

Kővér agyag dinamikus alakváltozási tulajdonságainak vizsgálata

Dynamic deformation of fat clay under cyclic triaxial tests

Back Márta

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, marta.back92@gmail.com

Török Ákos

BME, Geotechnika és Mézőkeológia Tanszék, torokakos@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: Az építőmérnöki szerkezeteket változatos dinamikus hatások érik (mint például a földrengés, forgalmi terhek, hullámozás, szélteher), ezért a talajfizikai paraméterek ciklikus terhelés hatására bekövetkező változásának ismerete kiemelt fontosságú a geotechnikában. A kutatás során zavartalan kővér agyag mintákon végzett ciklikus triaxiális vizsgálatok segítségével kívántuk kimutatni a pulzáló feszültségáram és a konszolidáció dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. A vizsgálatok eredményei alapján következtetéseket vontunk le a talaj merevségi viszonyait, csillapítását, alakváltozását, továbbá az alakváltozás sebességét illetően, továbbá elemeztük, hogy miként befolyásolja a teherszint változása és az előterhelés a fenti dinamikus paraméterek alakulását a ciklusszám, illetve a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében.

Kulcsszavak: ciklikus triaxiális vizsgálat, merevség, csillapítás, ciklusszám, ciklikus alakváltozási amplitúdó

ABSTRACT: Engineering structures are subjected to various dynamic loads such as earthquake, traffic load, waves, wind load. Understanding the changes in soil properties during cyclic loading is crucial in geotechnics. The paper presents experiments where undisturbed fat clay specimens were analysed by using cyclic triaxial test. The aim was to study the effect of the CSR and the consolidation on the dynamic soil parameters. The test results allowed to characterize the stiffness, the damping, the residual strain and the strain rate as a function of the number of cycles and the cyclic strain amplitude.

keywords: cyclic triaxial test, stiffness, damping, number of cycles, cyclic strain amplitude

1 BEVEZETÉS

A talajok a statikus viselkedéstől eltérő módon reagálnak a dinamikus terhelésre, változhatnak a merevségi és csillapítási viszonyaik, valamint alakváltozási paramétereik. A különböző talajtípusok esetében a talajfizikai paraméterek változása nem azonos tendenciák szerint következik be, ezért annak érdekében, hogy az adott talaj dinamikus terhelésre adott reakcióját becsülni tudjuk, lényeges az egyes talajtípusok változatos terhelési feltételek mellett történő vizsgálata.

A talajok merevségének alakulását döntően befolyásolja a ciklusszám, a kezdeti tömörség, a teherszint, továbbá a telítettség mértéke is. Kővér agyag mintákon végzett kutatások (Vámos és Szendefy 2014a, 2014b, 2014c) során azt tapasztalták, hogy a tömörség növekedésével a talaj merevsége is nő, illetve alacsonyabb tömörség esetén a rugalmassági modulus értéke is kisebb. A merevség csökkenése bekövetkezhet a halmozódó alakváltozások növekedése miatti talajtörés, valamint a többlet pórusvíznyomás kialakulása miatt, így a talajok dinamikus viselkedése nagyban függ a telítettségtől. Telített puha agyag mintákon végzett hosszútávú ($N=50.000$) kísérletek (Guo et al. 2013) eredményei alapján megállapították, hogy a ciklusszám emelkedésével bekövetkezik a merevség degradációja. Ugyanakkor a leromlás a terhelés során fokozatosan csökken, a rugalmassági modulus pedig egy adott érték fele tart. Hasonló eredményt adtak cementált telített tengeri agyagon végzett vizsgálatok (Moses et al. 2003), amelyek kimutatták, hogy a degradációs index a CSR és a frekvencia nagyságától függetlenül közel azonos értékig csökken bizonyos ciklusszám elérése után. Telített iszap vizsgálatok (Sağlam & Bakır 2014) szintén bekövetkezett a talaj merevségének leromlása, ugyanakkor magasabb pulzáló feszültségáram alkalmazása gyorsabb mértékű leromlást idézett elő. Alacsony CSR esetén a degradációs index (az N -edik ciklushoz tartozó és a kezdeti rugalmassági modulus hányadosa) és a ciklusszám

közi összefüggés lineárisnak tekinthető, azonban magas pulzáló feszültségárány esetén a kapcsolat már eltér a lineáristól. A kutatások során eddig elsődlegesen a telített talajok dinamikus paramétereit vizsgálták, ugyanis az utóbbi évtizedekben a talajfolyósodási viselkedés megismerése volt a főbb cél, ez a jelenség pedig csak telített talajokra jellemző. Ezzel szemben sok esetben a ciklikus terhelésnek kitett szerkezetek a talajvízszint felett helyezkednek el, ahol az altalaj nem vagy csak részben telített (Vámos és Szendefy 2014b). Telítetlen talajok esetében azonban nem alakul ki többlet pórusvíznyomás, azaz a merevség leromlása elvileg nem következhet be (Vámos és Szendefy 2014b).

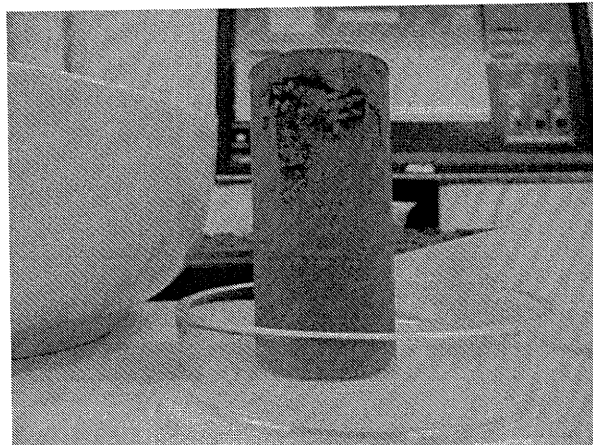
A drénezési körülmények is fontos szerepet játszanak a dinamikus vizsgálatok eredményeinek alakulásában. Drénezetlen esetben ugyanis a ciklusszám emelkedésével a hiszterézis hurkok hajlásszöge (ezzel a talaj merevsége) csökken, a pórusvíznyomás kialakulása, illetve a talaj szerkezetében bekövetkező változások miatt (Kramer 1996). A merevség leromlása a ciklusszám növekedésével lelassul, egy adott ciklusszám elérése felett a hiszterézis hurkok alakja szinte változatlan marad (Guo et al. 2013). Drénezett körülmények között azonban a ciklikus terhelés eredményeként kialakuló többlet pórusvíznyomás távozhat a rendszerből, ezzel egyidőben pedig csökken a hézagtenyező, a minta tömörebbé válik. Drénezett ciklikus terhelés során a ciklusszám emelkedésével a hiszterézis hurkok merevedekké és keskenyebbé válnak (Vámos és Szendefy 2014a).

Hazai kutatások (Vámos és Szendefy 2014c) telítetlen kövér agyag mintákon vizsgálták az előterheltség dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. A vizsgálatok kimutatták, hogy az előterhelés nagyobb kezdeti merevséget eredményez, azonban hatása egy adott (alacsony) ciklusszám elérése után eltűnik.

A merevség mellett az egyik legfontosabb dinamikus talajparaméter a ciklikus terhelések esetében a maradó alakváltozás, amely a talaj nemlineáris viselkedésének következménye, és a terhelés során folyamatosan halmozódik. A kutatások szerint az alakváltozások halmozódása általában az első néhány ciklus alatt a legnagyobb, a ciklusszám emelkedésével az alakváltozás sebessége lecsökken, vagy bizonyos teherszint felett törés következik be (Guo et al. 2013). Magasabb pulzáló feszültségárány alkalmazása növeli a maradó alakváltozás nagyságát. Telítetlen kövér agyagon végzett kutatások (Vámos és Szendefy 2014c) kimutatták, hogy a ciklikus terhelésből származó maradó alakváltozások csökkenthetők előterhelés alkalmazásával.

2 A VIZSGÁLT ANYAG

A vizsgálatok elvégzéséhez zavartalan kövér agyag mintákat használtunk fel, amelyek egy Üröm település mellett mélyített fúrásból, mintegy 11 méteres mélységből származtak. A mintákat a fúrómagokból 38 mm átmérőjű, 75 mm magas szabványos rézhengerek segítségével szűrtük ki (1. ábra). A laboratóriumi vizsgálatok alapján a kövér agyag folyási határa 52,7%, sodrási határa 20,9%, plaszticitási indexe 31,8%, konzisztencia indexe pedig 1,08, vagyis a talaj kemény állapotú.



1. ábra: Az egyik vizsgált minta beépítés előtt (A soil specimen before the test)

A konszolidálatlan vizsgálati csoport mintáinak főbb talajfizikai jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza, míg a konszolidált minták talajfizikai paraméterei a 2. táblázatban láthatók.

1. táblázat: A konszolidált vizsgálati csoport mintáinak talajfizikai paraméterei (Soil parameters of the consolidated specimens)

minta jele:		monoton nyíras	dinamikus2	dinamikus3	dinamikus7
Terhelés		monoton nyíras	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
Deviátor feszültség	kPa	360	180	270	324
ρ_s	g/cm ³	2,80			
száraz tömeg	g	149,87	143,53	148,40	149,63
terhelés előtti tömeg	g	179,01	176,00	178,19	179,94
m_v	g	29,14	32,47	29,79	30,31
w	%	19,44	22,62	20,07	20,26
ρ_n	g/cm ³	2,10	2,07	2,09	2,12
ρ_d	g/cm ³	1,76	1,69	1,74	1,76
s	%	62,93%	60,27%	62,31%	62,83%
v	%	34,26%	38,17%	35,02%	35,63%
l	%	2,80%	1,50%	2,70%	1,60%
e	-	0,59	0,66	0,60	0,59
n	-	0,37	0,40	0,38	0,37
Sr	-	0,92	0,96	0,93	0,96

2. táblázat: A konszolidálatlan vizsgálati csoport mintáinak talajfizikai paraméterei (Soil parameters of the unconsolidated specimens)

minta jele:		monoton_uu	dinamikus4	dinamikus5	dinamikus6
Terhelés		monoton nyíras	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
Deviátor feszültség	kPa	300	150	225	270
ρ_s	g/cm ³	2,80			
száraz tömeg	g	144,33	145,08	144,00	143,87
terhelés előtti tömeg	g	176,66	176,90	177,16	175,93
m_v	g	32,33	31,82	33,16	32,06
w	%	22,40	21,93	23,03	22,28
ρ_n	g/cm ³	2,08	2,08	2,08	2,07
ρ_d	g/cm ³	1,70	1,71	1,69	1,69
s	%	60,60%	60,92%	60,46%	60,41%
v	%	38,01%	37,41%	38,98%	37,69%
l	%	1,40%	1,70%	0,50%	1,90%
e	-	0,65	0,64	0,65	0,66
n	-	0,39	0,39	0,40	0,40
Sr	-	0,96	0,96	0,99	0,95

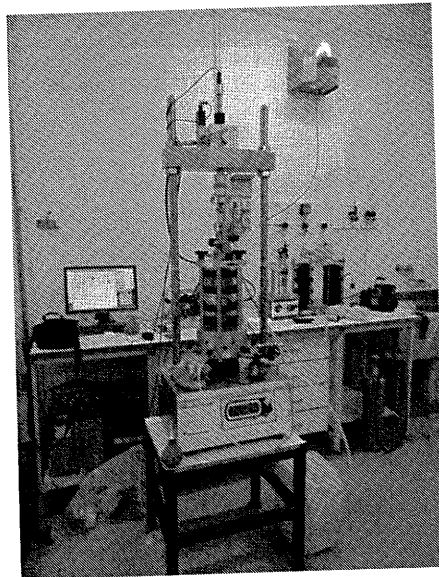
3 VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A dinamikus vizsgálatok során alkalmazott pulzáló deviátor feszültséget a talaj drénezetlen statikus nyírószilárdságának függvényében választottuk meg. Két drénezetlen statikus triaxiális vizsgálatot végeztünk el, mindkét esetben alakváltozás vezérelten, 0,333%/min alakváltozási sebesség mellett, 20%-os tengelyirányú összenyomódásig. Az egyik esetben a konszolidáció kivárása nélkül, azonnal eltörtük a mintát, míg a másik vizsgálatot 24 órás konszolidáció után hajtottuk végre.

A dinamikus vizsgálatok során az egyes vizsgálati körök mintáit a fentiekkel megegyező konszolidációs feltételek mellett terheltük, a pulzáló deviátor feszültség értékét a megfelelő statikus nyírószilárdság alapján számítva. Két vizsgálati körben 3-3 mintát terheltünk 10⁴ ciklusszám és 0,5 Hz-es frekvencia mellett. A CSR-t a pulzáló feszültség és a statikus nyírószilárdság hányadosaként definiáltuk,

értékeiként pedig 0,5-t; 0,75-t és 0,9-et választottunk, így kimutatható a pulzáló feszültségáram a vizsgált talaj dinamikus talajparamétereire gyakorolt hatása. Az azonos CSR mellett terhelt minták esetében pedig az előterhelés okozta változásokat kívántuk vizsgálni. A cellanyomás mind a statikus, mind pedig a dinamikus vizsgálatok esetében egységesen 220 kPa volt, ami hozzávetőlegesen megfelel az in-situ feszültségállapotnak.

A vizsgálatokat a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék Talajmechanikai Laboratóriumának dinamikus triaxiális berendezésével végeztük el, a kísérleti elrendezést a 2. ábra mutatja.



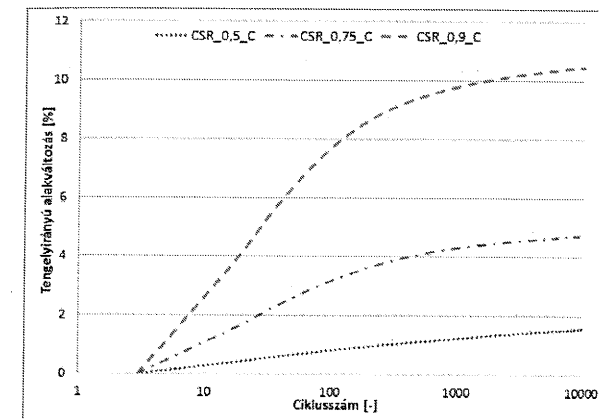
2. ábra: Dinamikus triaxiális berendezés (Cyclic triaxial apparatus)

4 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

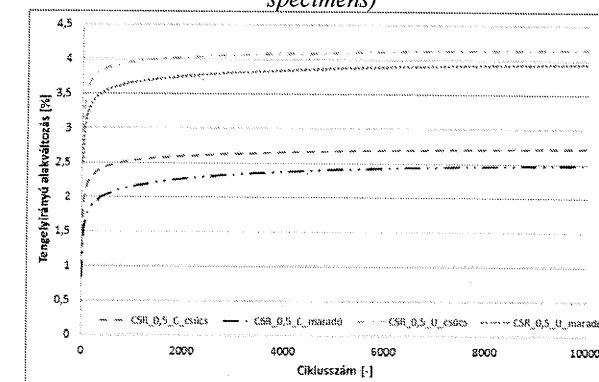
A 3. ábra a konsolidált minták maradó alakváltozásának alakulását mutatja a ciklusszám függvényében. Látható, hogy a ciklusszám emelkedésével az alakváltozás is növekszik, valamint a magasabb pulzáló feszültségáram alkalmazása adott ciklusszám esetén nagyobb alakváltozásokat eredményez. Ezen felül megállapítható, hogy nagyobb CSR mellett az alakváltozások sebessége is növekszik, ugyanakkor a ciklusszám emelkedésével folyamatosan csökken. Az egyes görbékre jó egyezéssel logaritmikus regressziók illeszthetők, azonban szemi-logaritmikus léptékben ábrázolva a grafikonokat látható, hogy magasabb pulzáló feszültségáram esetén a ciklusonkénti alakváltozások mértéke még a vizsgált maximális ciklusszám eléréséig sem csökken le eléggé a pontos tendencia megbecsléséhez. A konsolidálatlan minták eredményeinek vizsgálata azonos megállapításokra vezetett.

Az alakváltozások alakulása a ciklusszám függvényében azonos CSR alkalmazása esetén látható a 4. ábrán. Mindhárom pulzáló feszültségáram vizsgálatánál elmondható, hogy az alakváltozások sebessége a konsolidált minták esetében nagyobbra adódott, mint az azonos CSR-rel terhelt konsolidálatlan mintáknál. Ugyanakkor a 10.000. ciklusig felhalmozódott alakváltozások értékét tekintve a 0,5-ös CSR-rel terhelt minták esetében a konsolidálatlan minta szenvedte el a nagyobb alakváltozást, míg 0,75-ös és 0,9-es CSR alkalmazása mellett a konsolidált minták alakváltozása bizonyult jelentősebbnek.

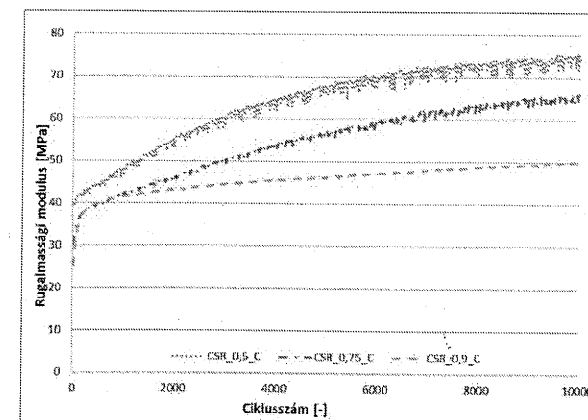
A konsolidált minták rugalmassági modulusának változását a ciklusszám függvényében mutatja az 5. ábra. Az eredményekből látható, hogy a rugalmassági modulus növekszik a ciklusszám emelkedésével, valamint magasabb CSR alkalmazása esetén a merevség csökken.



3. ábra: Konsolidált minták halmozódó maradó alakváltozása a ciklusszám függvényében (Accumulating residual strain depending on the number of cycles – consolidated specimens)



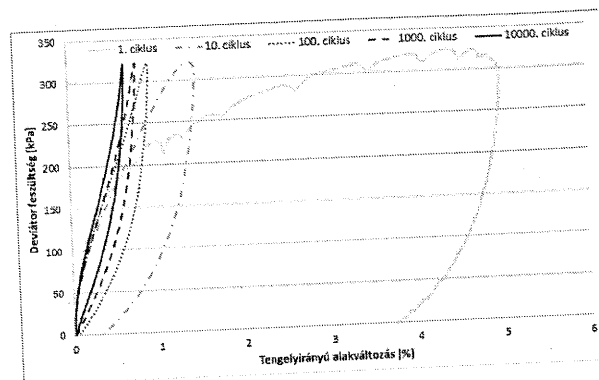
4. ábra: 0,5-ös CSR mellett terhelt minták csúcs- és maradó alakváltozása a ciklusszám függvényében (Maximal and residual strain of specimens loaded by CSR = 0,5 depending on the number of cycles)



5. ábra: Konsolidált minták rugalmassági modulusának növekedése a ciklusszám függvényében (Increasing of the elastic modulus of consolidated specimens depending on the number of cycles)

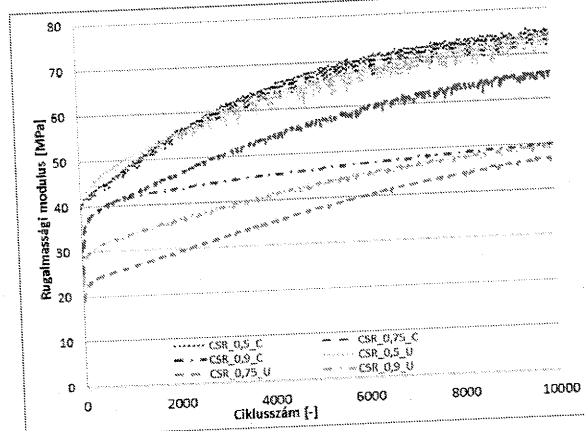
A merevség növekedése a terhelés során a hiszterézis hurok változásában is megjelenik. 0,9-es CSR-rel terhelt minta jellemző hiszterézis hurokjait mutatja a 6. ábra. Látható, hogy a hurok merevedése a terhelés végére növekszik, ugyanakkor az 1000. és a 10000. ciklushoz tartozó hiszterézis hurok közti

különbség jelentősen kisebb, mint például az 1. és a 10. ciklus histerézis hurokjai között tapasztalható eltérés.



6. ábra: 0,9-es CSR-rel terhelt minta jellemző histerézis hurokjai (Typical stress-strain hysteretic loops of a specimen loaded by CSR = 0,9)

Azonos CSR mellett terhelt minták eredményeit vizsgálva megállapítható, hogy a konszolidált minták merevebben viselkedtek a terhelés során, ugyanakkor a különbség az egyes mintapárok esetében nem bizonyult jelentősnek, bizonyos ciklusszám elérése után az előterhelés hatása csaknem teljesen eltűnik. Ez az eredmény hasonló Vámos és Szendefy (2014) kövér agyagon végzett vizsgálatainak eredményéhez. A fenti megállapítás alól kivételt képez a 0,75-ös CSR-rel terhelt konszolidálatlan minta, amelynek merevségi és csillapítási eredményei is eltértek a többi minták által mutatott tendenciától, az eltérés oka valószínűsíthetően a többi mintához képesti jóval nagyobb telítettség (7. ábra).



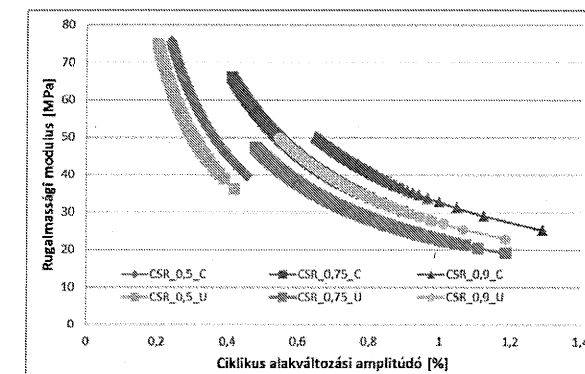
7. ábra: Az összes minta rugalmassági modulusának alakulása a ciklusszám függvényében (Elastic modulus of all tested specimens depending on the number of cycles)

A rugalmassági modulus és a ciklikus alakváltozási amplitúdó kapcsolatát megvizsgálva elmondható (8. ábra), hogy adott CSR esetén a rugalmassági modulus csökken a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével, továbbá azonos ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a rugalmassági modulus nő a pulzáló feszültségáramy emelkedésével. Ezen felül látható, hogy azonos merevség mellett a magasabb CSR-hez nagyobb ciklikus alakváltozási amplitúdó tartozik.

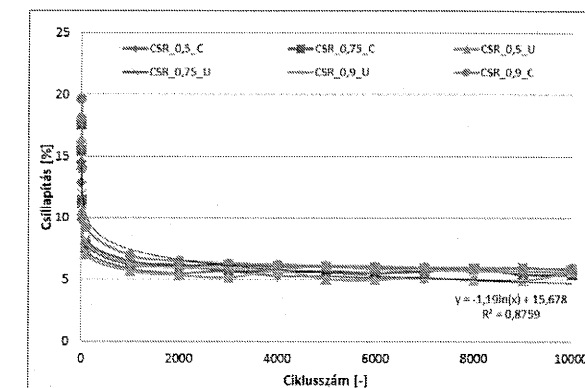
Mivel az ábrán valamennyi általunk vizsgált minta eredménye látható, az azonos CSR mellett terhelt mintapárok eredményeit összevetve megállapítható, hogy adott CSR és azonos ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a konszolidált minták merevsége nagyobb, mint a konszolidálatlan mintáknál tapasztalt értékek (8. ábra).

Az általunk vizsgált valamennyi minta csillapításának alakulását a ciklusszám függvényében mutatja a 9. ábra. Az eredmények alapján látható, hogy a csillapítás csökken a ciklusszám növekedésével, ugyanakkor a terhelés végére a görbe ellaposodik, egy adott érték felé tart. Általánosan megállapítható, hogy a pulzáló feszültségáramy emelkedésével a csillapítás is nagyobb lesz, azonban a különbségek az egyes minták eredményei között elhanyagolhatóak. A csillapítás alakulása ezért jól közelíthető

egyetlen logaritmikus függvénnyel (9. ábra). Ez az eredmény jó egyezést mutat korábbi kutatások (Back & Vámos 2015) során vizsgált lösz talajok eredményeivel. A csillapítás csökkenése a histerézis hurok területének változásán is észlelhető (6. ábra). A ciklusszám emelkedésével ugyanis a histerézis hurok területe – és ezzel a csillapítás értéke is – csökken.



8. ábra: Rugalmassági modulus a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében (Elastic modulus depending on the cyclic strain amplitude)



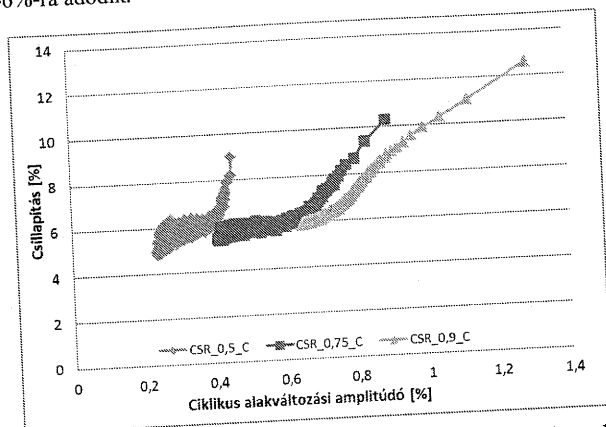
9. ábra: A csillapítás alakulása a ciklusszám függvényében és a görbékre illesztett logaritmikus regresszió (Damping ratio depending on the number of cycles and the logarithmic function fitted to the curves)

A konszolidált minták csillapításának alakulását a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében mutatja a 10. ábra. Az eredmények alapján látható, hogy adott CSR esetén a csillapítás nő a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével, valamint adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a csillapítás csökken a pulzáló feszültségáramy emelkedésével.

5 ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során zavartalan kövér agyag mintákat terheltünk ciklikus triaxiális berendezéssel, hogy vizsgáljuk a pulzáló feszültségáramy és az előterhelés dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. A vizsgálatokat viszonylag magas teherszint mellett (CSR = 0,5; 0,75; 0,9) hajtottuk végre. A vizsgálatok eredményeként megállapítottuk, hogy mind a ciklusszám, mind pedig a pulzáló feszültségáramy emelkedése esetén növekszik az alakváltozás. A teherszint növekedése és az előterhelés egyaránt jelentősen növeli az alakváltozás sebességét. Magasabb teherszint mellett az alakváltozások értékében is kimutatható az előterhelés hatása, melynek köszönhetően nagyobb alakváltozások alakulnak ki a vizsgált talajban. Ezen felül megállapítottuk, hogy a talaj merevsége nő a ciklusszám emelkedésével, ugyanakkor a teherszint növelésével a rugalmassági modulus csökken. Az előterhelés a talaj merevségének kismértékű növekedését okozza. Összességében véve megállapítható, hogy a teherszint változá-

sa jelentősebben befolyásolja a merevség alakulását, mint az előterhelés. A csillapítás vizsgálata esetén megállapítottuk, hogy sem a pulzáló feszültségáram változása, sem pedig az előterhelés nem gyakorol jelentős hatást a csillapítás alakulására. Ezzel szemben a ciklusszám növekedésével (már körülbelül az 1000. ciklus eléréseig) a csillapítás a kezdeti érték harmadára-negyedére esik vissza, végértéke mintegy 5-6%-ra adódik.



10. ábra: Konszolidált minták csillapításának változása a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében (*Variation of the damping ratio depending on the cyclic strain amplitude – consolidated specimens*)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megírását az NTP-EFÖ-P-15-0198 számú pályázat támogatta. Köszönet az Emberi Erőforrások Minisztériumának, az Emberi Erőforrások Támogatáskezelőnek és a Nemzeti Tehetség Programnak. A cikk szerzői ezúton mondanak köszönetet a BME Talajmechanikai Laboratórium munkatársainak, különös tekintettel Némethy Ferencnek, a laboratóriumi vizsgálatoknál nyújtott segítségével és hasznos gyakorlati tanácsaiért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK:

- Back, M., Vámos, M. (2015): Telített és telítetlen lösz talajok dinamikus alakváltozási tulajdonságait befolyásoló tényezők, In: *XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2015.* (szerk: Köllő Gábor), Csíksomlyó, Románia, pp. 8-11.
- Kramer, S. L. (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey 1-653
- Guo, L., Wang, J., Cai, Y., Liu, H., Gao, Y., Sun, H. (2013): Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, pp 28-37.
- Moses, G. G., Rao, S. N., Rao, P. N. (2003): Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading, *Ocean Engineering*, 30, pp 1765-1789.
- Sağlam, S., Bakır, B. S. (2014): Cyclic response of saturated silts, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61-62, pp 164-175.
- Vámos M., Szendefy, J. (2014a): Kővér agyagok dinamikus alakváltozási tulajdonságainak meghatározása, In: *XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014.* (szerk: Köllő Gábor), Csíksomlyó, Románia, pp. 325-328.
- Vámos M., Szendefy J. (2014b): Effect of pre-loading on dynamic soil properties and deformation characteristics, In: *Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference*, Barcelona, Spanyolország, pp. 11-14.
- Vámos M., Szendefy, J. (2014c): Kővér agyagok dinamikus alakváltozási tulajdonságait befolyásoló tényezők, In: *Geotechnika 2014. Konferencia, Ráckeve*, pp. 1-15.