óta a győri Széchenyi István Egyetem oktatója, 2012-től egyetemi tanársegéd a SZE Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszékén. 2010-től a SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola hallgatója, főbb kutatási területei: a talajdinamika és a geotechnikai numerikus modellezés. Doktori kutatásának tárgya szemcsés talajok talajdinamikai paramétereinek laboratóriumi mérése. E tárgyban írt egyik publikációjáért 2013-ban megkapta a Kézdi-díjat. Az oktatás és kutatás mellett tervezési feladatokat is végez, 2009-től az Unifite 83' Zrt.-nél statikus tervezőként tevékenykedik.

- Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B., Burland, J. B.* (1986): *Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction*. *Géotechnique* 36, No.3, pp. 377–396.
- Ramberg, W. and Osgood, W.R.* (1948): *Description of Stress Strain Curves by Three Parameters*. Technical Note No. 902 National Advisory Committee for Aeronautics. pp. 1–28.
- Ray, R.P.* (1983): *Changes in Shear Modulus and Damping in Cohesionless Soil due to Repeated Loadings*, Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, p. 417.
- Ray, R.P., Szilvági Zs.* (2013): *Measuring and modeling the dynamic behavior of Danube Sands*. Proceedings 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, ISBN: 978-2-85978-477-5, pp.1575–1578.
- Ray, R.P. and Woods, R.D.* (1987): *Modulus and Damping Due to Uniform and Variable Cyclic Loading*. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 8. ASCE, pp. 861–876.
- Ray, R.P.* (2010): *Testing and analysis of deep sediments in Charleston SC*. NEHRP Report. Columbia, South Carolina, p. 110.
- Szilvági Zs.* (2012): *Dinamikus talajparaméterek meghatározása*. Tavaszi Szél 2012, Konferenciakötet. DOSZ, Budapest, pp. 458–465.
- Törös E.* (2006): *A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásainak kritikai vizsgálata*, Doktori értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem, p. 116.
- Varandas, J.N., Hölscher, P. and Silva, M.* (2011): *Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones*, *Computers and Structures* 89, pp. 1468–1479.