



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar

Geotechnikai Tanszék

*Telített és telítetlen lösz talajok dinamikus alakváltozási
tulajdonságait befolyásoló tényezők*

TDK dolgozat

2014/15 tanév 1. félév

Konzulens:

*Vámos Máté doktorandusz
BME Geotechnikai Tanszék*

Készítette:

*Back Márta
BOKEU0*



TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	3
2. Talajok viselkedése dinamikus terhelés során.....	5
3. Vizsgált anyag bemutatása	17
4. Vizsgálatok bemutatása.....	25
4.1. Statikus triaxiális vizsgálatok	25
4.2. Dinamikus triaxiális vizsgálatok.....	26
5. Eredmények ismertetése.....	28
5.1. Alakváltozási jellemzők bemutatása.....	28
5.2. Rugalmassági modulus	34
5.3. Hiszterézis hurkok	43
5.4. Csillapítás viszonyok	45
5.5. Potenciális- és disszipált energia összefüggései	52
6. Összefoglalás.....	55
7. Köszönetnyilvánítás	59
8. Irodalomjegyzék.....	60



1. Bevezetés

Az építőmérnöki létesítményeket különböző eredetű dinamikus hatások érik, amelyek más megközelítéseket igényelnek a tervezés során, mint a megszokott statikus terhelési esetek. A dinamikus terhekre való méretezés kiemelt jelentőséggel bír a geotechnikában, ugyanis a talajok a statikus viselkedéstől eltérő módon reagálnak a ciklikusan ismétlődő terhelésre, változhatnak a merevségi és csillapítási viszonyaik, alakváltozási paramétereik. A geotechnikai tervezésben sok esetben nem a teherbírási, hanem a használhatósági határállapot a mértékadó, ezért fontos, hogy előre meg tudjuk becsülni, miként fognak viselkedni az egyes talajok dinamikus terhelés hatására.

Ahhoz, hogy megismerjem a talajdinamika területén elért eddigi eredményeket, felmerülő problémákat, valamint a különböző merevségi és alakváltozási paraméterek meghatározására irányuló módszereket, részletes szakirodalmi kutatást végeztem. Ennek során megismerkedtem a fontosabb hazai és nemzetközi szakirodalmakkal, annak érdekében, hogy minél pontosabb képet alkossak a különböző dinamikus talajjellemzők között feltárt összefüggésekről, különös tekintettel azon paraméterekre, amelyeket jelen dolgozatban vizsgálni szándékoztam.

A dinamikus terhelési kísérletek megkezdése előtt meghatároztam a vizsgált talaj általános talajfizikai jellemzőit, elvégeztem a talajazonosítást, melynek során előállítottam a talaj szemeloszlási görbáját és meghatároztam a plasztikus indexét is. Ezen kívül megmértem a szilárd fázis térfogatsűrűségét, továbbá Proctor-vizsgálattal megkerestem a tömörítéshez szükséges optimális víztartalmat, és az ehhez tartozó maximális száraz térfogatsűrűséget.

A dinamikus vizsgálatokat a BME Geotechnikai Tanszék ciklikus triaxiális berendezésével hajtottam végre különböző pulzáló feszültségarányok (CSR), valamint eltérő telítettségi és konszolidáltsági viszonyok mellett, annak érdekében, hogy kimutassam a teherszint, a telítettség, valamint az előterheltség dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. A terhelések során alkalmazott mintákat Proctor-edényben, optimum víztartalom felett tömörített talajból 38 mm átmérőjű, 75 mm magas rézhenger segítségével szúrtam ki. A vizsgálatok során mértem a terhelő erő nagyságát, a minták tengelyirányú összenyomódását, illetve a pórusvíznyomást. Ezen adatok felhasználásával meghatároztam a rugalmassági



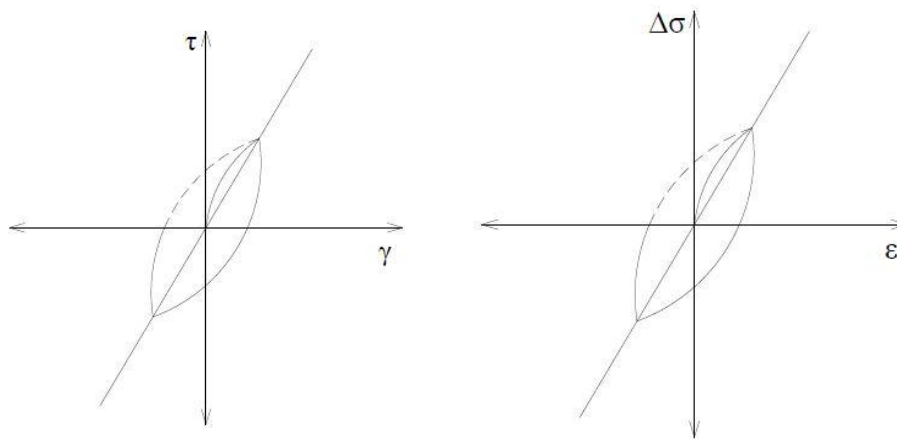
modulust, a csillapítási tényezőt, a tengelyirányú alakváltozást, valamint a disszipált és a potenciális energia nagyságát.

Összehasonlítottam a rugalmassági modulus és a ciklusszám, valamint a merevség és a ciklikus alakváltozási amplitúdó között fennálló korrelációkat. Összefüggéseket kerestem, annak érdekében, hogy a vizsgált talaj rugalmassági modulusa becsülhető legyen a ciklusszám, a pulzáló feszültség nagyságának, a tömörségnek, valamint a telítettségi és konszolidációs állapotának ismeretében. Megvizsgáltam a csillapítás alakulását a ciklusszám, illetve a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében. A rugalmassági modulushoz hasonlóan a csillapítás becslésére alkalmas összefüggéseket is kerestem. Az alakváltozás-ciklusszám korrelációt összevetettem a pórusvíznyomás esetében tapasztalt változásokkal. Elemeztem a terhelések során befektetett energia és a rugalmassági modulus kapcsolatát. Az eredmények felhasználásával megállapításokat fogalmaztam meg, amelyekben összegeztem, milyen hatást gyakorol a pulzáló feszültségáram növekedése, az előterheltség és a telítettség a dinamikus talajparaméterek változására.

2. Talajok viselkedése dinamikus terhelés során

A talajok dinamikus terhelés hatására történő viselkedésének leírására számos modell készült, melyek igyekeznek kielégíteni mind az egyszerűség, mind pedig a pontosság által támasztott követelményeket. Ezen modellek között jelentős az eltérés, így fontos, hogy minden esetben figyelembe vegyünk az alkalmazhatóság határait.

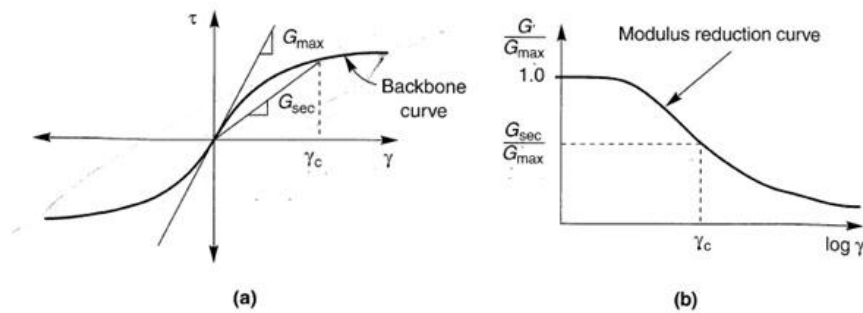
A legegyszerűbb, ugyanakkor legtöbbször alkalmazott modellt "equivalent linear model" névvel illeti a nemzetközi szakirodalom. Leginkább a kis alakváltozások tartományában használható (Szilvágyi, 2013). A modell a talaj ciklikus viselkedését hiszterézis hurkok segítségével jellemzi. Az elvégzett vizsgálat típusa alapján a hiszterézis hurkokat megkaphatjuk úgy, ha ábrázoljuk a nyírófeszültség egy ciklus alatt lezajló változását a szögtorzulás függvényében, vagy kirajzoljuk a ciklikus deviátor feszültség és a tengelyirányú alakváltozás összefüggését.



1. ábra: Közvetlen ciklikus nyírókísérlet (balra) és ciklikus triaxiális vizsgálat (jobbra) eredményeként kapott hiszterézis hurkok

A hiszterézis hurok jellemezhető egyrészt magával a görbével, másrészt pedig az alakját leíró egyéb paraméterek megadásával. Utóbbiak közül a két legfontosabb a hiszterézis hurok vízszintes tengelyhez viszonyított hajlásszöge, valamint a hurok szélessége. A hurok meredeksége függ a vizsgált talaj merevségétől. A görbe adott pontjához húzott érintő meredeksége a pillanatnyi nyírási modulust ($G_{\tan}$) adja meg, amelynek értéke folyamatosan változik a ciklus során. A $G_{\tan}$ átlagát az origót a maximális feszültség-alakváltozás értékkel összekötő egyenes meredekségével, az ún. szelő nyírási modulussal ($G_{\sec}$) közelíthetjük (Kramer, 1996). A szelő nyírási modulus a ciklikus nyírási amplitúdó függvényében változik.

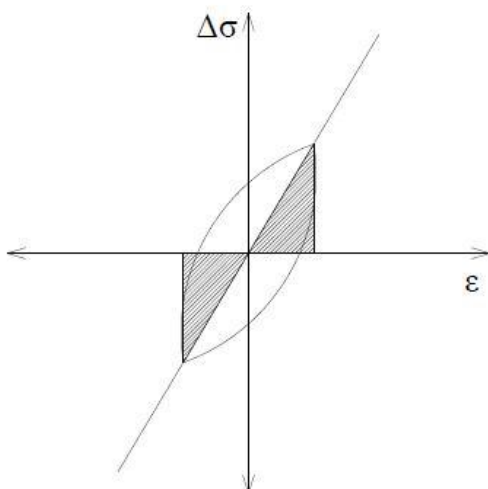
Alacsony ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén nagyobb a nyírási modulus, az alakváltozás növekedésével azonban bekövetkezik a merevség leromlása (Kramer, 1996). $\tau - \gamma$ koordinátarendszerben ábrázolva a különböző ciklikus nyírási amplitúdójú histerézis hurkok maximális feszültség-alakváltozás pontjait, megkapjuk az ún. backbone-görbét (2.a. ábra). Az origóhoz (vagyis a 0 ciklikus nyírási amplitúdóhoz) húzott érintő meredeksége a nyírási modulus maximális értéke ($G_{\max}$). A talaj merevségének leromlását a maximális merevséggel normált nyírási modulus arányában mutatja a 2.b. ábra, amely a leromlást a ciklikus nyírási amplitúdó logaritmusának függvényében ábrázolja.



2. ábra: A backbone-görbe (a) és a leromlási görbe (b)(Kramer,1996)

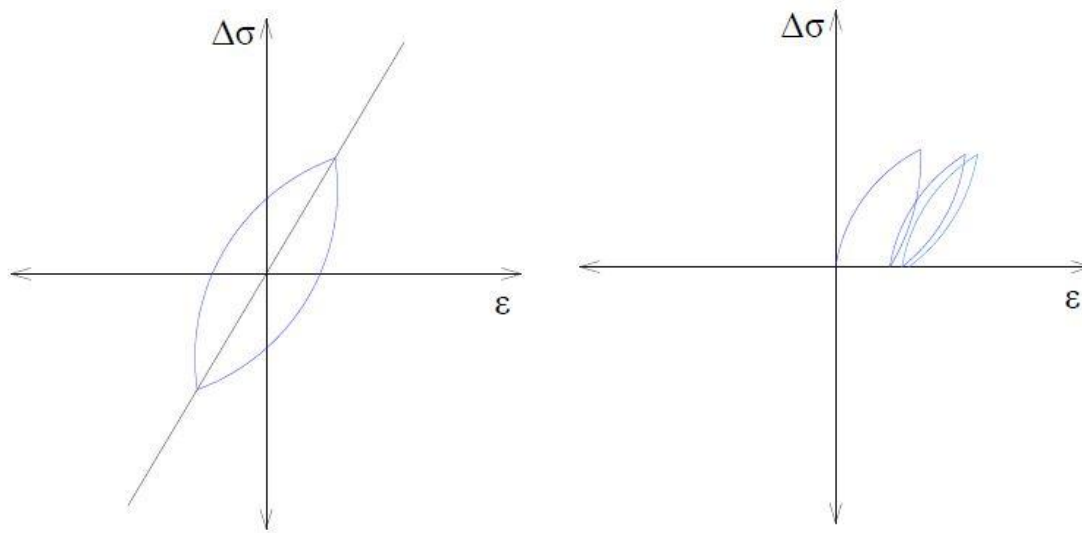
A histerézis hurkot a hajlásszögén kívül a szélessége, vagy a területe jellemzi leginkább. A histerézis hurok területéből meghatározhatók az adott talaj csillapítási viszonyai, ugyanis a hurok területe adja a terhelés során a talaj által disszipált energia nagyságát. A csillapítási tényező az alábbi képlet szerint számítható (Das és Ramana, 2011):

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{Histerézis hurok területe}}{\text{Háromszög területe}}$$



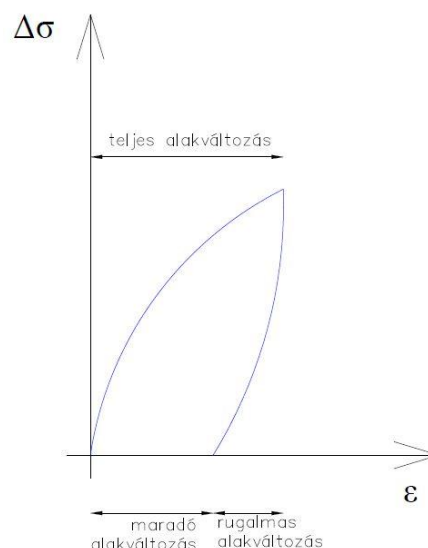
3. ábra: A csillapítás képletében szereplő histerézis hurok-háromszög területarány grafikus ábrázolása

A hiszterézis hurok alakja függ a terhelés jellegétől. Amennyiben a terhelés szimmetrikus, például teljes szinuszhullám alakú, úgy a 4. ábrán balra látható hiszterézis hurok alakjában rajzolódik ki a feszültség–alakváltozás grafikon. Fél szinuszhullám formájú terhelés eredményeként kapott összefüggést mutat a 4. ábra jobb oldala.



4. ábra: Hiszterézis hurok teljes szinuszhullám (bal oldali ábra) és fél szinuszhullám (jobb oldali ábra) alakú terhelési jel esetén

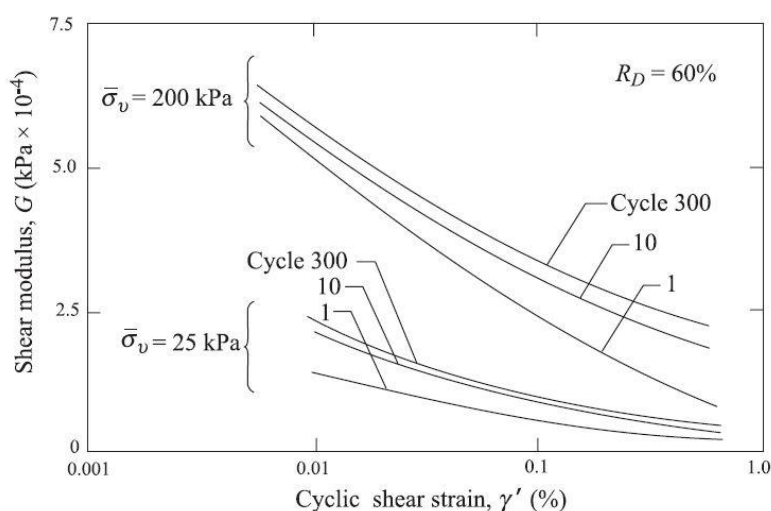
Dinamikus terhelés esetén a talajban kialakuló alakváltozásokat fel lehet bontani két részre: rugalmas és maradó alakváltozásokra. A maradó alakváltozások kialakulása a talaj nemlineáris viselkedésének köszönhető, amely miatt a hiszterézis hurkok sosem záródnak össze a végpontban, tehát a maradó alakváltozások a ciklikus terhelés során halmozódnak. A teljes alakváltozásból levonva a maradó részt megkapjuk a tisztán rugalmas alakváltozásokat. A maradó és rugalmas alakváltozások viszonyát szemlélteti az 5. ábra.



5. ábra: Maradó és rugalmas alakváltozás grafikus ábrázolása

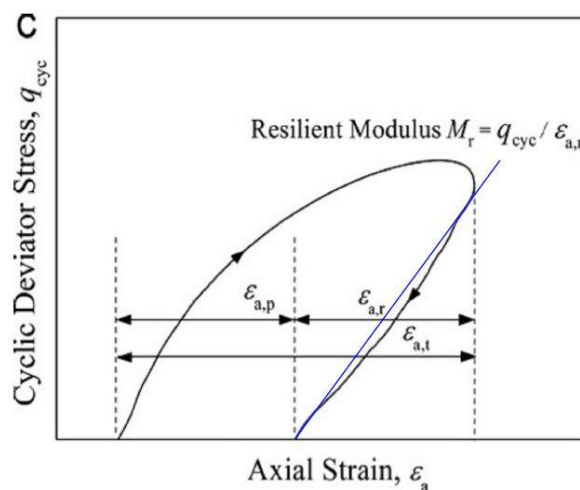
Silver és Seed közepesen tömör homok alakváltozását befolyásoló paramétereket vizsgálták közvetlen ciklikus nyírókísérlettel. Megállapították, hogy adott nyírási alakváltozás és terhelési ciklus esetén a nyírási modulus növekszik a függőleges feszültség emelkedésével. Eredményeik alapján továbbá levonták azt a következtetést, miszerint adott nyírási alakváltozás és függőleges feszültség mellett a nyírási modulus nő a terhelési ciklusok számával. A legnagyobb növekedés az első 10 ciklusban zajlik le, ezután a növekedés üteme lelassul. Ezen kívül kimutatták, hogy adott függőleges feszültség és ciklusszám mellett a nyírási modulus értéke csökkenni fog a nyírási alakváltozás növekedésével.

Eredményeiket szemlélteti a 6. ábra.



6. ábra: A nyírási modulus alakulása a nyírási alakváltozás, a terhelési ciklusszám és a függőleges feszültség függvényében közepesen tömör homok esetén (Silver és Seed, 1971)

A talaj merevsége jellemezhető az ún. "rugalmas" modulus (resilient modulus) segítségével is (Seed, 1962, L. Guo et al., 2013). A rugalmas modulus a ciklikus deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás hányadosaként értelmezhető, vagyis meghatározásakor (szemben a rugalmassági modulussal) nem vesszük figyelembe a maradó alakváltozásokat. Amennyiben a maradó alakváltozások eléggé kicsik, az eltérés a rugalmassági modulus és a "rugalmas" modulus között elhanyagolható.



7. ábra: A "rugalmas" modulus grafikus értelmezése (L. Guo et al., 2013)



A merevségi és csillapítási viszonyok változását, a maradó és a csúcs alakváltozások nagyságát, a pórusvíznyomás felépülését jelentősen befolyásolja a dinamikus terhelés során működő pulzáló feszültség és a talaj statikus nyírószilárdságának aránya, amelyet ciklikus feszültségi aránynak vagy CSR (cyclic stress ratio) nevezünk. Ezt az arányszámot többféle módon értelmezi a szakirodalom, attól függően, hogy milyen paramétereket és milyen körülmények között vizsgálunk. Talajfolyósodási vizsgálatok során a vizsgálat típusa dönti el, hogy a CSR-t milyen összefüggés alapján értelmezzük. Ciklikus közvetlen nyíróvizsgálat esetén a ciklikus nyírófeszültség és a kezdeti függőleges hatékony nyomás hányadosát $[(CSR)_{ss} = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0}]$, míg triaxiális kísérlet során a maximális ciklikus nyírófeszültség és a kezdeti hatékony oldalirányú megtámasztás kétszeresének hányadosát $[(CSR)_{tx} = \sigma_{dc} / 2\sigma'_{3c}]$ tekintjük ciklikus feszültségaránynak. A két arány nem egyezik meg, a köztük fennálló összefüggést a

$$(CSR)_{ss} = c_r * (CSR)_{tx}$$

egyenlőség írja le, ahol c_r egy korrekciós tényező, értéke szakirodalmi ajánlások (Finn et al., 1971; Seed és Peacock, 1971; Castro, 1975) alapján vehető fel (Kramer, 1996). A fentiekén kívül a szakirodalom megkülönböztet egy harmadik típusú ciklikus feszültségarányt. Ez az ún. "terepi" feszültségarány a talajok talajfolyósodási ellenállásának leírására szolgál, értéke 90%-a a közvetlen nyírókísérletek esetében értelmezett CSR-ének $[(CSR)_{field} = 0,9 * (CSR)_{ss} = 0,9 * c_r * (CSR)_{tx}]$. A laboratóriumi vizsgálatok során értelmezett feszültségarányok csökkentését a körülmények különbözősége indokolja, ugyanis a laborban vizsgált talajokat egyirányú terhelésnek vetik alá, míg egy valódi földrengés során a talaj többirányú terhelést szenved. Seed et al. (1975) vizsgálatai alapján terepi körülmények között a közvetlen nyíróvizsgálatok során értelmezett CSR 90%-a már elegendő ahhoz, hogy bekövetkezzen a talajfolyósodás (Kramer, 1996).

Általános ciklikus vizsgálatok esetében a CSR-t a pulzáló deviátor feszültség és a drénezetlen nyírószilárdság hányadosaként vesszük tekintetbe $[CSR = q_{cyc} / q_f]$. Utóbbit előzetes monoton nyírásvizsgálat segítségével állapítjuk meg, hogy később adott feszültségarányok mellett végezhesük el a terheléseket.

A talaj merevségének csökkenése nemcsak törés miatt következhet be, hanem a többlet pórusvíznyomás kialakulásának köszönhetően is, ezért a talajok dinamikus viselkedését jelentősen befolyásolja a telítettség mértéke. A kutatások során eddig főként a telített talajok dinamikus paramétereit vizsgálták, mert az elmúlt évtizedekben a fő cél a talajfolyósodási viselkedés megismerése volt, ami csak telített talajok esetén lép fel. Ugyanakkor sok esetben a

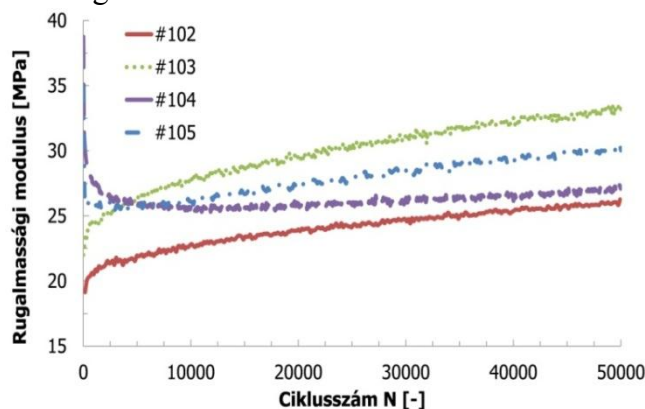


ciklikus terhelésnek kitett szerkezetek a talajvízszint felett találhatóak, ahol az altalaj nincs telítve (Vámos és Szendefy, 2014b).

Telített mintákon végzett kísérletek eredményei azt mutatják, hogy a ciklusszám növekedésével, a többlet pórusvíznyomás kialakulása a merevség lecsökkenéséhez vezet, kellően magas ciklusszám elérése után pedig a rugalmassági modulus egy állandó értékhez tart, és a hiszterézis hurkok alakja sem változik tovább. Telítetlen talajok esetében azonban nem keletkezik többlet pórusvíznyomás, vagyis elvileg nem következhet be a merevség degradációja. (Vámos és Szendefy, 2014b)

Nemcsak a telítettség, hanem a drénezési körülmények is befolyásolják az egyes vizsgálatok eredményeit. Drénezetlen körülmények között a ciklusszám növekedésével a hiszterézis hurkok hajlásszöge lecsökken, köszönhetően a pórusvíznyomás kialakulásának, valamint a talaj szerkezetében bekövetkező változásoknak (Kramer, 1996). A merevség leromlása azonban lelassul a ciklusszám növekedésével, sőt egy adott ciklusszám elérése után megszűnik a hiszterézis hurkok ellaposodása, alakjuk pedig szinte változatlan marad (Lin et al., 2013). Drénezett esetben a ciklikus terhelés hatására keletkező többlet pórusvíznyomás képes távozni a rendszerből, miközben a hézagtenyező csökken, vagyis a minta tömörödik. A drénezetlen körülményekkel ellentétben drénezett ciklikus terhelés hatására a ciklusszám emelkedésével hiszterézis hurkok meredekebbé és keskenyebbé válnak (Vámos és Szendefy, 2014a).

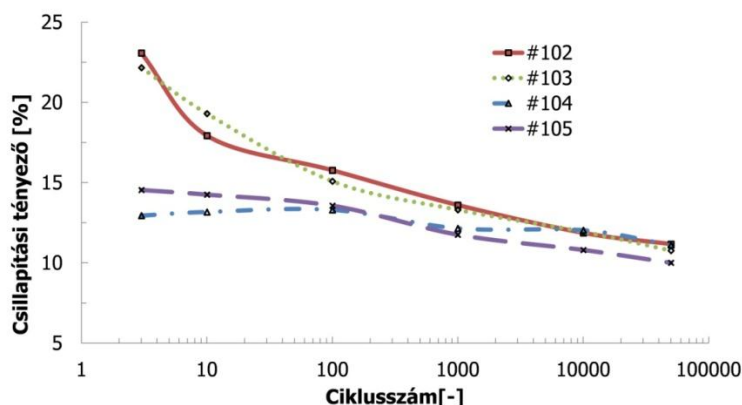
Az előterheltség is hatással van a talajjellemzők dinamikus terhelés hatására bekövetkező változására. Vámos és Szendefy telítetlen kövér agyag mintákon vizsgálták az előterheltség dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. A vizsgálat eredményei alapján megállapították, hogy a terhelés kezdetén az előterhelt minták sokkal merevebben viselkednek, mint a csak ciklikus terhelésnek alávetett minták, ugyanakkor a különbség hamar kiegyenlítődik, és a terhelés végére a rugalmassági modulusok egy meghatározott érték felé konvergálnak.



8. ábra: A rugalmassági modulus alakulása a ciklusszám függvényében (Vámos és Szendefy, 2014c)

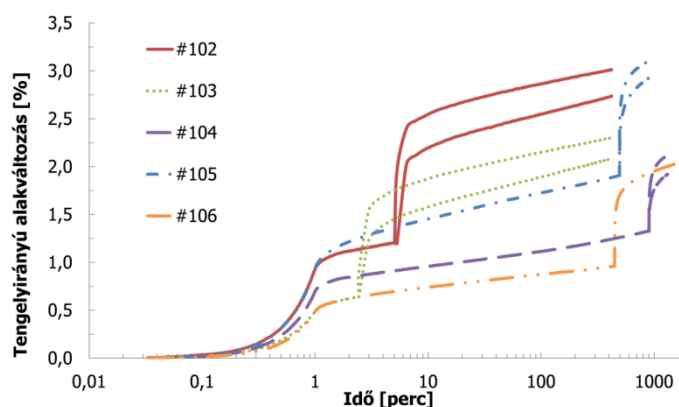


A csillapítási viszonyokat tekintve a különböző terhelési történettel rendelkező minták viselkedése ellentétes tendenciát mutat, mint a rugalmassági modulus esetében, vagyis az előterheletlen minták kezdeti csillapítási tényezője jóval nagyobb, mint az előterhelteké, azonban a rugalmassági modulushoz hasonlóan a terhelés végére valamennyi minta csillapítási tényezője közel azonos értékhez tart.



9. ábra: A csillapítási tényező változása a ciklusszám függvényében (Vámos és Szendefy, 2014c)

A ciklikus terhelésből maradó alakváltozás az előterheletlen minták esetében nagyobb, mint az előterhelt mintáknál, jóllehet megfelelő ciklusszám elérése után az alakváltozás sebessége mindkét esetben közel azonos. Bár a maradó alakváltozás többé-kevésbé megegyezett a terhelések végén, látható, hogy az előterhelés csökkenti a ciklikus alakváltozás során kialakuló alakváltozások mértékét.



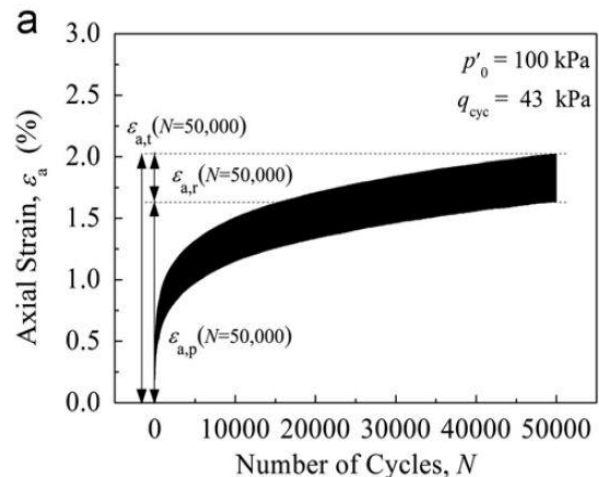
10. ábra: A vizsgált minták konszolidációs görbéi (Vámos és Szendefy, 2014c)

L. Guo et al. telített puha agyag mintákon vizsgálták a CSR változásának talajok viselkedésére gyakorolt hatását hosszú távú dinamikus terhelés esetén. Az általuk vizsgált anyagot magas víztartalom és összenyomhatóság, valamint alacsony áteresztő képesség és teherbírás jellemezte. A vizsgálatokat 50.000-es ciklusszám és 1 Hz-es frekvencia mellett, különböző CSR és oldalirányú megtámasztás esetén, drénezetlen körülmények között

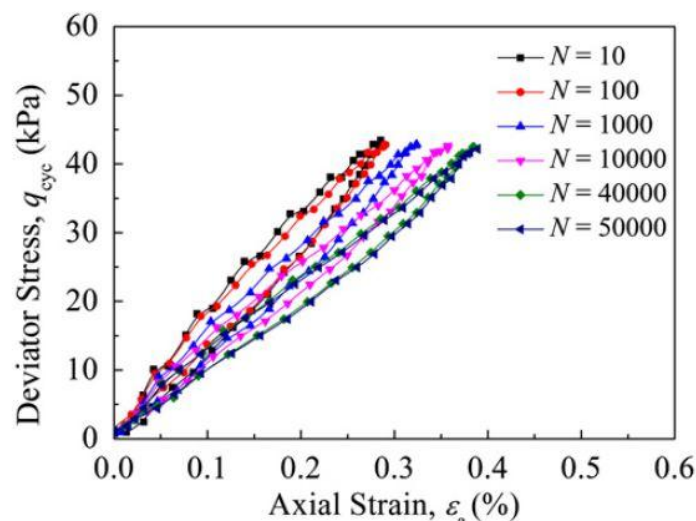
hajtották végre. A CSR-t a ciklikus pulzáló feszültség és a dinamikus kísérleteket megelőző monoton nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeként kapott drénezetlen nyírószilárdság hányadosaként definiálták. A mintákat 280 kPa nyomással, 20 kPa hidrosztatikus feszültség mellett 24 órán keresztül telítették, a B-érték minden esetben magasabb volt, mint 0,97.

Megállapították, hogy mind a csúcs, mind a maradó alakváltozás gyorsan növekszik a kezdeti ciklusok alatt, míg a későbbi ciklusokra a növekedés sebessége lecsökken, az alakváltozás értéke pedig egy adott értékhez tart. A növekedés mértéke az első 1000 ciklus alatt a legjelentősebb.

11. ábra: A tengelyirányú alakváltozás alakulása a ciklusszám függvényében (L. Guo et al., 2013)



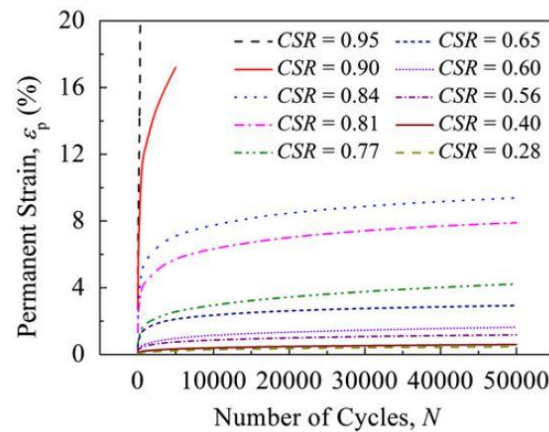
Ez a folyamat a hiszterézis hurkok segítségével is ábrázolható: a ciklusszám növekedésével a hurkok területe lecsökken, ugyanakkor egy bizonyos ciklusszám elérése után gyakorlatilag nem változik, a hiszterézis hurok 2 "csúcsát" összekötő egyenes és a vízszintes tengely által bezárt szög lecsökken, vagyis bekövetkezik a rugalmassági modulus degradációja. Kimutatták azt is, hogy ez a degradáció az első néhány ezer ciklus alatt a leggyorsabb, és 35.000 ciklus után gyakorlatilag megáll.



12. ábra: Hiszterézis hurkok változása CSR=0,60 esetén (L. Guo et al., 2013)

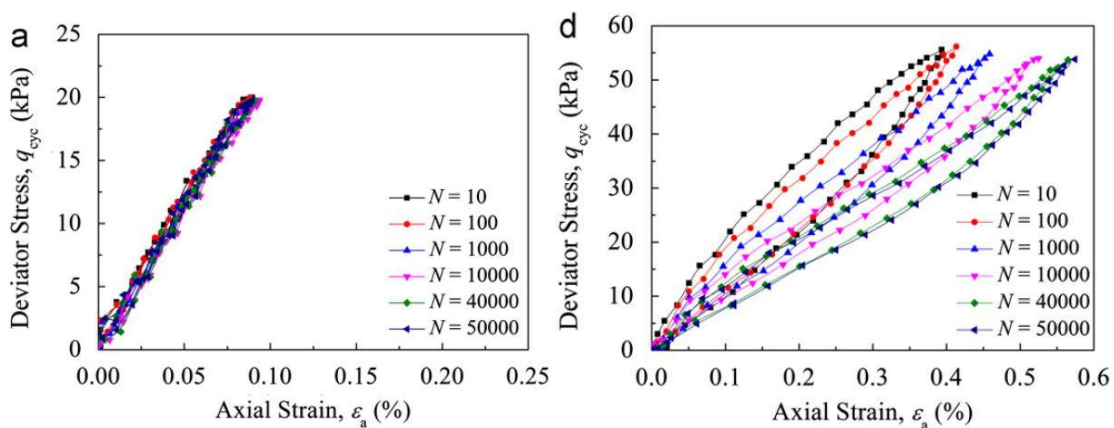
A rugalmas és maradó alakváltozási viselkedést befolyásoló tényezők közül (pl.: CSR, oldalirányú megtámasztás, terhelési frekvencia, drénezési körülmények, előterheltség, stb.) a

CSR és a hidrosztatikus feszültség a legdominánsabbak. A pulzáló feszültség – statikus nyírószilárdság arány változásának a maradó alakváltozásra gyakorolt hatását is vizsgálták a kutatók. Megállapították, hogy adott ciklusszám esetén, a CSR emelkedésével a maradó alakváltozás nagysága is növekszik. Bizonyos CSR esetén a tönkremenetel már néhány ciklus után bekövetkezik.



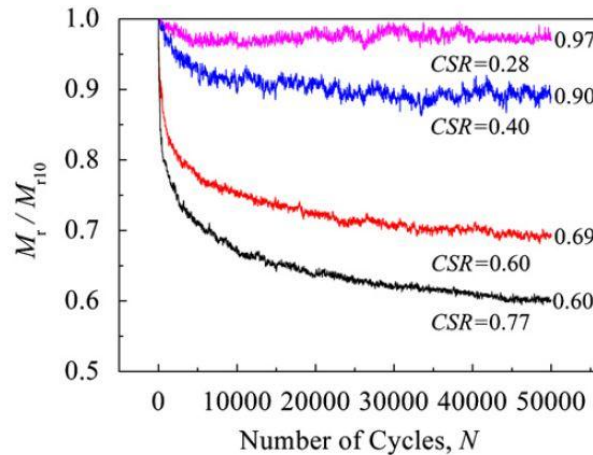
13. ábra: A maradó alakváltozás növekedése a ciklusszám függvényében, különböző CSR esetén (L. Guo et al., 2013)

Ami a rugalmas alakváltozásokat illeti, az eredmények alapján látható, hogy alacsony CSR esetén a rugalmas alakváltozás nagyon kismértékű, a hiszterézis hurkok nagyon laposak, a terhelési és a tehermentesítési görbe gyakorlatilag egybeesik, a vizsgált talaj ezen a feszültségtartományon közelítően rugalmas viselkedést mutat. A hiszterézis hurok alakja szinte változatlan marad a terhelés során. A CSR növekedésével a rugalmas alakváltozás mértéke is nő, a hiszterézis hurkok kiszélesednek, alakjuk a ciklusszám emelkedésével jelentősen változik, vagyis a talaj kezd képlékenyen viselkedni.



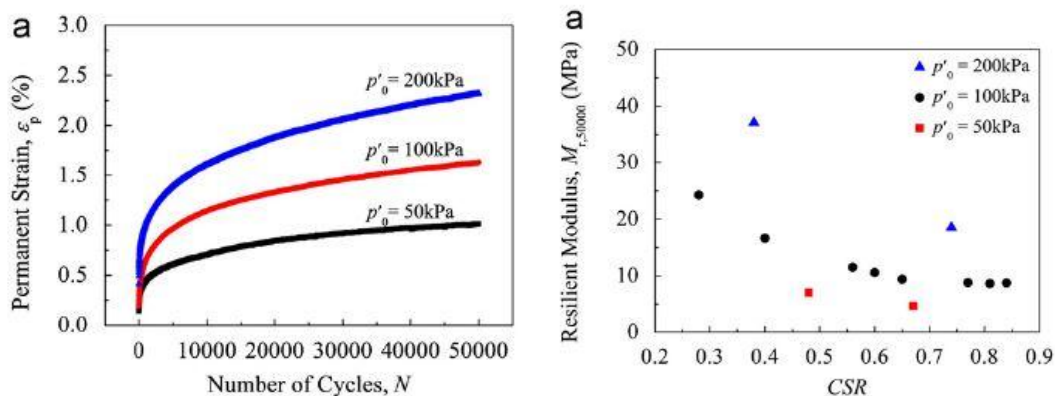
14. ábra: Hiszterézis hurkok változása CSR=0,28 (a), és CSR=0,77 (d) esetén (L. Guo et al., 2013)

A rugalmassági modulus degradációjának sebessége és nagysága egyaránt függ a CSR-től. Kisebb CSR esetén a degradáció már az első 5000 ciklus alatt lezajlik, és mértéke is jóval kisebb, mint magasabb CSR-nél, ahol nagyobb degradáció következik be, és a leromlás csak a 45000. ciklus után lassul le.



15. ábra: Normalizált rugalmassági modulus változása a ciklusszám függvényében eltérő CSR mellett (L. Guo et al., 2013)

Az oldalirányú megtámasztás is jelentősen befolyásolja az alakváltozási paramétereket. A kutatók adott CSR mellett, 3 különböző hidrosztatikus feszültség alkalmazása esetén vizsgálták a feszültség-alakváltozás összefüggéseket. Nagyobb oldalirányú megtámasztás mellett nagyobb maradó alakváltozások jönnek létre a vizsgált agyagban, illetve a rugalmassági modulus is magasabb lesz, noha a ciklusszám növekedésével ezeknél a vizsgálatoknál is bekövetkezett a degradáció. A kísérleti eredmények alapján látható, hogy a leromlás mértékét befolyásolja az oldalirányú megtámasztás nagysága. Minél magasabb a hidrosztatikus feszültség, annál nagyobb a degradáció mértéke és a folyamat időtartama. Kisebb oldalirányú megtámasztás esetén a maradó alakváltozások is kisebbek.

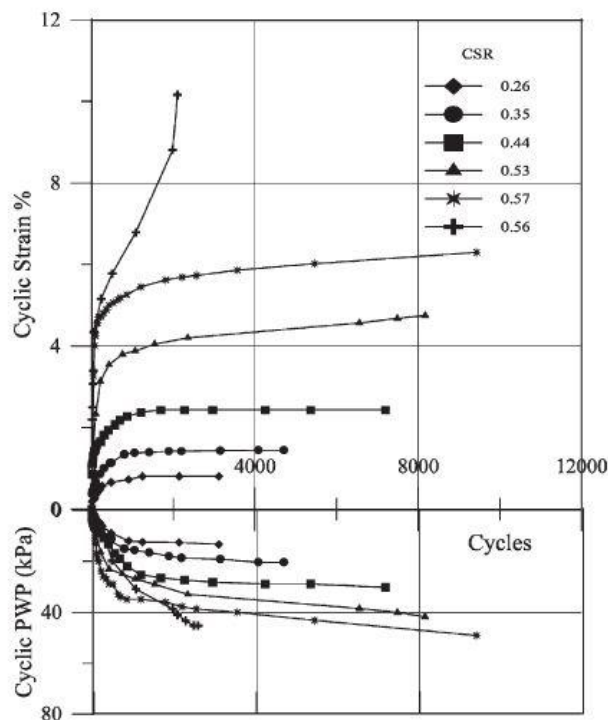


16. ábra: Az oldalirányú megtámasztás hatása: maradó alakváltozások növekedése a ciklusszám függvényében (balra) és "rugalmas" modulus 50000 ciklus után a CSR függvényében (jobbra) (L. Guo et al., 2013)

G. G. Moses et al. cementált tengeri agyag nyírószilárdságát vizsgálták monoton és ciklikus kísérletsorozattal, különböző CSR alkalmazásával. A vizsgált talajt 80-85%-os víztartalom,

88%-os folyáshatár és 28%-os plastikus határ jellemezte. Minden vizsgálatot teljesen telített (B -érték $> 0,99$), 24 órán keresztül konszolidáltatott mintán hajtottak végre. A ciklikus vizsgálatok során fél szinusz hullám alakú terhelést adtak a mintákra. A CSR-t a pulzáló feszültség és a statikus nyírószilárdság hányadosaként definiálták, azonban a ciklikus deviátor feszültség megválasztásánál ügyeltek arra, hogy a vizsgálatok során ne következzen be tönkremenetel. Nem csak a különböző CSR-ek hatását vizsgálták, a kísérleteket eltérő frekvencia, valamint más-más oldalirányú megtámasztás mellett is végrehajtották.

Megvizsgálták az alakváltozás-ciklusszám, illetve a pórusvíznyomás-ciklusszám összefüggéseket. Az eredmények alapján látható, hogy nagyobb CSR esetén nagyobb alakváltozások és magasabb pórusvíznyomás alakul ki a ciklusszám növekedésével. Alacsony CSR mellett kevesebb ciklus is elegendő az alakváltozások stabilizálódásához. Ugyanakkor egy adott CSR fölött már néhány ciklus után bekövetkezett a talaj tönkremenetele.



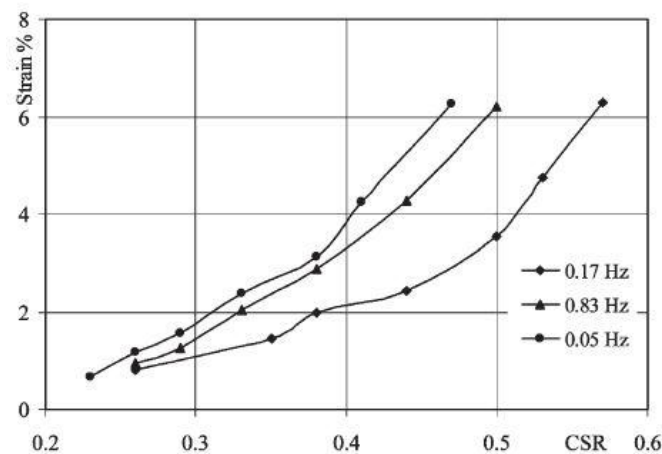
17. ábra: Ciklikus alakváltozás és pórusvíznyomás-változás a ciklusszám függvényében (G. G. Moses et al., 2002)

Az eredmények azt mutatták, hogy a pórusvíznyomás – CSR összefüggés, valamint az alakváltozás növekedése és a pulzáló feszültségarány közötti kapcsolat nagyon hasonló egymáshoz. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a pórusvíznyomás emelkedése jóval magasabb ciklusszám után fejeződik be, mint ami az alakváltozások lejátszódásához szükséges.



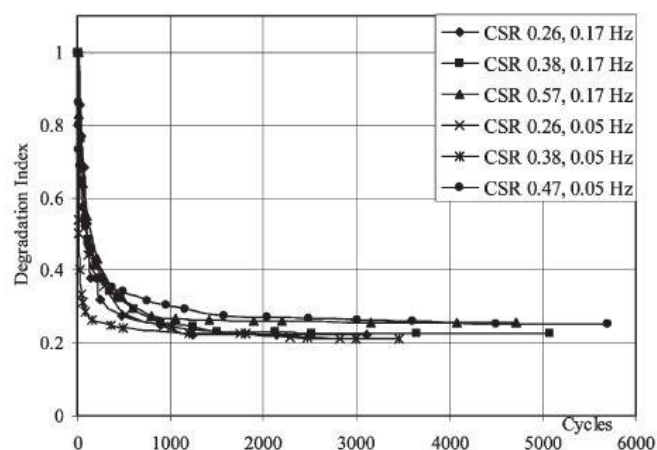
Megállapították továbbá, hogy alacsony CSR esetén a pórúsvíznyomás nem éri el a monoton nyírószilárdsági vizsgálat során mért maximális értéket, adott CSR fölött azonban elérheti, illetve akár jelentősen túl is haladhatja a monoton vizsgálat alatt észlelt legnagyobb értéket.

Az eredmények alapján látható: nagyobb frekvencia esetén magasabb az a maximális CSR, amelynél a minta még képes megőrizni a stabilitását. Amennyiben a frekvencia csökken, ez a maximális CSR-érték is kisebb lesz.



18. ábra: Alakváltozás a CSR függvényében (G. G. Moses et al., 2002)

Ami a rendszerben bekövetkezett degradációt illeti, a kutatók megállapították, hogy kisebb CSR esetén alacsonyabb a leromlás mértéke, míg a nagyobb frekvencia kisebb degradációt okoz. A ciklusszám növekedésével mind a CSR, mind a frekvencia hatása lecsökken, és az adott talaj degradációs indexe különböző terhelések esetén is ugyanahhoz az értékhez tart.



19. ábra: Degradációs index változása a ciklusszám függvényében eltérő CSR esetén (G. G. Moses et al., 2002)



3. Vizsgált anyag bemutatása

A vizsgált anyag dunaújvárosi lösz, amely „fosszilis talajokkal tagolt, túlnyomó többségében eolikus üledékekből álló képződmény” (Franyó, 1997). Általában kettő, maximum három kezdetleges talajréteg (humuszos lösz) található a löszrétegek között. A felsőbb rétegben nagy kiterjedésű erdőtüzekre utaló égési nyomokat, valamint helyenként rénszarvas csontmaradványokat találtak. Az alsóbb rétegben pedig gyakran előfordulnak mamutsontok (Pécsi M., 1993). A fiatal löszök közé tartozik, ugyanis a negyedidőszakban, pontosabban a felső pleisztocén végén keletkezett, azaz több mint 12000 évvel ezelőtt (Jámbor, 1998).

Az eredmények értékeléséhez azonban nem elegendő a talaj geológiai korának és a minta származási helyének ismerete. Meg kell határozni az alapvető talajfizikai paramétereket, amelyek tükrében vizsgálhatjuk a kapott eredményeket, következtetéseket vonhatunk le, megállapításokat tehetünk, illetve magyarázatot találhatunk az esetleges egyedi eltérésekre.

A talaj jellemzőinek meghatározásához mindenekelőtt a talajazonosítást végeztem el. Először szitálással, valamint hidrométeres eljárással előállítottam a vizsgált talaj szemeloszlási görbéjét. A talajt csökkenő lyukbőségű szabványos szitasoron ráztam át, majd a vakszitába esett anyagot hidrometráltam.

A hidrométeres eljárás alapelve, hogy az eltérő méretű szemcsék folyadékokban különböző sebességgel ülepednek. Az ülepedési sebesség nem csak a szemcseátmérőnek, hanem a szemcse testsűrűségének, a folyadék sűrűségének, valamint viszkozitásának is a függvénye. A szemcseátmérő és az ülepedési sebesség összefüggését a Stokes-törvény adja meg:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_v}{18 \cdot \eta} \cdot d^2$$

Ahol v az ülepedés sebessége, γ_s a szemcse térfogatsúlya kN/m^3 -ben, γ_v a folyadék térfogatsúlya kN/m^3 -ben, η a folyadék dinamikus viszkozitása $\text{g}\cdot\text{s/cm}^2$ -ben, d a szemcseátmérő mm -ben.

Ezen összefüggés alapján meghatározható a szemcsék átmérője:

$$d = \sqrt{\frac{1800 \cdot \eta}{\rho_s - \rho_v}} \cdot \sqrt{\frac{h}{t}}$$

Ahol ρ_s a szemcse testsűrűsége g/cm^3 -ben, ρ_v a folyadék sűrűsége g/cm^3 -ben, h az aerométer súlypontjának a folyadék felszínétől mért távolsága mm -ben, t a vizsgálat kezdete óta eltelt idő percben.

A hidrométeres vizsgálathoz a talajt desztillált vízzel, valamint diszpergáló oldattal összekeverve 1000 cm^3 -es menzúrába töltöttem, annyi vizet adagolva hozzá, hogy a keverék térfogata pont 1000 cm^3 legyen. A hőmérséklet és a korrekciós tényezők meghatározását követően felkevertem a szuszpenziót, majd 1, 2, 5, 15, 45, 120, 240, 1440, 2880 perc után elvégeztem a leolvasást a hidrométeren. A folyamatot a 20. ábra szemlélteti.

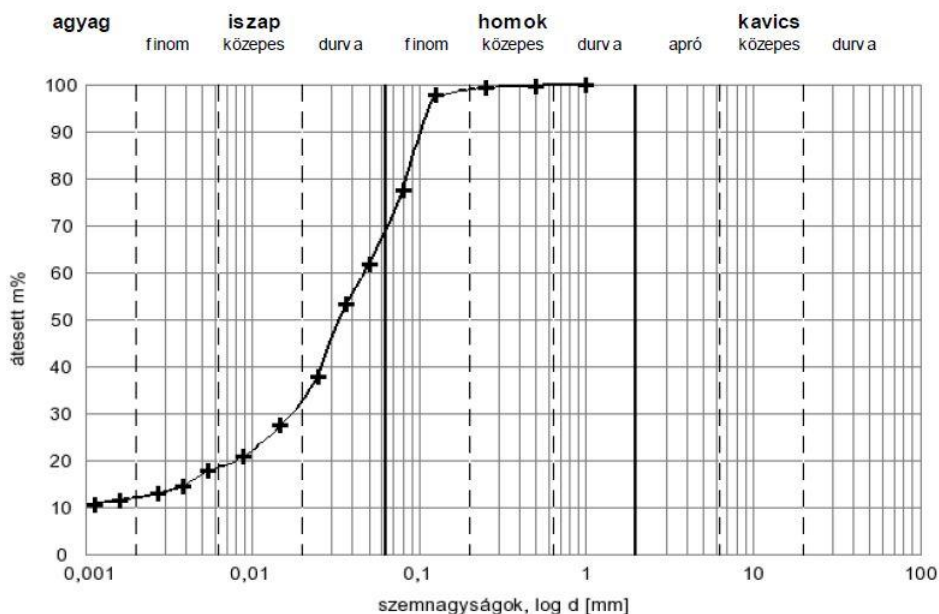


20. ábra: Löss hidrometrálása

A talaj megnevezése a szemeloszlási görbe alapján: homokos-agyagos iszap. A kapott szemeloszlási görbe a 21. ábrán látható. A talajt alkotó frakciók megoszlása:

- homok: 31,56 m%
- iszap: 56,52 m%
- agyag: 11,92 m%

Kavics frakciót egyáltalán nem tartalmazott a vizsgált anyag.

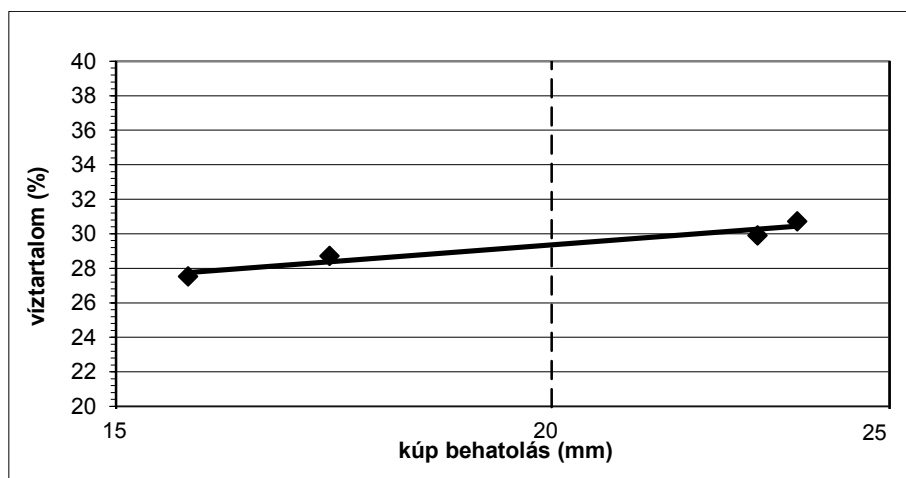


21. ábra: A vizsgált anyag szemeloszlási görbéje

Meghatároztam a talaj plaszticitási indexét is. A vizsgálatot két lépésben végeztem el, elsőként a folyási határt határoztam meg, majd a sodrási határ következett. A folyási határ vizsgálatát Casagrande- illetve ejtőkúpos méréssel lehet elvégezni. A vizsgálat során az ejtőkúpos módszert alkalmaztam. Ehhez víz fokozatos hozzáadásával, 4 különböző víztartalmú mintán, 3-3 pontban olvastam le a kúpbehatolást, majd szárítókemencében 105°C-on tömegállandóságig szárítva meghatároztam a minták víztartalmát. A talaj folyási határát pontosan a 20 milliméteres kúpbehatoláshoz tartozó víztartalmi érték adja meg. Mivel olyan mintát, amelynek víztartalma pontosan megegyezik a talaj folyási határával gyakorlatilag lehetetlen készíteni, a folyási határ értékét úgy kapjuk meg, hogy a vizsgálat eredményeit víztartalom-kúpbehatolás grafikonon ábrázoljuk, és a pontokra fektetett egyenes segítségével leolvassuk, hogy mekkora víztartalmi érték tartozik a 20 milliméteres kúpbehatoláshoz. A vizsgálatot a 22. ábra, az eredményeket a 23. ábra szemlélteti.



22. ábra: Ejtőkúpos vizsgálat



23. ábra: Az ejtőkúpos vizsgálat eredménye

A plasztikus határhoz tartozó víztartalmat úgy határoztam meg, hogy a vizsgált anyagból víz hozzáadásával olyan 3 milliméter átmérőjű szálakat sodortam, amelyek hossz-, illetve keresztirányban épp repedezni kezdtek. A szálakat szárítószekrényben kiszárítva megkaptam a lösz sodrási határát. A plaszticitási indexet a folyási és a sodrási határhoz tartozó víztartalom különbségeként értelmezzük. A vizsgált talaj folyási határa 29,2%, sodrási határa 22,0%, plaszticitási indexe pedig 7,2%, vagyis a talaj nem plasztikus, megnevezése a szemeloszlási görbe alapján történik.

A triaxiális vizsgálatok esetében terhelt minták fázisos összetételeinek meghatározása során a szakirodalmi ajánlások alapján először $2,67 \text{ g/cm}^3$ -nek vettem fel a lösz anyagsűrűségét, azonban a kapott (s, v, l) értékek alapján feltételezhető volt, hogy a vizsgált anyag sűrűsége nagyobb, mint a fent említett érték. Ezen okból kifolyólag piknométeres eljárással meghatároztam a talaj pontos anyagsűrűségét.

A vizsgálat során először az üres piknométer tömegét mértem meg, majd a műszert feltöltöttem desztillált vízzel, és egy fecskendő segítségével elvégeztem a csiszolatos kapillárison keresztül a folyadékszint pontos beállítását. A piknométerhez tartozó hőmérőről leolvastam a víz hőmérsékletét, és táblázatból kiválasztottam a víz pontos sűrűségét, majd a vízzel feltöltött piknométer tömegét is megmértem. Az adatokat felhasználva kiszámítottam a piknométer pontos térfogatát. Ezután a kiszárított műszerbe helyeztem egy kisebb mennyiséget a vizsgált anyagból, lemértem az együttes tömeget, majd újból feltöltöttem desztillált vízzel a piknométert, elvégeztem a folyadékszint beállítását, és meghatároztam a tömeget. A vizsgálat ezen fázisa a 24. ábrán látható. A teljes tömegből levonva



24. ábra: Piknométeres sűrűségmérés



a piknométer, valamint a lösz tömegét, megkapjuk a víz tömegét, illetve a térfogatát. A vizsgált anyag térfogata a piknométer és a desztillált víz térfogatának különbsége. A lösz anyagsűrűségét pedig tömegének és térfogatának hányadosaként határoztam meg. A vizsgált anyag sűrűsége $2,726 \text{ g/cm}^3$ lett.

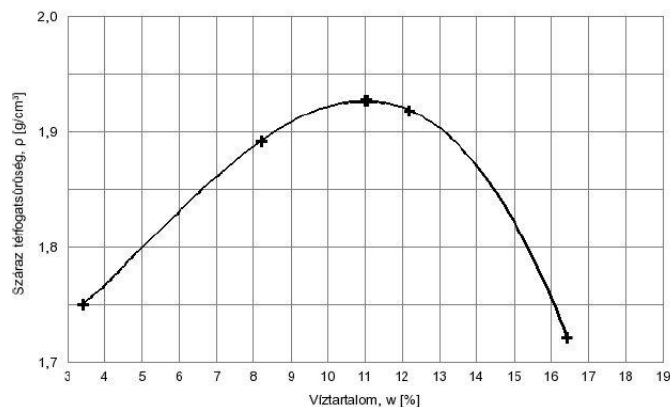
A triaxiális vizsgálatokhoz a mintákat Proctor-eljárással terveztem elkészíteni, mivel ez a módszer egyszerű, gyors és alkalmazásával biztosítható a minták egyenletes tömörsége. A mintákat az optimális víztartalomtól magasabb víztartalmon szándékoztam beépíteni egyrészt a nagyobb kohézió által biztosított könnyebb kezelhetőség érdekében, másrészt pedig azért, hogy kisebb legyen az elérhető maximális tömörség.

Az optimális víztartalom ismeretéhez szükségem volt a vizsgált talaj Proctor-görbéjére, így ezt is meghatároztam. Négy vizsgálatot hajtottam végre, különböző víztartalmak mellett, 5 rétegben 25 ütéssel tömörítettem a talajt. Mind a négy esetben lemértem a Proctor-edény és a tömörített talaj együttes tömegét, majd meghatároztam a víztartalmat. Ehhez mindegyik vizsgálat során 3 helyről vettem mintát. A víztartalmak, illetve a tömegek ismeretében meghatározhatók a száraz térfogatsűrűségek. A 4 vizsgálat adataiból tehát megkaptam 4 pontot, amelyekre grafikont illesztve kirajzolódik a vizsgált lösz Proctor-görbéje.



25. ábra: Proctor-vizsgálat

Az optimális víztartalom 11%-ra, a maximális száraz térfogatsűrűség $1,93 \text{ g/cm}^3$ -re adódott. A vizsgálatot a 25. ábra szemlélteti, a vizsgált talaj Proctor-görbéje a 26. ábrán látható.



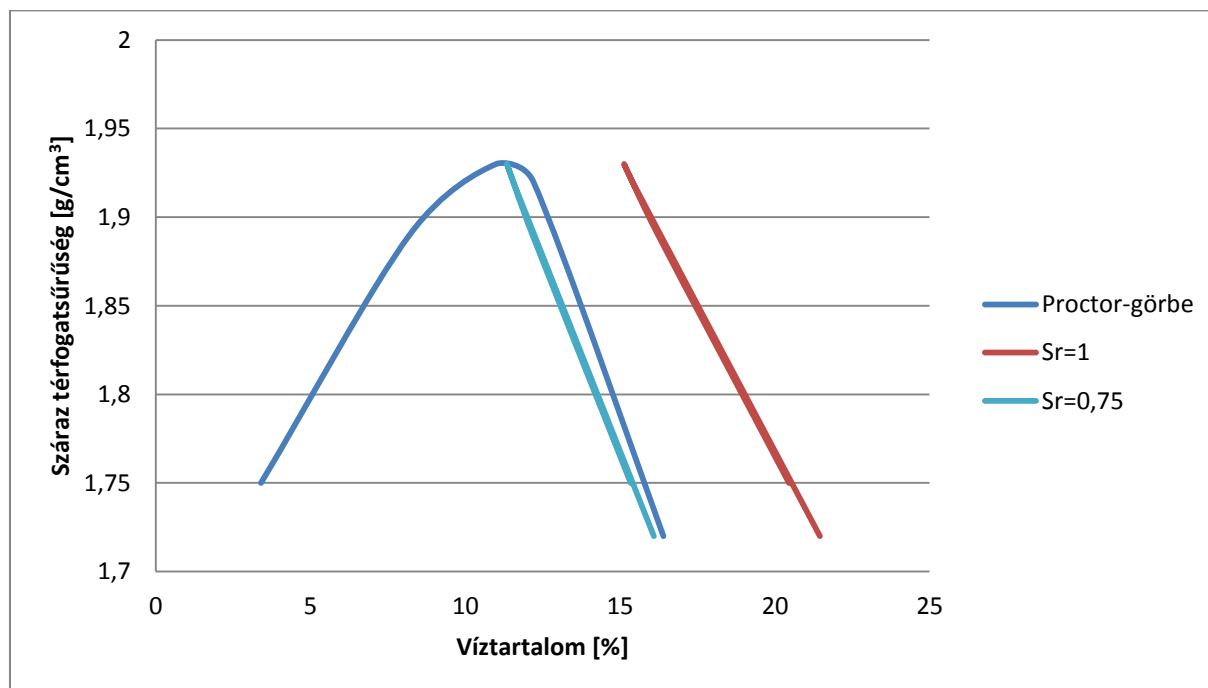
26. ábra: Dunaujvárosi lösz Proctor-görbéje

A megfelelő víztartalom kiválasztásához tudni szerettem volna, hogy az optimális víztartalom megközelítően hány százalékos telítettséghez tartozik, ezért előállítottam a 100%-os telítettséghez tartozó görbét a következő egyenlet alapján:

$$w_{sat} = \left[\frac{\gamma_w}{\gamma_s} - \frac{1}{\rho_s} \right] * 100$$

Az optimális víztartalom majdnem pontosan 75%-os telítettséghez tartozik.

A telítettségi görbét a 27. ábra szemlélteti.



27. ábra: Telítettségi görbe a lösz Proctor-görbéjével ábrázolva

Az 1. táblázat az első vizsgálati csoport mintáinak főbb talajfizikai jellemzőit mutatja.



1. táblázat: Telítetlen-konzolidálatlan minták főbb talajfizikai jellemzői

Minta jele:		losz_1	losz_3	losz_4	losz_5	losz_6	losz_7
Terhelés		nyírás	CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
Deviátor feszültség	kPa	500	100	167	250	375	450
ρ_s	g/cm ³	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726
d	cm	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
h	cm	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
V	cm ³	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06
száraz tömeg	g	152,87	151,69	151,24	159,42	160,50	158,05
terhelés előtti tömeg	g	175,18	173,71	175,50	180,40	181,62	180,77
m_v	g	22,31	22,02	24,26	20,98	21,12	22,72
w	%	14,59	14,52	16,04	13,16	13,16	14,38
ρ_n	g/cm ³	2,06	2,04	2,06	2,12	2,14	2,13
ρ_d	g/cm ³	1,80	1,78	1,78	1,87	1,89	1,86
s	%	65,9%	65,4%	65,2%	68,8%	69,2%	68,2%
v	%	26,2%	25,9%	28,5%	24,7%	24,8%	26,7%
l	%	7,90%	8,70%	6,30%	6,50%	6,00%	5,10%
e	-	0,52	0,53	0,53	0,45	0,44	0,47
n	%	0,34	0,35	0,35	0,31	0,31	0,32
Sr	-	0,77	0,75	0,82	0,79	0,81	0,84

A 2. táblázat a második vizsgálati csoport mintáinak főbb talajfizikai jellemzőit tartalmazza.

2. táblázat: Telítetlen-konzolidált minták főbb talajfizikai jellemzői

Minta jele:		losz_10	losz_11	losz_19	losz_12	losz_14	losz_15
Terhelés		nyírás	CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
Deviátor feszültség	kPa	400	80	133	200	300	360
ρ_s	g/cm ³	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726
d	cm	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
h	cm	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
V	cm ³	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06
száraz tömeg	g	153,98	153,63	154,94	152,06	153,85	153,05
terhelés előtti tömeg	g	177,22	176,08	178,01	174,34	177,02	176,05
m_v	g	23,24	22,45	23,07	22,28	23,17	23,00
w	%	15,09	14,61	14,89	14,65	15,06	15,03
ρ_n	g/cm ³	2,08	2,07	2,09	2,05	2,08	2,07
ρ_d	g/cm ³	1,81	1,81	1,82	1,79	1,81	1,80
s	%	66,4%	66,3%	66,8%	65,6%	66,4%	66,0%
v	%	27,3%	26,4%	27,1%	26,2%	27,2%	27,0%
l	%	6,30%	7,30%	6,10%	8,20%	6,40%	7,00%
e	-	0,51	0,51	0,50	0,52	0,51	0,51
n	%	0,34	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34
Sr	-	0,81	0,78	0,82	0,76	0,81	0,80



A 3. táblázat a harmadik vizsgálati kör mintáinak főbb talajfizikai jellemzőit mutatja.

3. táblázat: Telített-konzolidált minták főbb talajfizikai paramétereit

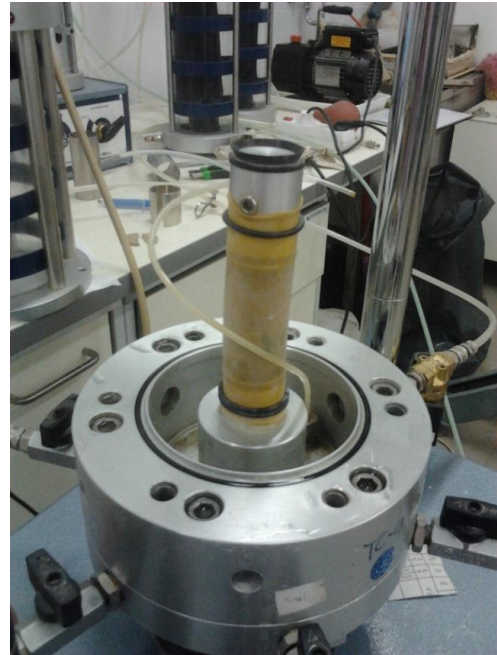
Minta jele:		losz_13	losz_17	losz_21	losz_16	losz_18	losz_20
Terhelés		nyírás	CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
Deviátor feszültség	kPa	550	110	183	275	413	495
ρ_s	g/cm ³	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726	2,726
d	cm	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
h	cm	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
V	cm ³	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06	85,06
száraz tömeg	g	154,38	150,82	153,61	153,35	150,63	153,10
terhelés előtti tömeg	g	177,98	173,83	176,84	176,55	173,62	176,13
m_v	g	23,60	23,01	23,23	23,20	22,99	23,03
w	%	15,29	15,26	15,12	15,13	15,26	15,04
ρ_n	g/cm ³	2,09	2,04	2,08	2,08	2,04	2,07
ρ_d	g/cm ³	1,81	1,77	1,81	1,80	1,77	1,80
s	%	66,6%	65,0%	66,2%	66,1%	65,0%	66,0%
v	%	27,7%	27,1%	27,3%	27,3%	27,0%	27,1%
l	%	5,70%	7,90%	6,50%	6,60%	8,00%	6,90%
e	-	0,50	0,54	0,51	0,51	0,54	0,51
n	%	0,33	0,35	0,34	0,34	0,35	0,34
Sr	-	0,83	0,77	0,81	0,81	0,77	0,80
Terhelés utáni talajjellemzők							
m	g	181,67	177,31	180,62	179,3	177,13	179,6
m_v	g	27,29	26,49	27,01	25,95	26,50	26,50
w	%	17,68	17,56	17,58	16,92	17,59	17,31
ρ_n	g/cm ³	2,14	2,08	2,12	2,11	2,08	2,11
s	%	66,6%	65,0%	66,2%	66,1%	65,0%	66,0%
v	%	32,1%	31,1%	31,8%	30,5%	31,2%	31,2%
l	%	1,3%	3,9%	2,0%	3,4%	3,8%	2,8%
Sr	-	0,96	0,89	0,94	0,90	0,89	0,92

4. Vizsgálatok bemutatása

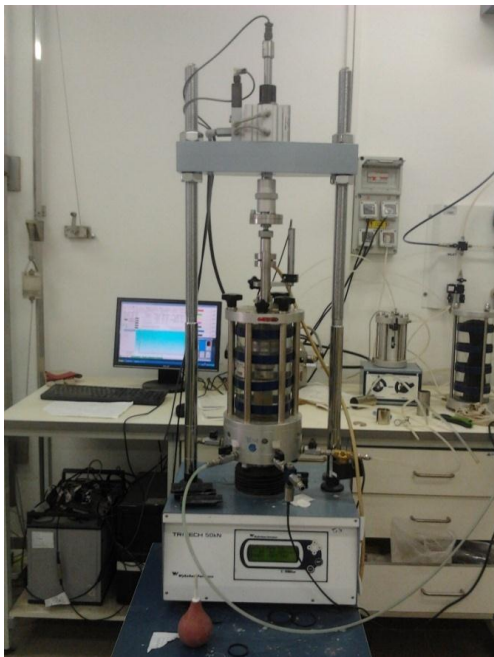
4.1. Statikus triaxiális vizsgálatok

A dinamikus vizsgálatok során alkalmazandó pulzáló deviátor feszültség nagyságát a talaj drénezetlen statikus nyírószilárdságának függvényében határoztam meg.

Három statikus vizsgálatot végeztem, melyek során az egyik mintát telítetlen, drénezetlen-konszolidálatlan körülmények között törtem el, a második minta szintén telítetlen volt, de a drénezetlen vizsgálatot ebben az esetben 1 órás konszolidáció után hajtottam végre. A harmadik mintát már telítettem a drénezetlen nyírószilárdsági vizsgálat előtt, és szintén 1 órán keresztül konszolidálódni hagytam. Ezek a telítési és konszolidálási körülmények megegyeznek a későbbi dinamikus kísérletek vizsgálati körülményeivel, ugyanis az egyes dinamikus terhelések során az azonos körülmények között mért statikus nyírószilárdság alapján határoztam meg a pulzáló deviátor feszültségek nagyságát.



27. ábra: Mintabekészítés statikus triaxiális vizsgálatához



28. ábra: A triaxiális berendezés, háttérben az eredményeket feldolgozó számítógép

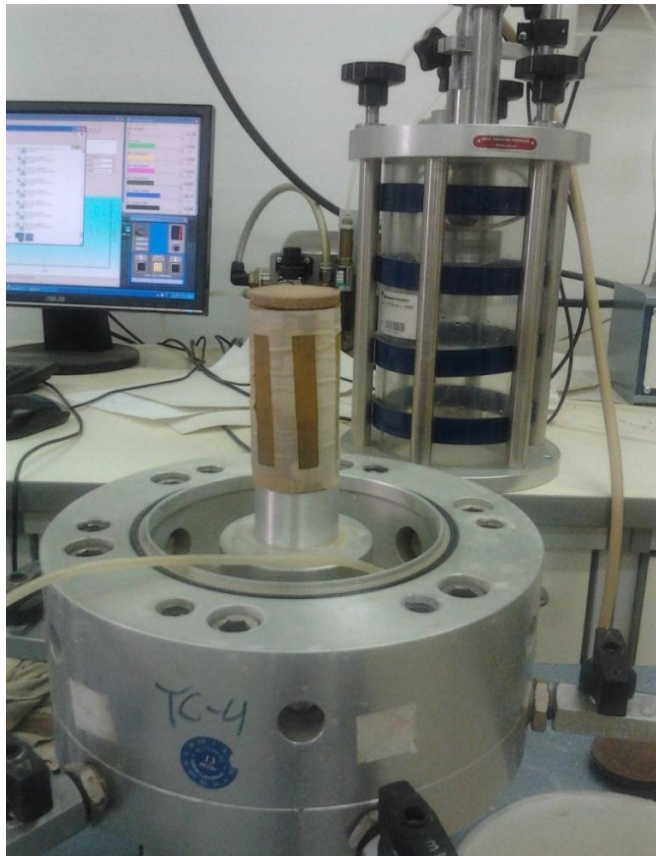
A vizsgálatokat mindhárom esetben alakváltozás vezérelten hajtottam végre, 0,333%/min alakváltozási sebesség mellett, 20%-os tengelyirányú összenyomódásig.

A statikus nyírószilárdság-vizsgálatok lehetővé tették, hogy minden egyes dinamikus vizsgálati körben ugyanazokkal a pulzáló feszültségarányokkal végezhessem a terhelést, így nemcsak a CSR változásának dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását lehetett megfigyelni, hanem azonos CSR-ek mellett a különböző telítési és drénezési körülmények okozta eltérések is mérhetővé váltak.

4.2. Dinamikus triaxiális vizsgálatok

A dinamikus triaxiális vizsgálatok esetén mindhárom vizsgálati körben 5-5 minta ciklikus terhelését végeztem el, 10^3 ciklusszám mellett, 0,2 Hz-es frekvenciával. A CSR 0,2; 0,333; 0,5; 0,75 és 0,9 volt. A CSR-t a pulzáló feszültség és a statikus nyírószilárdság hányadosaként definiáltam. A terhelés során a mérőberendezés 1 ms-ként rögzítette a terhelő erő és a külső alakváltozás nagyságát. Ezen adatokat bemenő paraméterekként használva meghatározhatók voltak a feszültség-alakváltozás összefüggések, valamint lehetővé vált a hiszterézis hurkok, illetve a tengelyirányú alakváltozások ciklusszám függvényében történő ábrázolása, a rugalmassági modulus és a csillapítás meghatározása.

Első körben a telítetlen mintákat konszolidáció nélkül, azonnal terhelésnek vetettem alá. A második vizsgálati kör mintái szintén telítetlenek voltak, de ezeket a terhelés megkezdése előtt 1 órán keresztül 100 kPa cellanyomás mellett konszolidálódni hagytam. A harmadik csoport mintáit telítettem és – ugyanolyan körülmények között, mint a második kör mintáit – konszolidáltattam. A telítéseknél minden esetben telítőcsíkokat alkalmaztam (29. ábra).

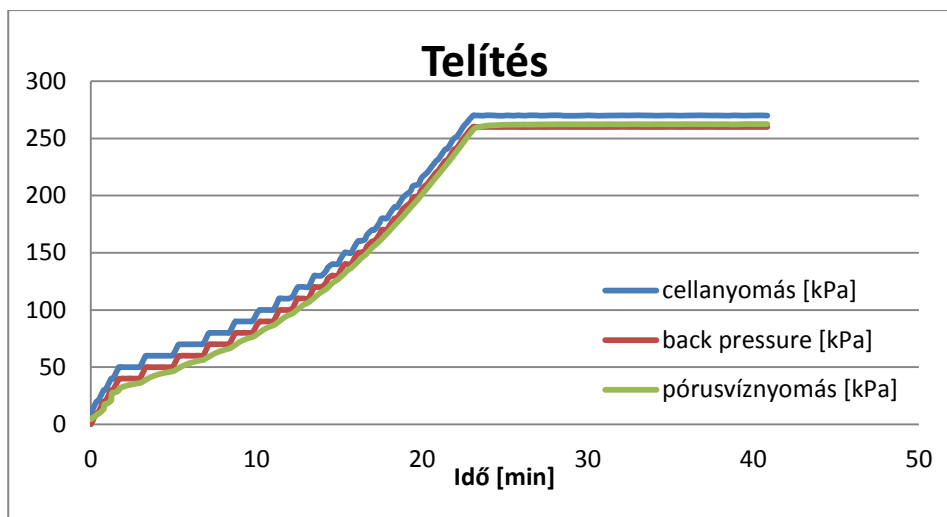


29. ábra: Telítőcsík alkalmazása dinamikus triaxiális vizsgálat során

A telítőcsík anyaga megegyezik a minta alá és fölé elhelyezett szűrőpapírokéval. Használatával felgyorsul, és hatékonyabbá válik a telítés folyamata, ugyanis lehetővé teszi, hogy a víz ne csak a minta aljánál, hanem a henger palástja mentén is bejusson a talajmintába. Az első telítéseket manuálisan végeztem, vagyis miután a pórusvíznyomás növekedése lelassult, vagy kellő mértékben megközelítette a cellanyomás értékét, megemeltem a cellanyomást és az ún. back pressure-t. A back pressure nagyságát a triaxiális berendezés a minta tetejénél méri, ez a mennyiség reprezentálja gyakorlatilag azt a nyomást, amely a mintát

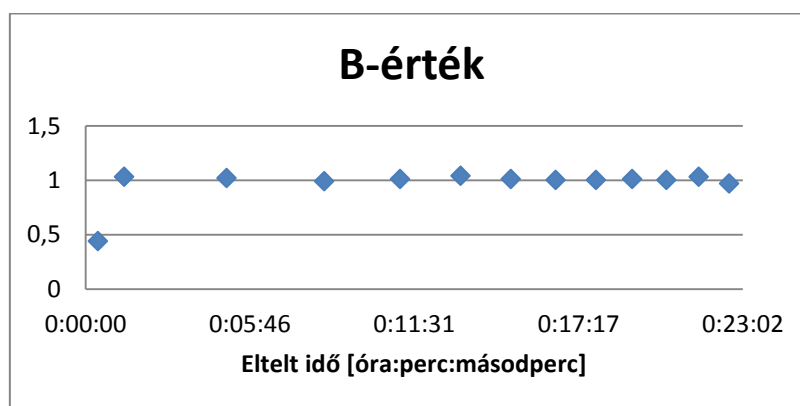


telíti. Ezeket a lépéseket egészen addig folytattam, míg a műszer által mért, a telítettség állapotát jellemző B-érték nagysága elérte a megfelelő értéket. A B érték azt fejezi ki, hogy egységnyi többlet hidrosztatikus nyomás hatására mennyivel nő a pórusvíznyomás, azaz milyen gyorsan követeli le a változást. A cellanyomás, a back pressure és a pórusvíznyomás változását a telítés során szemlélteti a 30. ábra.



30. ábra: A cellanyomás, a back pressure, valamint a pórusvíznyomás változása a telítés során

Később már a gépi telítést részesítettem előnyben, amelynél a műszer automatikusan végzi el a nyomás lépcsőzetes emelését. Bár minden esetben megfelelő B-értékeket kaptam a telítések végén, ezek megbízhatósága erősen megkérdőjelezhető, ugyanis a telítés utáni tömegek felhasználásával utólagosan számolt telítettségi értékek alacsonyabbak voltak, mint ami a műszer által mérték alapján várható lett volna. Ugyanis 1,00 körüli B értéket csak kvázi telített esetben, vagyis $S_r=100\%$ esetén mérhetne elvileg a műszer. Az (s,v,l) arányok utólagos számítása előtt már utalt a problémára az, hogy a dinamikus terhelések megkezdésekor a pórusvíznyomás nem változott az elvárt mértékben. A B-érték alakulására mutat példát a 31. ábra.



31. ábra: A B-érték időbeni változása a telítés során

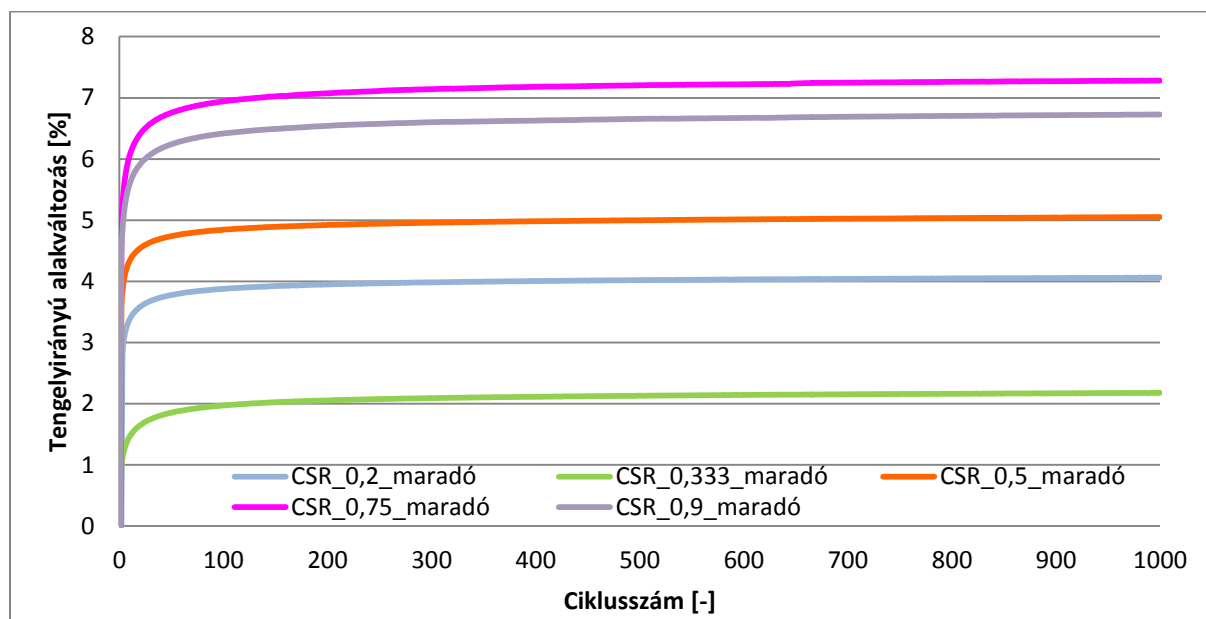


5. Eredmények

5.1. Alakváltozási jellemzők bemutatása

Megvizsgáltam az alakváltozások alakulását telítettségi-konzolidáltsági csoportok, valamint CSR szerinti bontásban.

A telítettségi-konzolidációs vizsgálati csoportok közül az első kör, vagyis a telítetlen-konzolidálatlan minták maradó alakváltozásának alakulását a ciklusszám függvényében mutatja a 32. ábra. Látható, hogy az alakváltozás növekedése nem áll arányban a CSR növekedésével, ugyanakkor az eredményeket a pórusvíznyomás változásával összevetve látható volt, hogy azoknál a mintáknál, ahol nagyobb alakváltozás jött létre, a pórusvíznyomás a kezdeti növekedési szakasz után rohamos csökkenésnek indul. Az eredmények értékelése szempontjából fontos megjegyezni, hogy legnagyobb alakváltozást elszenvedő, 0,75-ös CSR mellett terhelt minta tömörsége volt a legnagyobb, míg a 0,9-ös és 0,5-ös, valamint a 0,2-es és 0,333-as minták közel azonos tömörségűek voltak.

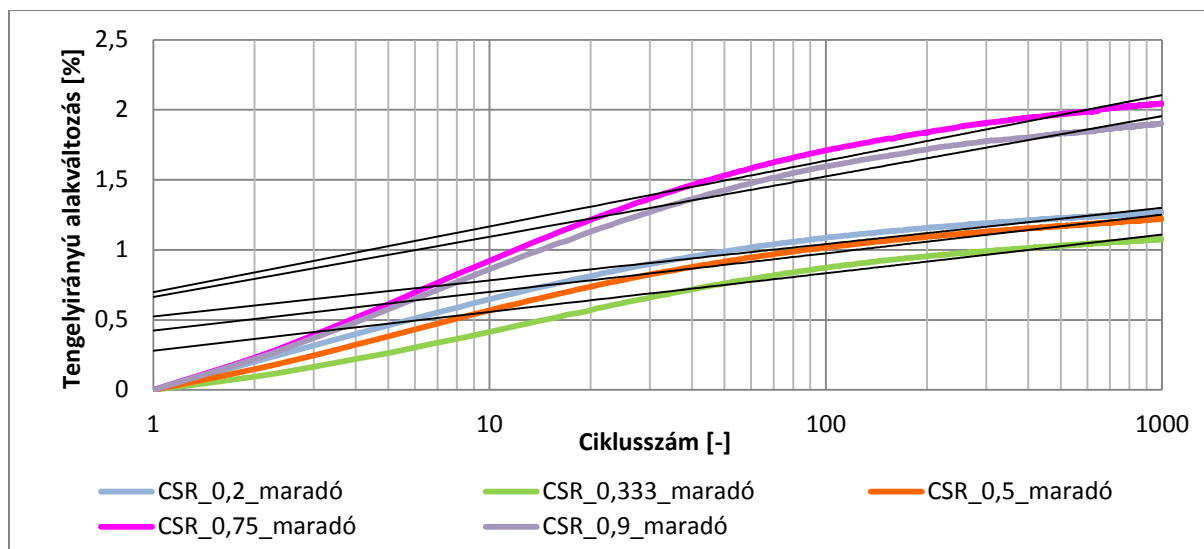


32. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták maradó alakváltozásának alakulása a ciklusszám függvényében

Ha az alakváltozási grafikonokat egy pontból indítjuk, összehasonlíthatóbbá válnak a görbék meredekségei, vagyis az alakváltozások sebessége. A folyamatot a 33. ábra mutatja. A 4. táblázatban a maradó alakváltozás görbéire illesztett logaritmikus regressziók egyenletei láthatóak, valamint az egyes regressziókhoz tartozó kovariancia négyzetek. Az ábrán a ciklusszám logaritmikus léptékben történő ábrázolása miatt az illesztett függvények egyenesként jelennek meg. A 33. ábrán – szemben az eredeti alakváltozási grafikonokkal –



megjelenik a pulzáló feszültség nagyságának a hatása, ugyanis általánosan elmondható, hogy a CSR növekedésével az alakváltozás sebessége is emelkedik, vagyis a grafikonok meredeksége növekszik. Kivételt képez ez alól a 0,75-ös CSR-rel terhelt minta, amelynek a legmeredekebb a görbéje. Az eltérés oka valószínűsíthetően a többi mintáétól jóval nagyobb tömörség lehet.

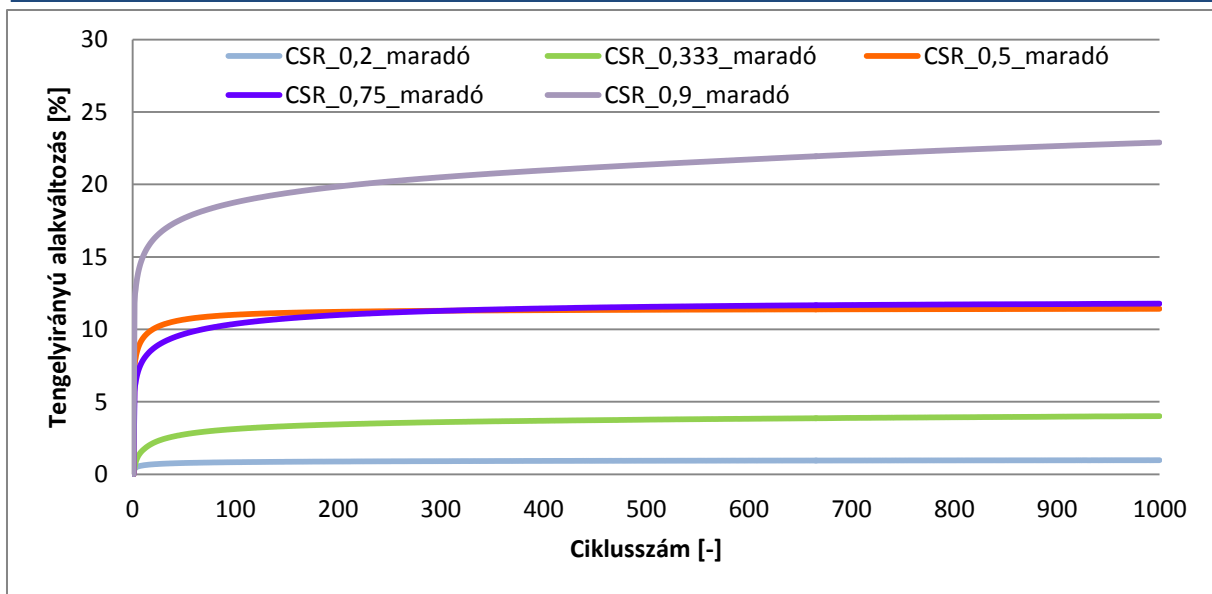


33. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták maradó alakváltozására illeszthető regressziók

4. táblázat: Telítetlen-konzolidálatlan minták maradó alakváltozására illeszthető regressziók adatai

CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
$y=0,112\ln(x)+0,523$	$y=0,119\ln(x)+0,280$	$y=0,119\ln(x)+0,423$	$y=0,203\ln(x)+0,698$	$y=0,187\ln(x)+0,662$
0,889	0,924	0,917	0,909	0,903

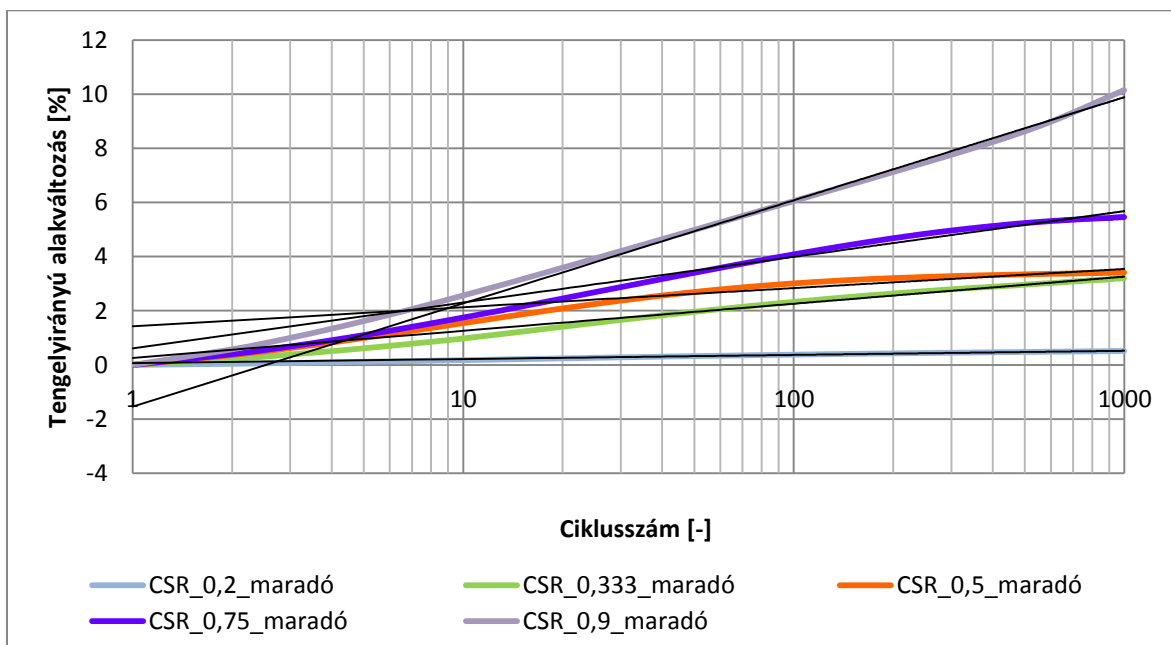
A második kör, vagyis a telítetlen konszolidált minták eredményeit mutatja a 34. ábra. Ezen minták esetében már elmondható, hogy a CSR emelkedése az alakváltozások növekedését eredményezi. A 0,5-ös minta grafikonja szinte egybeesik a 0,75-ösével, az alakváltozás nagy része az első 100 ciklusban lezajlik, míg a 0,75-ös minta maradó alakváltozása a terhelés végére meghaladja a 0,5-ös minta maximális alakváltozását. A jelenség hátterében az állhat, hogy ebben a vizsgálati körben ennek a mintának volt a legkisebb a tömörsége és a telítettsége, ugyanakkor ebben a mintában alakult ki a legnagyobb pórusvíznyomás-változás.



34. ábra: Telítetlen-konzolidált minták maradó és maximális alakváltozásai a ciklusszám függvényében

A görbék meredekségeinek összehasonlításánál (hasonlóan az első kör mintáihoz) elmondható, hogy nagyobb CSR mellett nagyobb lesz az alakváltozások sebessége is. Azonban csakúgy, mint az eredeti grafikon esetében, a 0,5-ös CSR-rel terhelt minta kivételt képez a megállapítás alól (35. ábra). Az eltérés megnyilvánul a logaritmikus regressziók meredekségében is (5. táblázat).

Kiemelendő továbbá a 0,9-es minta eredményei, amelynek alakváltozási grafikonja, a többi mintáéval ellentétben a terhelés végére nem laposodik el. Ez a jelenség szemi logaritmikus ábrázolásban még szembetűnőbb.



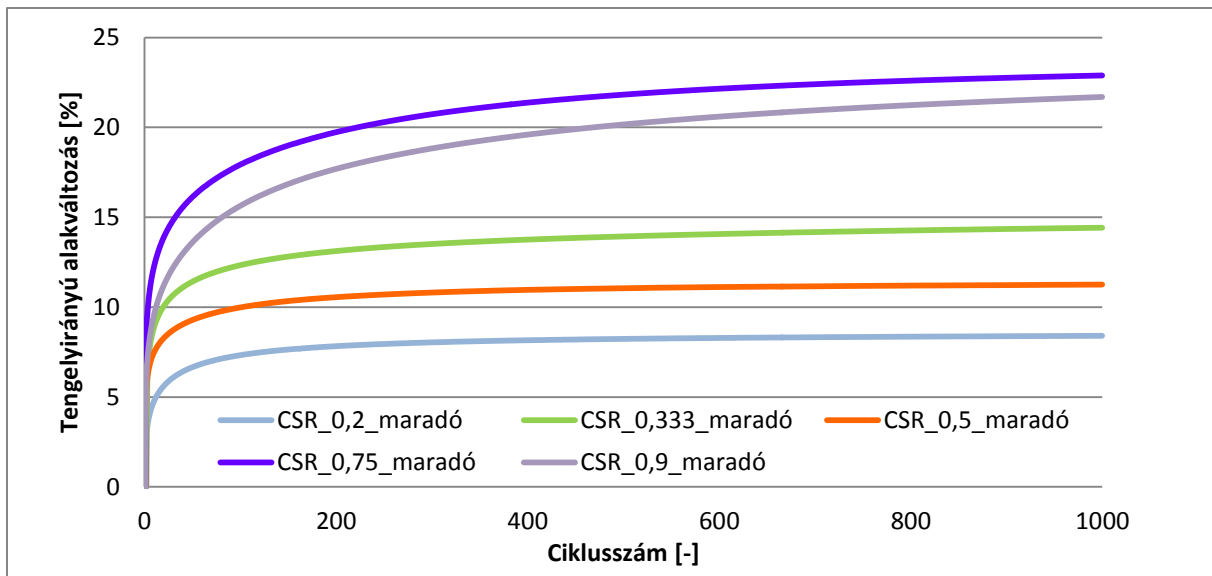
35. ábra: Telítetlen-konzolidált minták maradó alakváltozására illeszthető regressziók

*5. táblázat: Telítetlen-konzolidált minták maradó alakváltozására illeszthető regressziók adatai*

CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
$y=0,066\ln(x)+0,061$	$y=0,434\ln(x)+0,260$	$y=0,306\ln(x)+1,423$	$y=0,733\ln(x)+0,698$	$y=1,653\ln(x)-1,536$
0,981	0,981	0,813	0,957	0,992

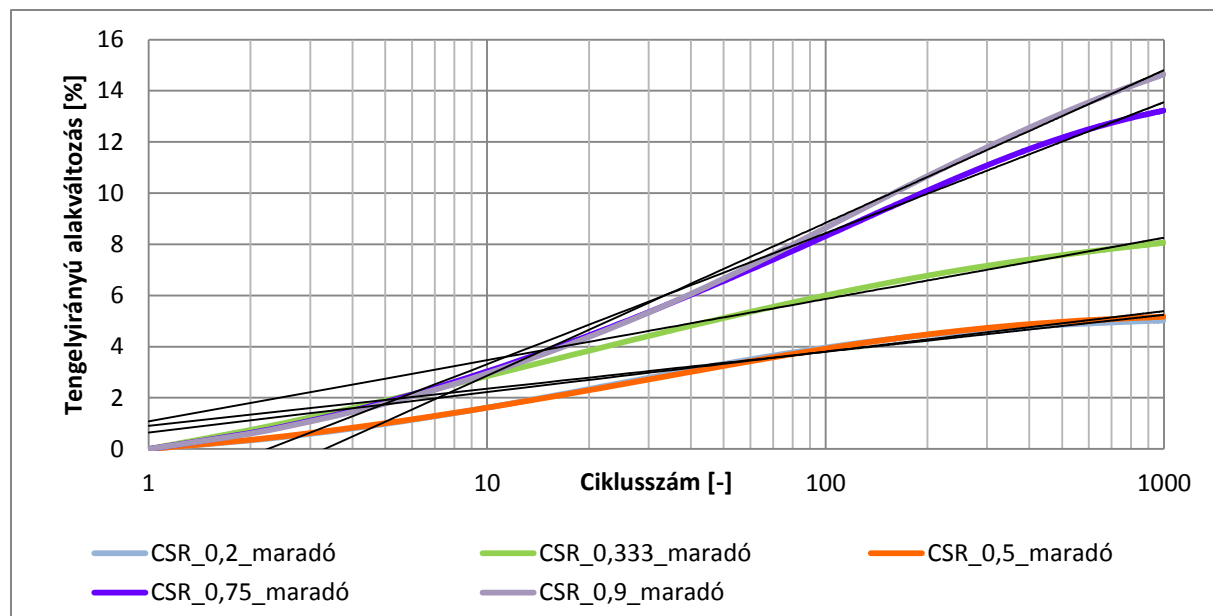
A harmadik vizsgálati kör, azaz a telített-konzolidált minták eredményei láthatók a 36. ábrán. A grafikonok alapján nem látszik egyértelmű összefüggés a CSR és az alakváltozás növekedése között, azonban ezt nem jelenthetjük ki teljesen biztosan, ugyanis a minták utólagos vizsgálata során megállapítottuk, hogy a telítések közel sem sikerültek olyan jól, mint ahogy az várható lett volna. Továbbá, általánosan tekintve nagyobb CSR esetén az alakváltozások is nagyobbak lesznek, azonban az eredmények alapján kimutatható, hogy a pulzáló feszültségarány emelkedésének hatása kevésbé jelentős, mint a telítés, a mintabekészítés vagy a tömörség. Tehát utóbbi tényezők jelentősebben befolyásolják az alakváltozás alakulását, mint a CSR változása. A 0,75-ös minta telítettsége például nem érte el a 90%-ot, tömörsége pedig az egyik legalacsonyabb volt a vizsgálati kör mintái közül, a 0,333-as minta rendelkezett viszont a legnagyobb telítettséggel és tömörséggel, valamint ebben a mintában generálódott a legmagasabb pórusvíznyomás-változás. Logaritmikus ábrázolásban jól látható, hogy a 0,75-ös CSR-rel terhelt minta grafikonja még 1000 ciklus után sem laposodik el, szemben a többi minta alakváltozásának görbéjével.

A pórusvíznyomás változását megvizsgálva látható volt, hogy némely minta esetében a pórusvíznyomás az eredeti szint alá csökken, vagyis szívás következik be. Ez azért történhet meg, mert a minta telítetlen. Véleményem szerint ez azért lehetséges, mert bár a minta tengelyirányban összemegy, térfogata mégis nő az oldalirányú alakváltozás miatt. Ennek az oldalirányú mozgásnak a meggátlása miatt a víz felületi feszültsége húzást fejt ki, egyfajta többlet kohéziót biztosítva. De ezt itt nem kívánom részletezni, mert jelen dolgozatnak nem célja a telítetlen talajok mechanikájával foglalkozni.



36. ábra: Telített-konzolidált minták maradó és maximális alakváltozásának alakulása a ciklusszám függvényében

Az alakváltozási sebességek esetében is észrevehető az eltérő tömörségek és telítettségek hatása, jóllehet a jelenség kevésbé jelentős, mint az alakváltozás esetében (37. ábra). A 0,333-as minta grafikonja például jelentősen meredekebb, mint a 0,2-es vagy a 0,5-ös mintáké (6. táblázat). Ezzel szemben a 0,75-ös és a 0,9-es minta közti eltérés gyakorlatilag eltűnik. A 0,75-ös és a 0,9-es minta mindkét grafikonja gyakorlatilag együtt mozog, ez a jelenség a pórusvíznyomás változásában is megnyilvánult.



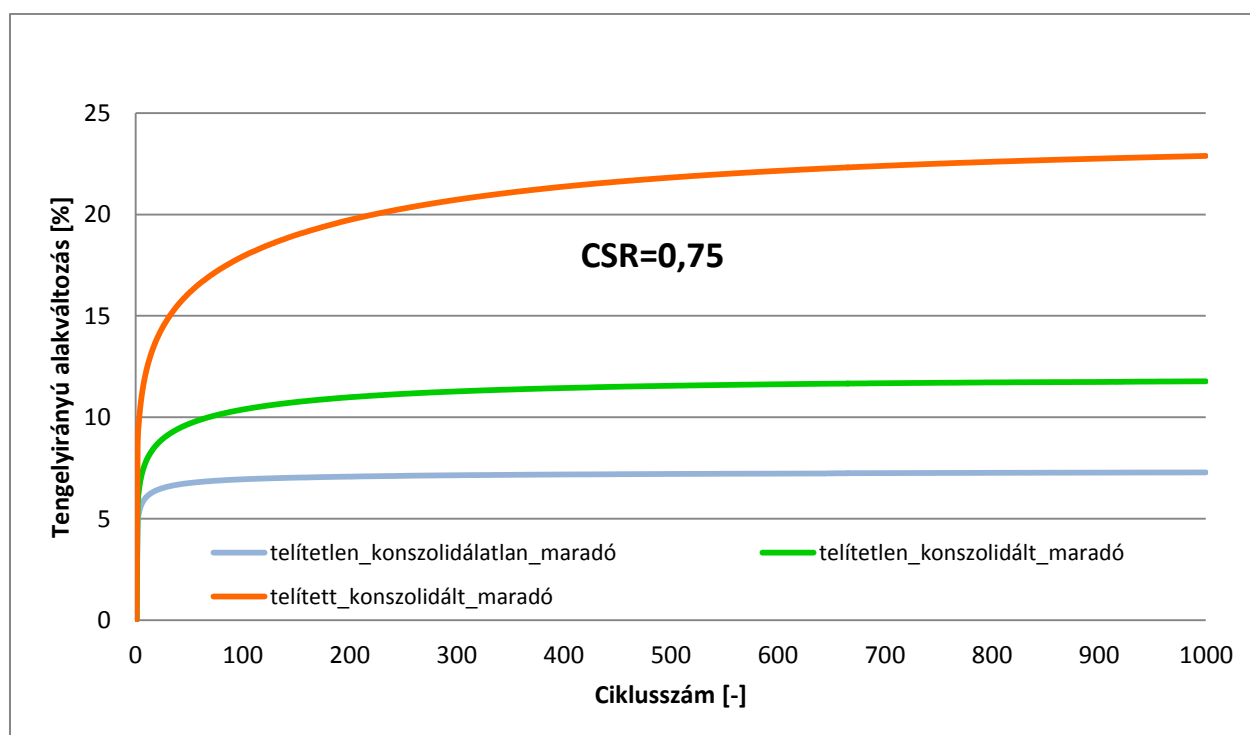
37. ábra: Telített-konzolidált minták maradó alakváltozására illesztett logaritmus regressziók



6. táblázat: Telített-konszolidált minták maradó alakváltozására illesztett logaritmikus regressziók adatai

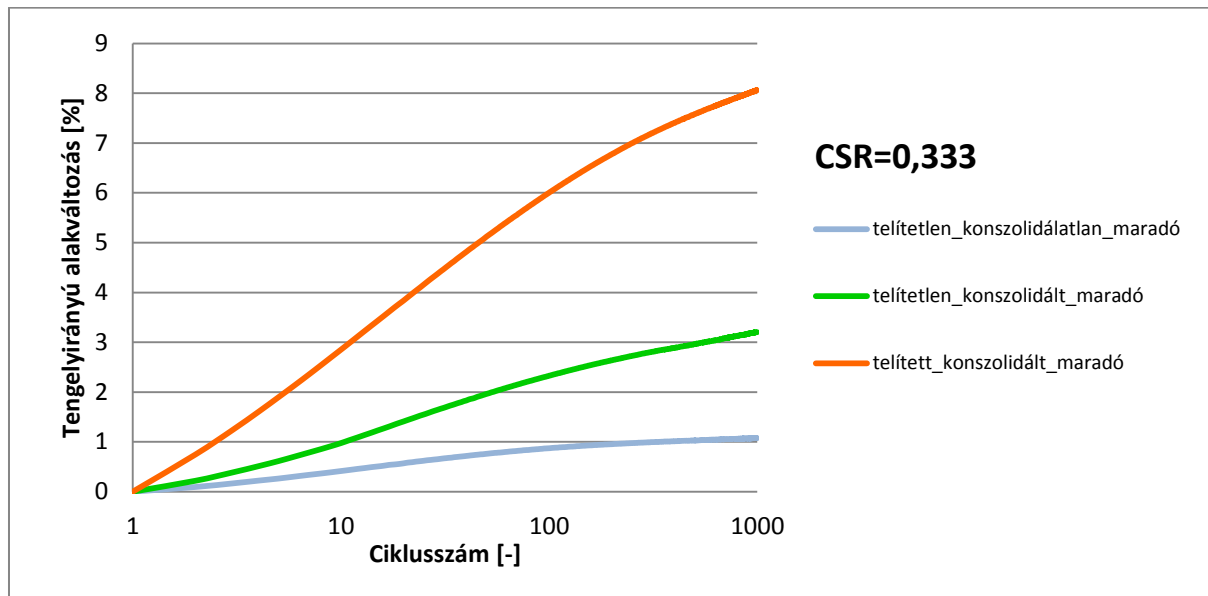
CSR 0,2	CSR 0,333	CSR 0,5	CSR 0,75	CSR 0,9
$y=0,627\ln(x)+0,908$	$y=1,039\ln(x)+1,074$	$y=0,687\ln(x)+0,639$	$y=2,223\ln(x)-1,803$	$y=2,593\ln(x)-3,107$
0,922	0,976	0,946	0,992	0,994

Az eredmények CSR szerinti csoportosításakor megfigyelhető volt az az alapvető tendencia, hogy a telített-konszolidált minták alakváltozása lesz a legnagyobb, míg a telítetlen-konszolidált minták alakváltozása kisebb lesz, mint a telített mintáké, ugyanakkor nagyobb, mint a telítetlen-konszolidálatlan minták esetében. Vagyis azonos CSR esetén a nagyobb telítettségű talaj nagyobb alakváltozásokat szenved. A konszolidáció hatása azonban már kevésbé jelenik meg, ennek oka az lehet, hogy a telítetlen-konszolidálatlan minták tömörsége valamivel nagyobb volt, mint a konszolidált mintáké, ugyanis a második körben a jobb kezelhetőség érdekében, a Proctor-görbe nedves ágának irányába toltam el a minták víztartalmát, így az elérhető tömörség kisebb lett. A legtöbb esetben az alábbihoz hasonló grafikont adtak az eredmények (38. ábra).



38. ábra: 0,75-ös feszültségarány mellett terhelt minták maradó alakváltozásai a ciklusszám függvényében

Az alakváltozás sebességét tekintve hasonló tendencia figyelhető meg, vagyis a telített-konszolidált minták esetében a legnagyobb, míg a telítetlen-konszolidálatlan minták esetében a legkisebb az alakváltozási sebesség, amelyet a grafikonok meredeksége reprezentál.



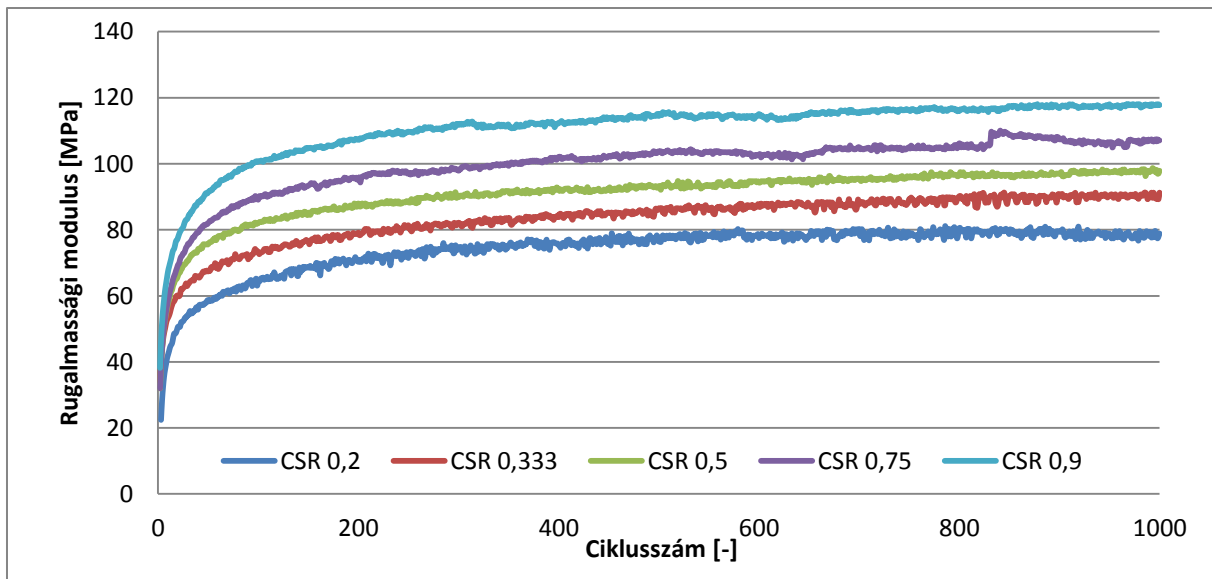
39. ábra: 0,333-as feszültségarány mellett terhelt minták alakváltozási sebessége

5.2. RUGALMASSÁGI MODULUS

A műszer által rögzített terhelési és alakváltozási adatok alapján kiszámítottam a rugalmassági modulusokat az egyes vizsgálatok esetében. Az általam jelen fejezetben vizsgált modulus gyakorlatilag az ún. szelő nyírási modulussal analóg módon definiálható rugalmassági modulus, vagyis számításakor a klasszikus $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ képletet alkalmaztam. A minták eredményeit telítési-konszolidálási körök, valamint azonos CSR esetén is összehasonlítottam.

A telítetlen-konszolidálatlan minták rugalmassági modulusának változását a ciklusszám függvényében mutatja a 40. ábra. Látható, hogy a rugalmassági modulus minden minta esetében nő a ciklusszám emelkedésével, ugyanakkor a terhelés végére a növekedés lelassul, a görbék ellaposodnak. Megállapítható továbbá, hogy a nagyobb CSR esetén a rugalmassági modulus is nagyobb lesz.

Ez az eredmény nagyon hasonló Silver és Seed (1971) közepes tömörségű homokon végzett vizsgálatainak eredményeihez. (6. ábra)



40. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták rugalmassági modulusának alakulása a ciklusszám függvényében

Mivel látható volt, hogy a rugalmassági modulusok egy szűk tartományon belül mozognak, célszerűnek tartottam megvizsgálni, hogy milyen eredményt kapok, ha az egyes minták rugalmassági modulusait normálom az átlagos hatékony főfeszültségek gyökével (σ_{mean}).

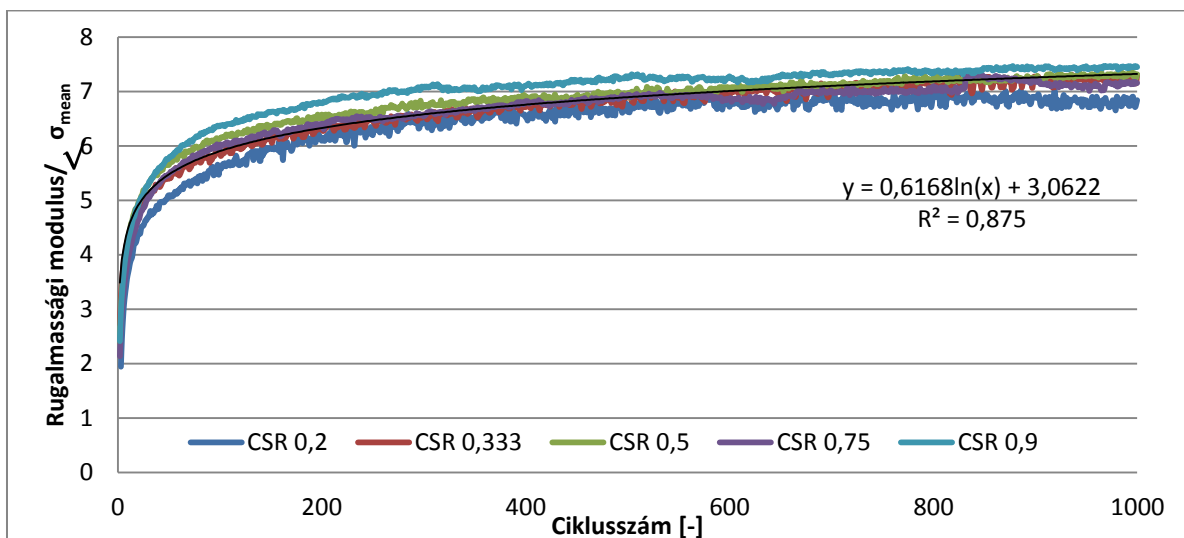
Az átlagos hatékony főfeszültségeket az alábbi képlettel számítottam:

$$\sigma_{mean} = \frac{3 * \bar{\sigma}_3 + \Delta\sigma}{3}$$

ahol $\bar{\sigma}_3$ a hatékony oldalirányú megtámasztás [kPa], $\Delta\sigma$ pedig a deviátor feszültség [kPa].

Az eredményt a 41. ábra mutatja. Látható, hogy a görbék által közrefogott sáv szűkebb, mint az eredeti grafikonok esetében.

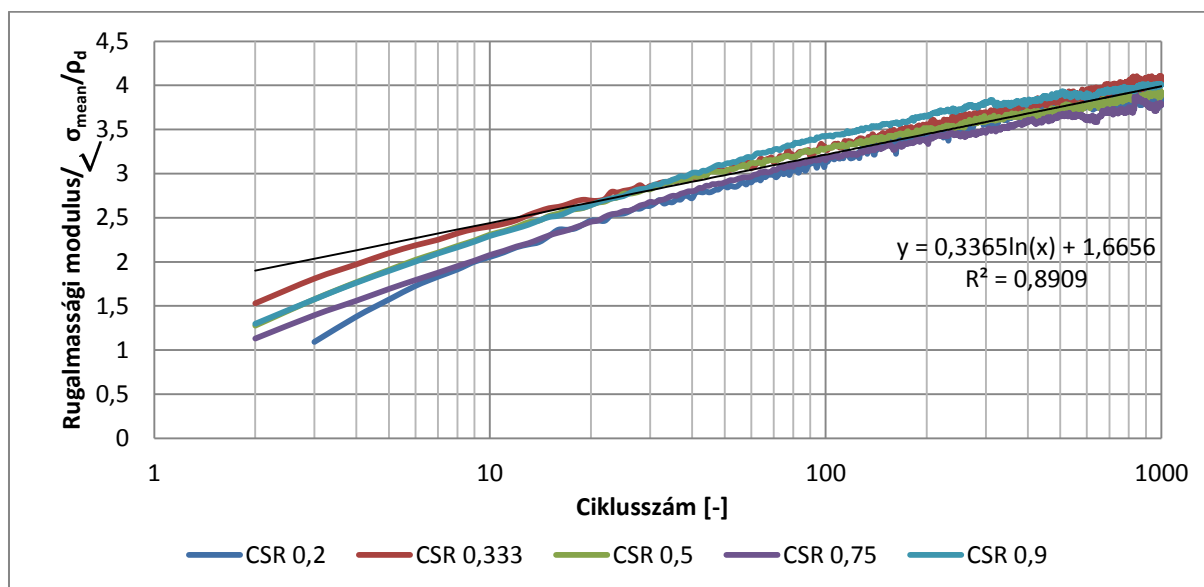
A görbékre jó egyezéssel logaritmikus regresszió illeszthető (41. ábra).



41. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták normált rugalmassági modulusaira illeszthető logaritmikus regresszió

Annak érdekében, hogy a görbék által közrefogott tartományt még tovább szűkítsem, a főfeszültségek gyökével normált rugalmassági modulus értékeket leosztottam az egyes minták száraz térfogatsűrűségével. Az eredményt a 42. ábra szemlélteti. A második normálás hatására még közelebb kerültek egymáshoz a grafikonok, a közöttük lévő különbség gyakorlatilag eltűnt. A görbékre illesztett logaritmikus regresszió is a 42. ábrán látható.

A regresszió illesztés célja az volt, hogy előállítsak egy összefüggést, amelynek segítségével a rugalmassági modulus becsülhető, amennyiben ismert a hozzávetőleges ciklusszám, a pulzáló terhelés nagyságrendje, valamint a talaj telítettségi és konszolidációs állapota.



42. ábra: Telítetlen-konszolidált minták normált rugalmassági modulusaira illesztett logaritmikus regresszió

A 7. táblázat a rugalmassági modulus-ciklusszám összefüggésre, valamint az egyes normált grafikonokra illeszthető logaritmikus regressziók egyenleteit és kovariancia négyzeteit foglalja össze. Látható, hogy a normálásoknak köszönhetően az egyezések fokozatosan javulnak.

7. táblázat: Telítetlen-konszolidált minták rugalmassági modulusaira illeszthető regressziók adatai az egyes normálási lépéseket követően

	E	$E/\sqrt{\sigma_{\text{mean}}}$	$E/\sqrt{\sigma_{\text{mean}}/\rho_d}$
függvények egyenletei	$y=8,379\ln(x)+42,17$	$y=0,616\ln(x)+3,062$	$y=0,336\ln(x)+1,665$
R^2	0,284	0,875	0,890

Megvizsgáltam azt is, hogy milyen összefüggéseket kapok, amennyiben a hízagtényezővel, vagy annak a gyökével normálok az egyes minták eredményeit. Az összefüggéseket és az R^2 -

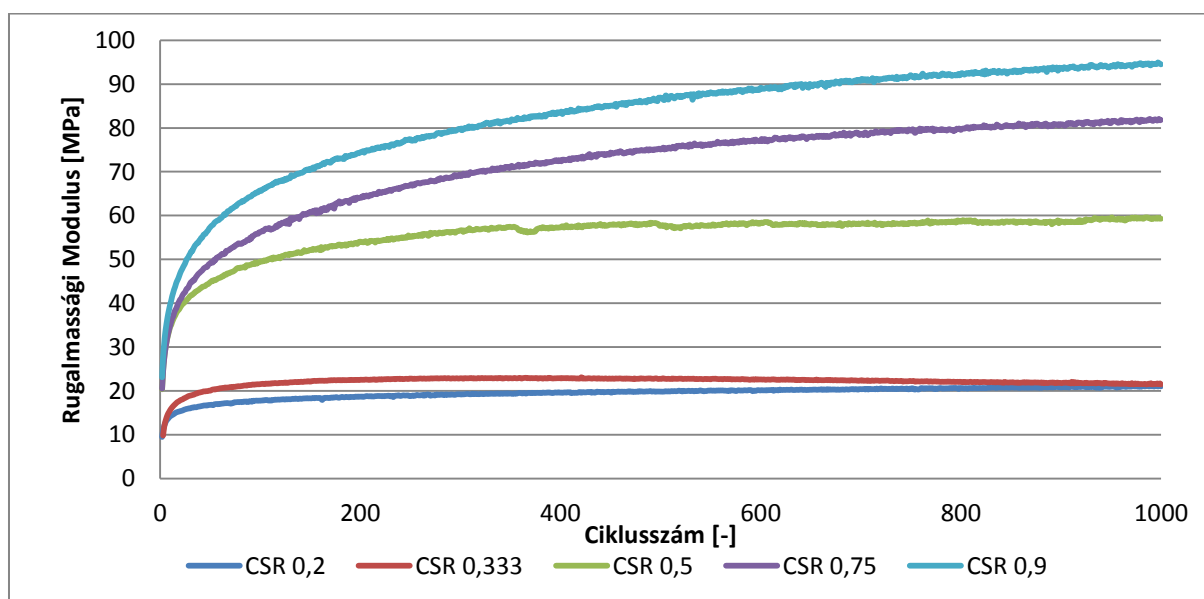


eket a 8. táblázat tartalmazza. Látható, hogy az egyezések sokkal rosszabbak, mint a főfeszültség gyökével történt leosztáskor, így ezeket a műveleteket, a másik két vizsgálati kör eredményein már nem végeztem el.

8. táblázat: Telítetlen-konszolidálatlan minták rugalmassági modulusaira illeszthető regressziók adatai a hézagtenyezővel történő normálás után

	E	E/e	E/ $\sqrt{e}$
függvények egyenletei	$y=8,379\ln(x)+42,17$	$y=4,050\ln(x)+20,22$	$y=5,821\ln(x)+29,18$
R^2	0,284	0,449	0,370

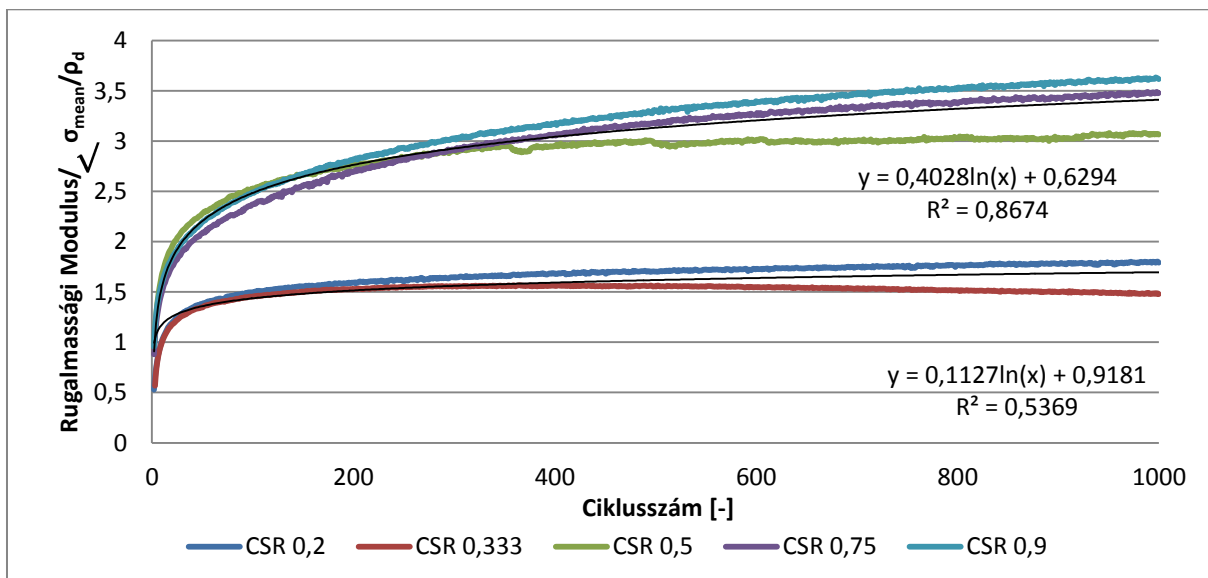
A telített-konszolidált minták esetében ugyanaz a tendencia mutatkozott meg, mint ami telítetlen-konszolidálatlan mintáknál látható volt. Ugyanakkor az egyes minták közti különbség közel sem volt olyan egyenletes, mint az első esetben, az alacsony CSR-rel terhelt minták rugalmassági modulusai között jóval kisebb volt az eltérés, mint a telítetlen-konszolidálatlan mintáknál. Emellett megfigyelhető, hogy nagyobb pulzáló feszültségarány mellett a görbék már nem laposodnak el. A telítetlen-konszolidálatlan vizsgálati kör eredményeit szemlélteti a 43. ábra.



43. ábra: Telítetlen-konszolidált minták rugalmassági modulusának alakulása a ciklusszám függvényében

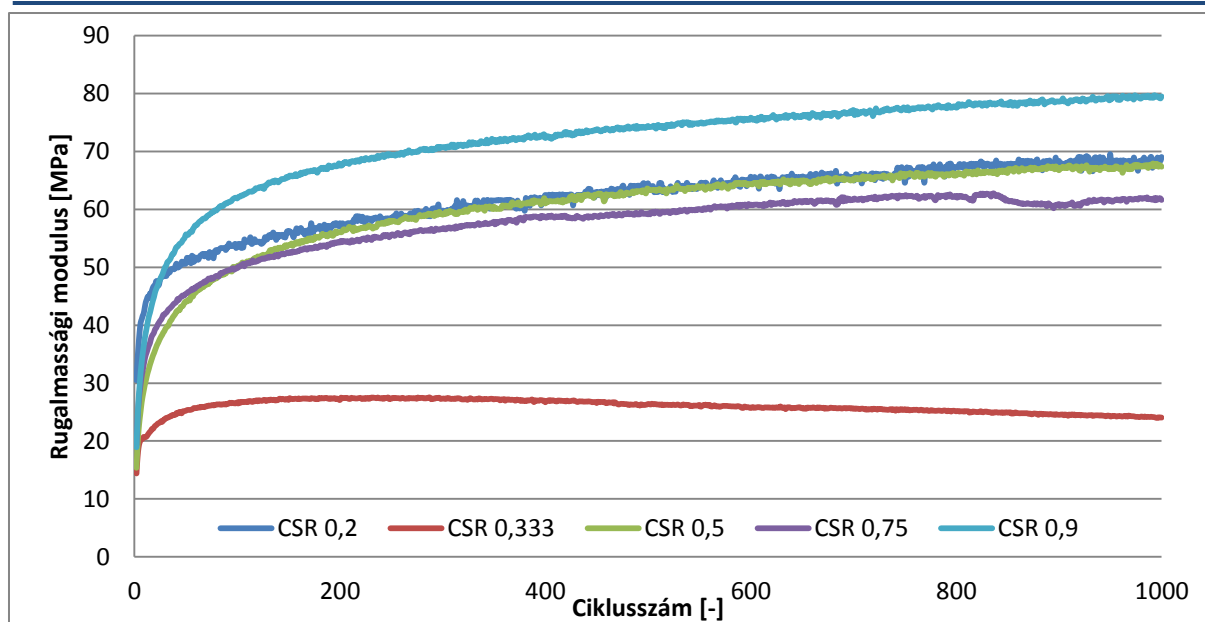
Ezekre a vizsgálati eredményekre is elvégeztem az egyes normálási lépéseket, valamint a regresszió illesztést, ugyanakkor ebben az esetben nem kaptam egyértelmű eredményt, a regresszió egyezése jóval alulmúlta a telítetlen-konszolidálatlan minták esetében számított értéket. Azt tapasztaltam, hogy amennyiben különválasztom a kisebb CSR aránnyal terhelt

minták eredményeit a nagyobb terhelést kapott mintáékéitól, az eredmények már értékelhetőbbek lesznek, különösen nagyobb pulzáló feszültségek esetén. Az eredmény a 44. ábrán látható. Az eredmények alapján elképzelhető, hogy a konszolidált talajok esetében létezik egy bizonyos határ CSR, amely alatt és fölött a rugalmassági modulus becslése másfajta megközelítést igényel. Ehhez hasonló határ CSR bevezetésére tett javaslatot L. Guo et al. (2013), az útburkolat tervezésének problematikájával kapcsolatban.



44. ábra: Telítetlen-konszolidált minták normált rugalmassági modulusaira illeszthető logaritmus regressziók

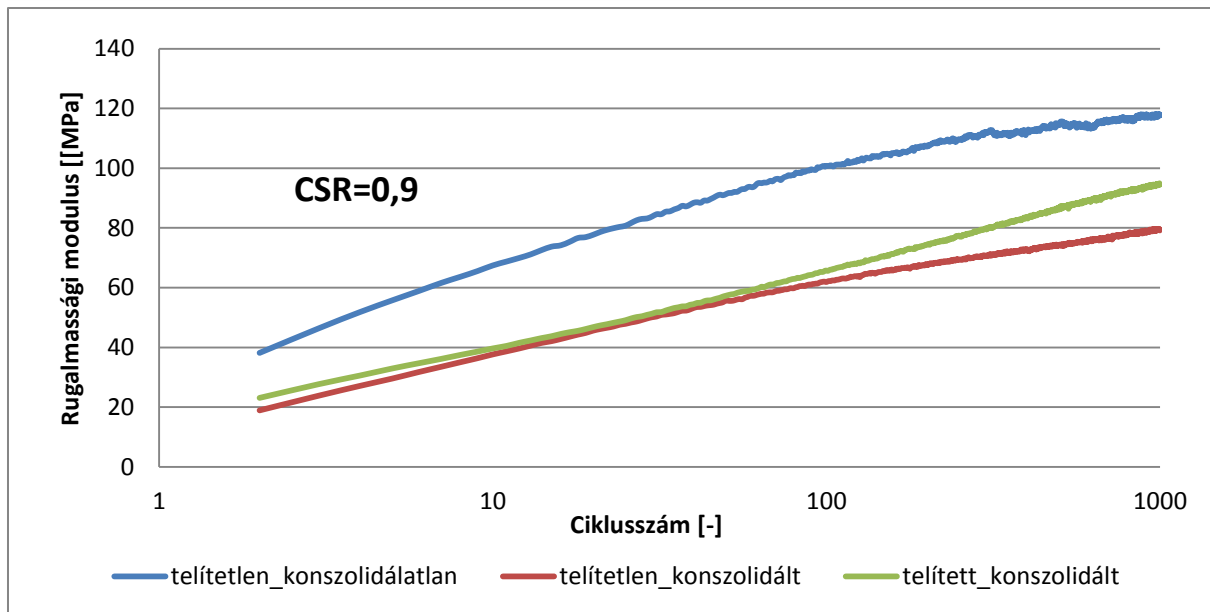
A telítetlen-konszolidált minták eredményei nem mutattak egyértelmű tendenciát. Ezen minták grafikonjai a 45. ábrán láthatók. A legjelentősebb eltérést a 0,2-es és a 0,5-ös CSR-rel terhelte minták esetében tapasztaltam, ezek rugalmassági modulusa nagyobbra adódott, mint az várható lett volna. Ennek hátterében az állhat, hogy ezeknek a mintáknak jóval kisebb volt a telítettsége, mint a vizsgálati kör többi mintájának, amelyekre viszont igaznak bizonyult az eddig megfigyelt tendencia, miszerint nagyobb pulzáló feszültségáram mellett növekszik a talaj rugalmassági modulusa. Adott feszültség szint elérése után a telítetlen-konszolidált minták grafikonjai sem laposodnak el a terhelés végére, csakúgy, mint a telített minták esetében.



45. ábra: Telített-konszolidált minták rugalmassági modulusainak alakulása a ciklusszám függvényében

Ezen minták esetében nem hozott semmilyen értékelhető eredményt az értékek normálása. Ennek oka a telítettségek jelentős eltérése lehetett, amely miatt a kisebb illetve a nagyobb feszültségarányok szétválasztása sem volt lehetséges. Ezért előnyös lenne valamilyen eddig ismeretlen paraméter bevezetése, amely segítségével a telítettség hatása kifejezhető az eredmények értékelése során. Ez azonban további laboratóriumi vizsgálatokat igényel.

A rugalmassági modulusok CSR-szerinti bontásban történő vizsgálatokor minden esetben azt tapasztaltam, hogy a telítetlen-konszolidálatlan minták rugalmassági modulusa volt a legnagyobb. A konszolidált mintákhoz viszonyított eltérés sosem volt kisebb, mint 10 MPa, és előfordult, hogy meghaladta az 50 MPa-t is. Megfigyelhető volt továbbá, hogy kis CSR mellett a telítetlen-konszolidált minták rugalmassági modulusa jóval nagyobbra adódott, mint a telített-konszolidált mintáké. Azonban a feszültségarány növekedésével ez a különbség csökkenésnek indult, és nagyobb CSR esetében már a telítetlen-konszolidált minták rugalmassági modulusa volt a legalacsonyabb. 0,9-es CSR-rel terhelt minták rugalmassági modulusainak alakulását a ciklusszám függvényében mutatja az 46. ábra.



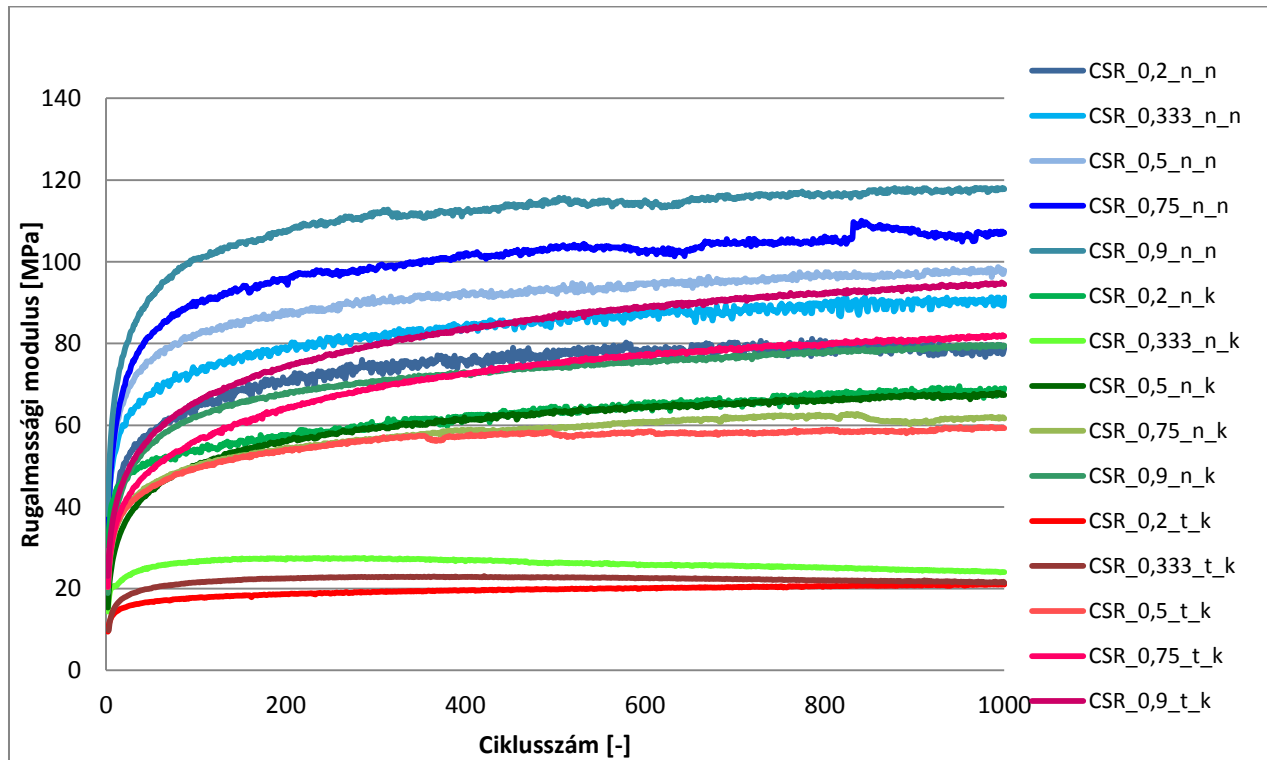
46. ábra: 0,9-es CSR mellett minták rugalmassági modulusai a ciklusszám logaritmusának függvényében

Azonos koordináta-rendszerben ábrázolva a telítetlen-konzolidálatlan, valamint a telített-konzolidált minták rugalmassági modulusainak változását a ciklusszám függvényében jól kimutatható a konszolidáció hatása (47. ábra). A kék szín árnyalataival megjelenített telítetlen-konzolidálatlan görbék élesen elkülönülnek a zöld színekkel ábrázolt telített-konzolidált grafikonoktól. Bár a legnagyobb feszültségarányal terhelt konszolidált minta értékei a terhelés végére megközelíti a legalacsonyabb CSR mellett terhelt minta értékeit, összességében véve elmondható, hogy a konszolidált minták rugalmassági modulusa mindig kisebb, mint a konszolidálatlan mintáké, függetlenül attól, hogy mekkora terhelést szenvedtek el.

Valamennyi olyan ábrában, mely az összes grafikont tartalmazza a jelmagyarázatban a CSR nagysága után n_n -nel jelöltem, hogy a minta nincs telítve és konszolidálva, n_k -val, ha nincs telítve, viszont konszolidáltattam, illetve t_k -val, amennyiben telített és konszolidált mintáról van szó.

Amikor a telített-konszolidált minták eredményeit is belevettem az összehasonlításba, kevésbé kaptam egyértelmű eredményeket, mivel a feszültségarányok szerinti összevetéskor sem mindig ugyanaz a típusú minta adta a legalacsonyabb értékeket. Azonban még az összes eredmény összehasonlításakor is megnyilvánult, hogy a telítetlen-konzolidálatlan minták mennyivel merevebben viselkedtek, mint a konszolidáltak, hiszen még a legnagyobb terhelést elszenvedett telített minták rugalmassági modulusa is alatta maradt a 0,5-ös vagy annál

nagyobb CSR mellett terhelt minták esetében mért értékeknek. Az összes minta grafikonja az 47. ábrán látható.



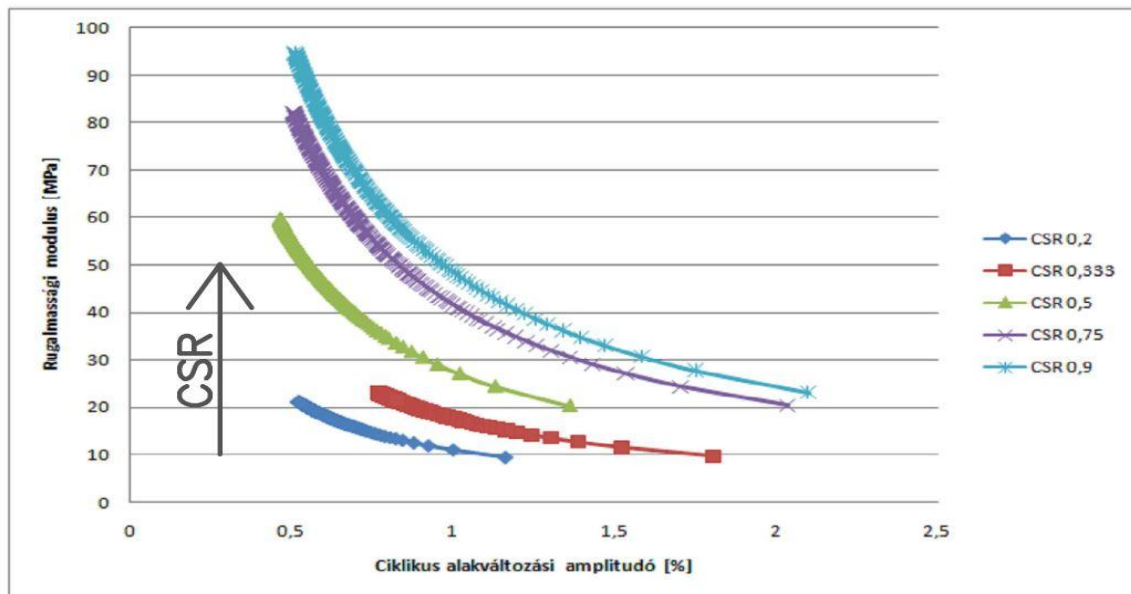
47. ábra: Az egyes telítettségi-konzolidáltsági csoportok rugalmassági modulusainak összehasonlítása

Megvizsgáltam a rugalmassági modulus változását a ciklikus alakváltozási amplitúdó alakulásának függvényében.

Az alábbi megállapításokat tettem:

- Adott CSR esetén a rugalmassági modulus csökken a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó mellett a rugalmassági modulus nő a pulzáló feszültségátlag emelkedésével.
- Adott rugalmassági modulus mellett a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekszik a pulzáló feszültségátlag növekedésével.

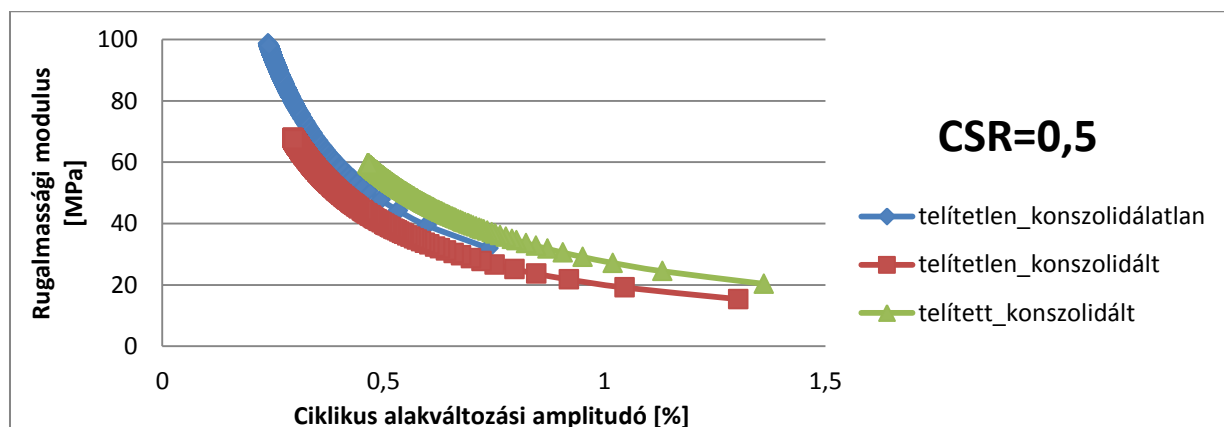
Az eredményeket a 48. ábra szemlélteti. Az ábrán a telített-konzolidált minták grafikonjai láthatók, ugyanakkor az eredmények alapján a másik két vizsgálati kör esetében is érvényesek a fenti következtetések. Ezek az eredmények hasonlóak Silver és Seed (1971) eredményeihez. (6. ábra)



48. ábra: Telített-konzolidált minták rugalmassági modulusainak változása a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében

A CSR szerinti csoportosítás esetében is megfigyelhető volt egy egységes tendencia. A pulzáló feszültségaránytól függetlenül a 49. ábrához nagyon hasonló grafikont kaptam eredményül. Az eredmények alapján az alábbi következtetéseket vontam le:

- Adott terhelés alatt a rugalmassági modulus csökken a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a talaj rugalmassági modulusa nő a telítés hatására.
- Adott rugalmassági modulus esetén a ciklikus alakváltozási amplitúdó csökken a konszolidáció hatására.
- Adott rugalmassági modulus esetén a ciklikus alakváltozási amplitúdó nő a telítés hatására.

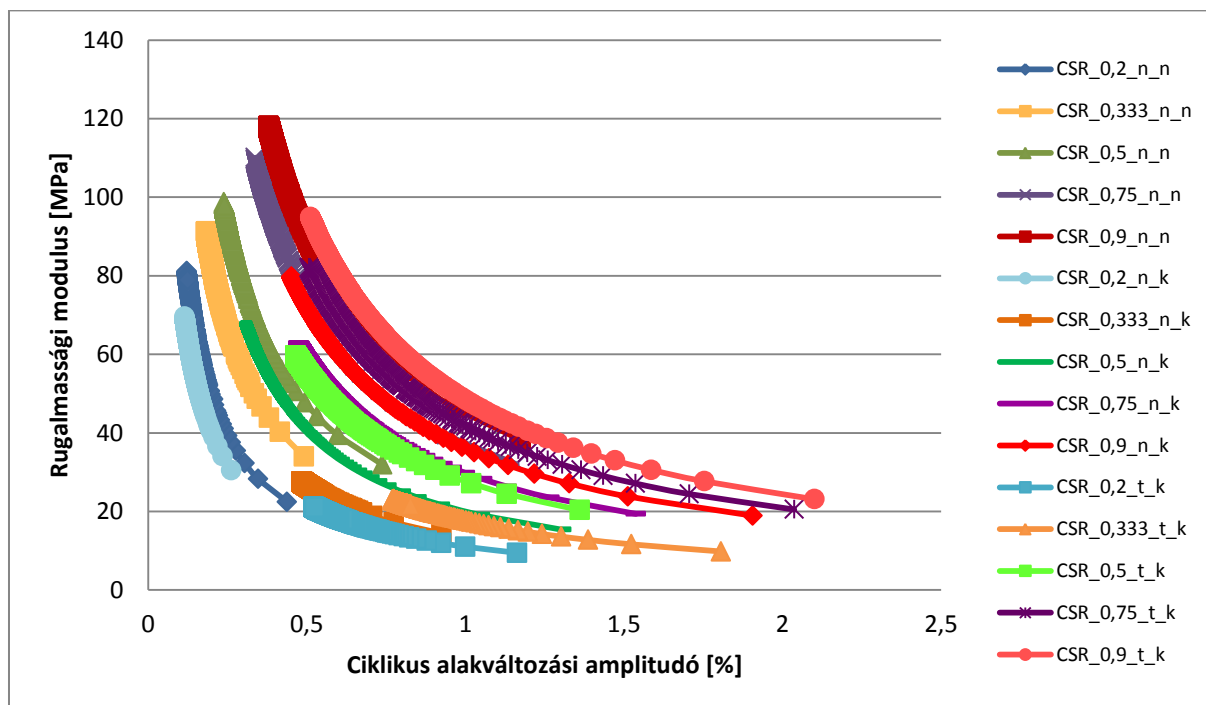


49. ábra: 0,5-ös CSR mellett terhelt minták rugalmassági modulusainak változása a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében



Mivel mind a telítettségi-konzolidáltsági, mind pedig a CSR szerinti összehasonlítások során megmutatkozott egy egységes tendencia, úgy gondoltam célszerű lenne az összes minta eredményét egybevetve vizsgálni. Ezzel az összevetéssel kiderül ugyanis, van-e valamilyen csoportosulás a globális rendszeren belül, vagyis hogy elkülönülnek-e az eredmények akár telítettség, akár pulzáló feszültségarány szerint. Az összes minta rugalmassági modulus-ciklikus alakváltozási amplitúdó görbéit az 50. ábra tartalmazza.

Megfigyelhető bizonyos szétválasztódás a grafikonok között: azonos CSR arány mellett terhelt minták alkotnak kisebb csoportokat. Ebből az következik, hogy a rugalmassági modulus-ciklikus alakváltozási amplitúdó összefüggésekre a pulzáló feszültségarány jelentősebb hatást gyakorol, mint a konszolidáció vagy a telítettség változása.

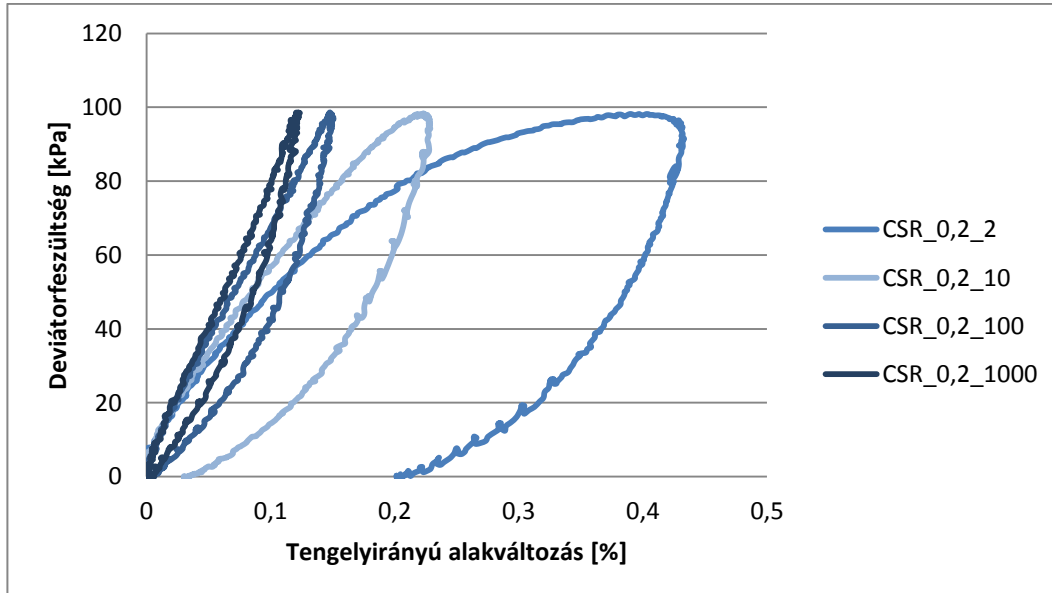


50. ábra: Az összes minta rugalmassági modulusa a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében

5.3. Histerézis hurkok összefüggései

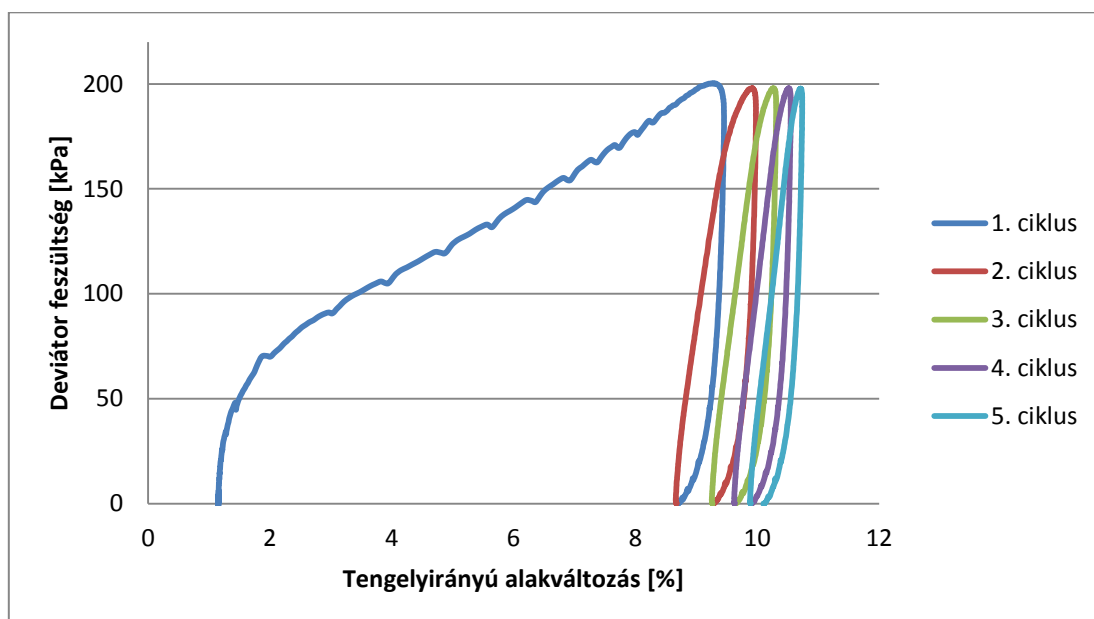
A histerézis hurkok segítségével egyaránt jól illusztrálható a halmozódó maradó alakváltozás, valamint a rugalmassági modulus és a csillapítás terhelés alatt lezajló változása. A rugalmassági modulus alakulására mutat példát az 51. ábra, amelyen a 0,2-es CSR-rel terhelt telítetlen-konzolidálatlan minta 2., 10., 100., illetve 1000 ciklusát jelenítettem meg. Az első helyett azért esett a 2. hurokra a választásom, mert az első ciklusokat nem vettem tekintetbe az eredmények értékelése során, ugyanis az első ciklus általában irreguláris ciklus,

amely torzíthatja az eredményeket. Látható, hogy a ciklusszám emelkedésével a hiszterézis hurkok meredeksége, vagyis a merevség növekszik. Az ábra azt is jól kimutatja, hogy a terhelés előrehaladtával a növekedés lelassul, hiszen a 100. és az 1000. hurok hajlásszöge között gyakorlatilag nincs jelentős eltérés.



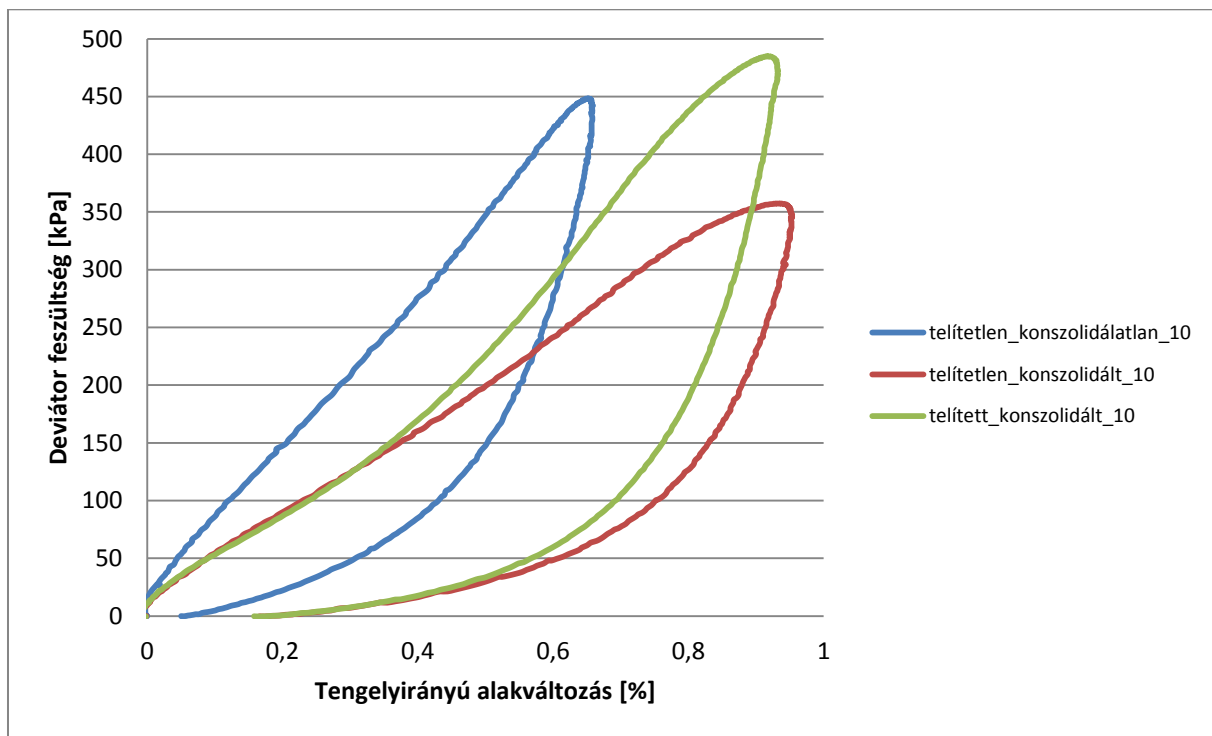
51. ábra: 0,2-es feszültségarány mellett terhelt telítetlen-konzolidálatlan minta jellegzetes hiszterézis hurokjai

0,5-ös feszültségarány mellett terhelt telítetlen-konzolidált minta első öt hiszterézis hurokját mutatja az 52. ábra. Ezen a grafikonon kirajzoltam az első terhelési ciklus hurokját is, szemléltetésképpen. Látható, hogy az első és a második hurok közötti eltérés jóval nagyobb, mint a második és az azt követő hurokok közti különbség.



52. ábra: 0,5-ös CSR-rel terhelt telítetlen-konzolidált minta első öt hiszterézis hurokja

0,9-es CSR arány mellett terhelt minták 10. ciklushoz tartozó histerézis hurokjai láthatók az 53. ábrán. A jobb összehasonlíthatóság kedvéért nem ábrázoltam a 10. ciklus eléréséig felhalmozódó alakváltozásokat. Látható, hogy a telítetlen-konzolidálatlan minta meredeksége a legnagyobb, a telítetlen-konzolidált mintáé pedig a legkisebb. Ez az eredmény a 46. ábrán is megnyilvánult, az 53. ábra gyakorlatilag a 46. ábra tizedik ciklushoz tartozó 3 pontját adja meg.



53. ábra: 0,9-es CSR mellett terhelt minták 10. ciklushoz tartozó histerézis hurokjai

5.4. Csillapítási viszonyok

Ahhoz, hogy meg tudjam határozni az egyes minták csillapításának alakulását a terhelések során, mindegyik terhelés esetében minden ciklus minden egyes pontjában numerikus integrálással előállítottam a disszipált energia nagyságát. A numerikus integrálás során az ún. trapéz-szabály közelítő formulát alkalmaztam, amelynek lényege, hogy az integrálandó függvényt egyenlő hosszúságú részintervallumokon lineárisan közelítjük.

Az integrálás általános képlete ebben az esetben:

$$\int_a^b f(x)dx = (b - a) \cdot \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

A csillapítás meghatározásához az egyes ciklusok szigma-epszilon diagramját kellett integrálnom, így megkaptam a hiszterézis hurkok területének nagyságát, amely az egy ciklus alatt disszipált energiát jelenti. A részintervallumokat az egy századmásodperc alatt lezajló alakváltozások képezték. Tehát a numerikus integrálás képlete dinamikus terhelési ciklusra vonatkoztatva:

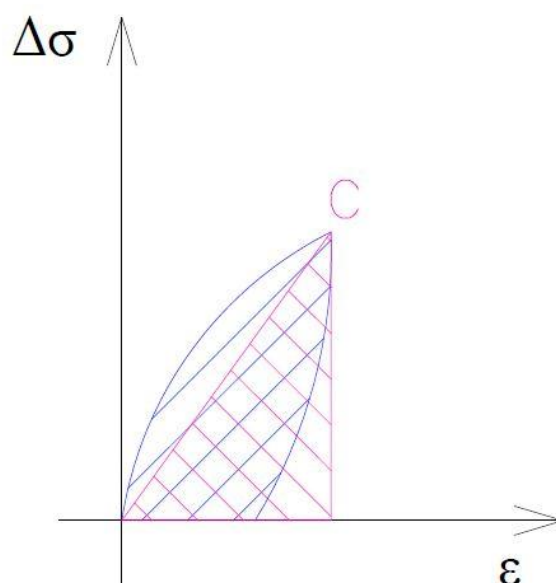
$$\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

A csillapítás az alábbi képlettel számítható (Das és Ramana, 2011):

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{Hiszterézis hurok területe}}{\text{Háromszög területe}}$$

Ebben az esetben csak egy "fél" hiszterézis hurok lesz a ciklusonként kirajzolható szigma-epszilon diagram, mivel a terhelést is fél-szinuszos hullám alakú impulzusként adtam rá a mintára. Ennek az a következménye, hogy a hurok területét csak egy háromszög területével kell leosztani (54. ábra). Ideális esetben a maximális alakváltozáshoz tartozik a maximális feszültség értéke (az 54. ábrán C-vel jelölt pont), a terhelések során azonban a hiszterézis hurkok nem csúcsosodtak ki az ábrán látható módon, a csúcuk sokkal lekerekítettebb volt (55. ábra). Ennek ellenére a háromszög területének számításakor a "C" csúcspont koordinátáinak a legmagasabb feszültség és a legnagyobb alakváltozás értékét vettem fel. Ez a közelítés nem okozott számottevő hibát a végeredmény szempontjából.

Az ábrán kék sraffozással jelöltem a disszipált energia nagyságát, rózsaszínnel pedig a mintával közölt potenciális energiát.

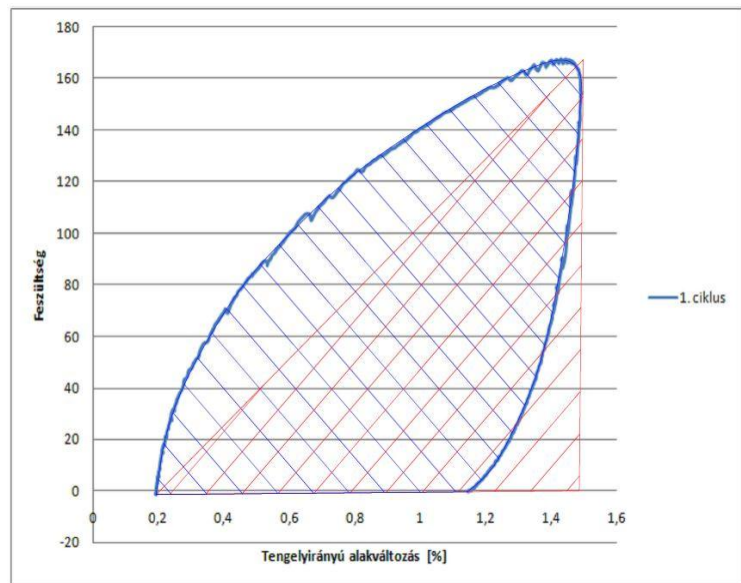


54. ábra: A disszipált és a potenciális energia aránya egy ciklus alatt

A numerikus integrálás eredményeit minden minta esetében 5 hiszterézis hurkon szűrőpróbaszerűen ellenőriztem AutoCAD segítségével. Az Excelben kirajzolt hurkokat

AutoCADbe illesztettem, és vonallánccal körberajzoltam. A megfelelő pontokra pedig háromszöget illesztettem. A kapott alakzatok területeit a csillapítás képletébe helyettesítve az eredményt összehasonlítottam a numerikus integrálással meghatározott értékekkel. Egyetlen esetben sem tapasztaltam lényeges eltérést a két érték között. A folyamatot az 55. ábra szemlélteti.

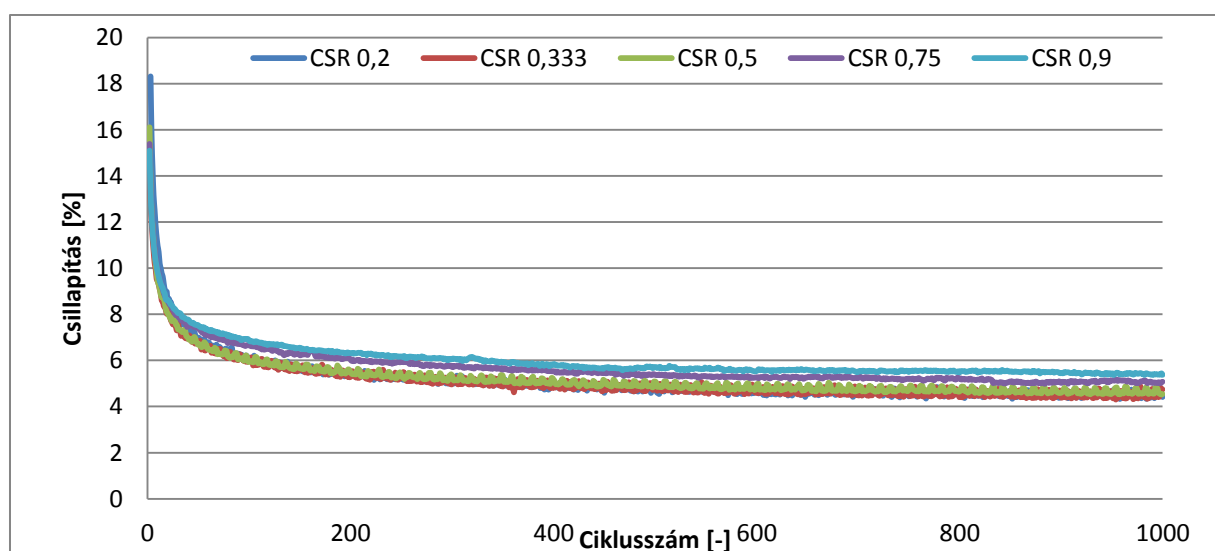
55. ábra: Csillapítás ellenőrzése
AutoCADben



Az előzőekhez hasonlóan a csillapítást is megvizsgáltam telítettségi-konzolidációs, valamint CSR szerinti csoportosításokban egyaránt.

A telítetlen-konzolidálatlan minták csillapításának alakulását a ciklusszám függvényében mutatja az 56. ábra. Látható, hogy a csillapítás esetében a tendencia ugyanaz, mint ami a rugalmassági modulusnál megfigyelhető volt, vagyis a nagyobb CSR mellett nagyobb lesz a csillapítás. Ugyanakkor a rugalmassági modulussal ellentétben a csillapítás a terhelés során csökken, a terhelés végére a görbe ellaposodik, a csillapítás értéke egy adott értékhez tart.

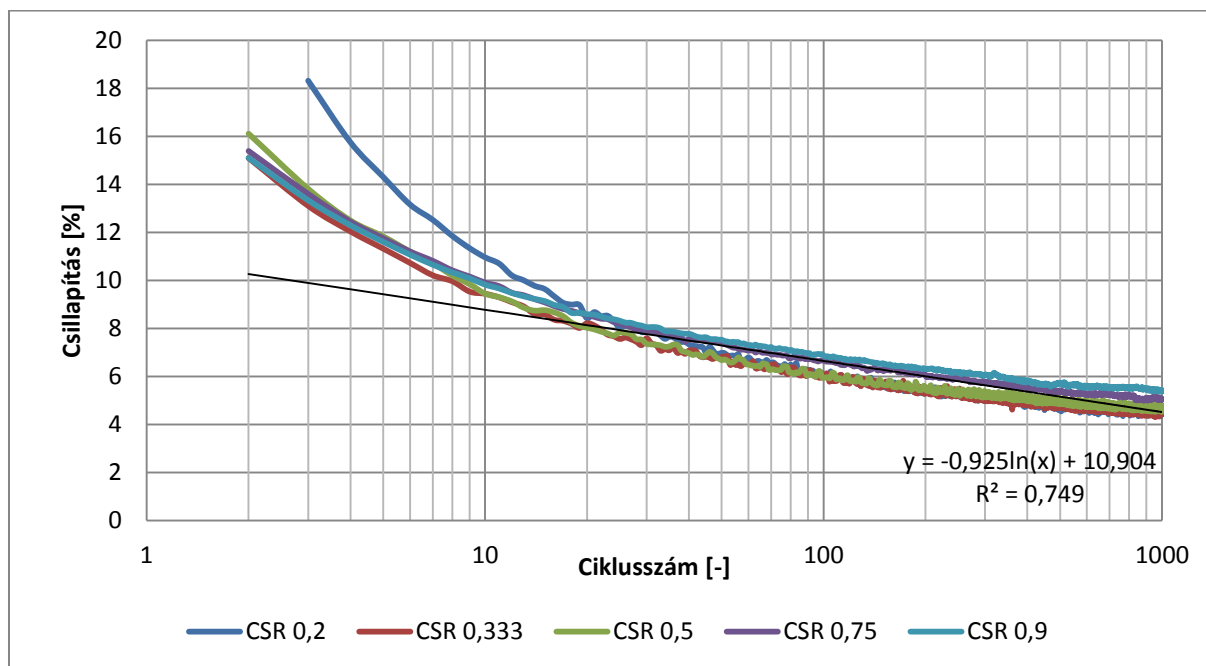
Az eredmények alapján megállapítható, hogy kisebb rugalmassági modulus esetén a talaj csillapítása is kisebb lesz.



56. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták csillapításának alakulása a ciklusszám függvényében



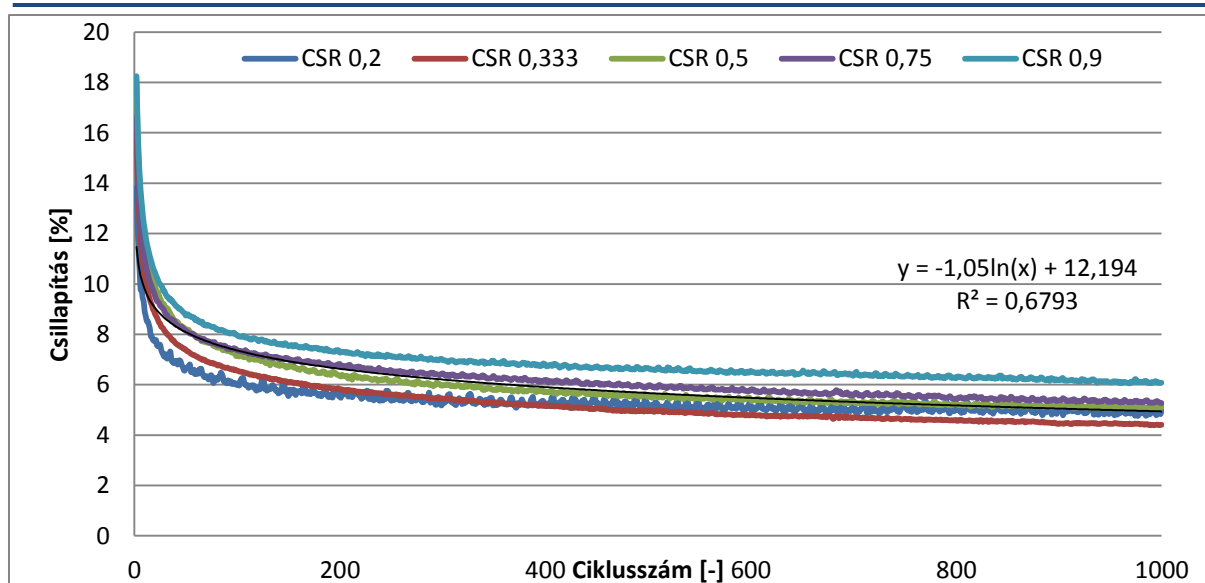
Mivel az értékek egy rendkívül szűk sávon belül mozogtak, (a végértékek közti maximális különbség 1% volt) a görbéket megpróbáltam egy logaritmikus függvénnyel helyettesíteni, amelynek segítségével becsülhető lenne a talaj csillapításának nagysága. A folyamatot szemlélteti az 57. ábra, amely a csillapítást a ciklusszám függvényében mutatja, a ciklusszámot logaritmikus léptékben ábrázolva. A szemi logaritmikus léptéknek köszönhetően a logaritmikus regresszió egyenesként jelenik meg. Látható, hogy körülbelül a 10. ciklus után az egyes görbék nagyon jól közelítik az illesztett függvényt.



57. ábra: Telítetlen-konszolidálatlan minták csillapítására illeszthető logaritmikus regresszió

A telítetlen-konszolidált minták grafikonja az 58. ábrán látható. Az eredmények hasonló tendenciát mutatnak, mint a telítetlen-konszolidált esetben, vagyis a CSR emelkedésével nő a csillapítás értéke, és a csillapítás a ciklusszám növekedésével csökken. Kivételt képez a 0,333-as CSR-rel terhelt minta, amelynek csillapítása a terhelés végére annyira lecsökkent, hogy a 0,2-es CSR mellett terhelt minta csillapítását is alulmúlta. Az eltérés oka valószínűsíthetően az, hogy ennek a mintának jóval nagyobb volt a tömörsége és a telítettsége, mint amivel vizsgálati kör többi mintája rendelkezett.

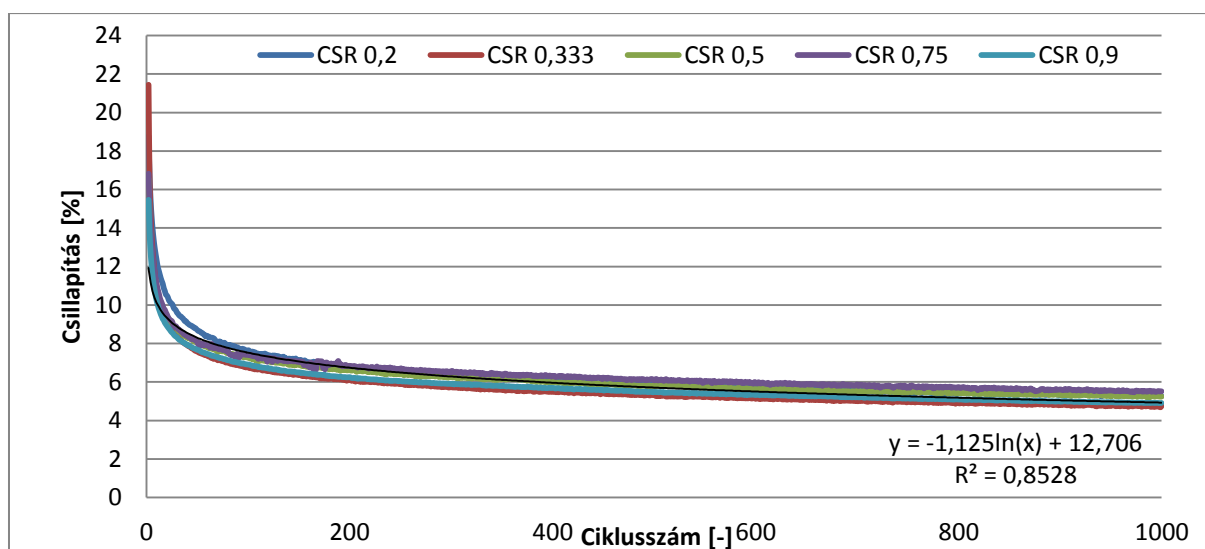
Mivel az eredmények ebben az esetben is egy igen keskeny sávra korlátozódtak, ezekre a görbékre is illesztettem egy logaritmikus függvényt, amely gyakorlatilag lehetővé teszi a telítetlen-konszolidált talaj csillapításának becslését. A regresszió illesztés eredményét szintén az 58. ábra mutatja.



58. ábra: Telítetlen-konszolidált minták csillapításának alakulás a ciklusszám függvényében és a görbékre illeszthető regresszió

A telített-konszolidált minták csillapítási görbéit szemlélteti az 59. ábra. Ezek az eredmények mutatnak legkevésbé bármilyen tendenciát, azonban az egyes görbék közti eltérés annyira kicsi, hogy amennyiben látszódná is egy egységesnek mondható trend az eredményekben, annak megbízhatósága erősen megkérdőjelezhető lenne. Az egyes minták 1000. ciklushoz tartozó csillapításai közti maximális különbség mindössze 0,6% volt.

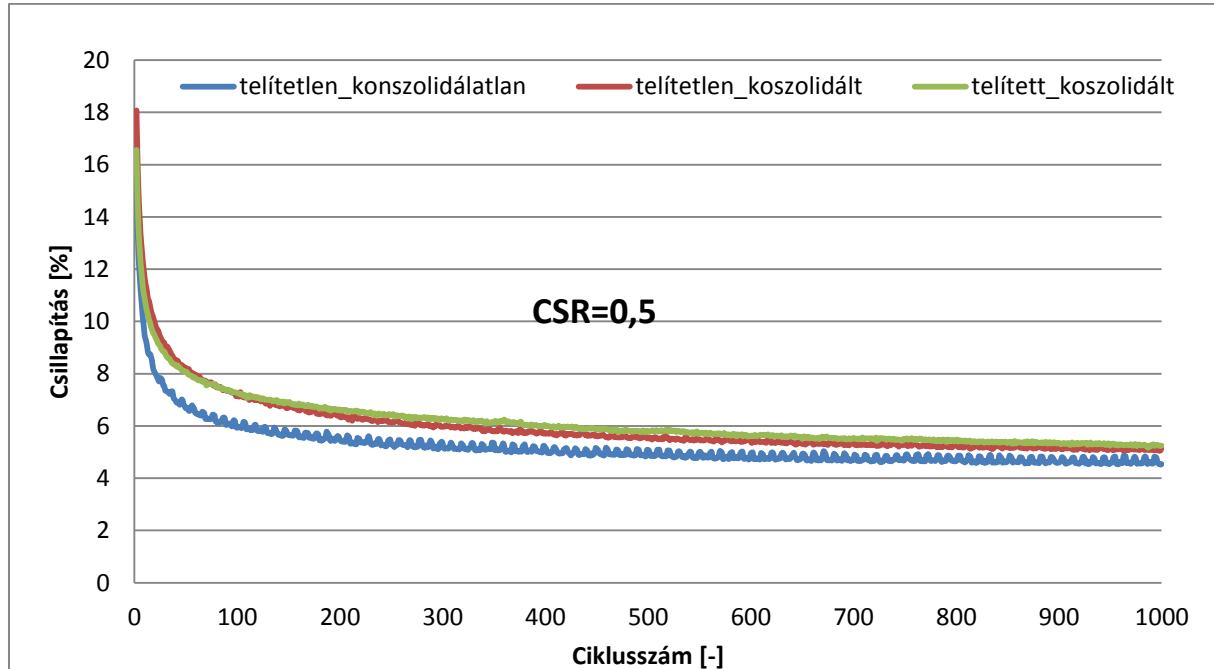
Ez az elhanyagolható különbség azonban lehetővé tette egy jó egyezésű regresszió illesztését (59. ábra).



59. ábra: Telített-konszolidált minták csillapításának alakulás a ciklusszám függvényében és a görbékre illeszthető regresszió

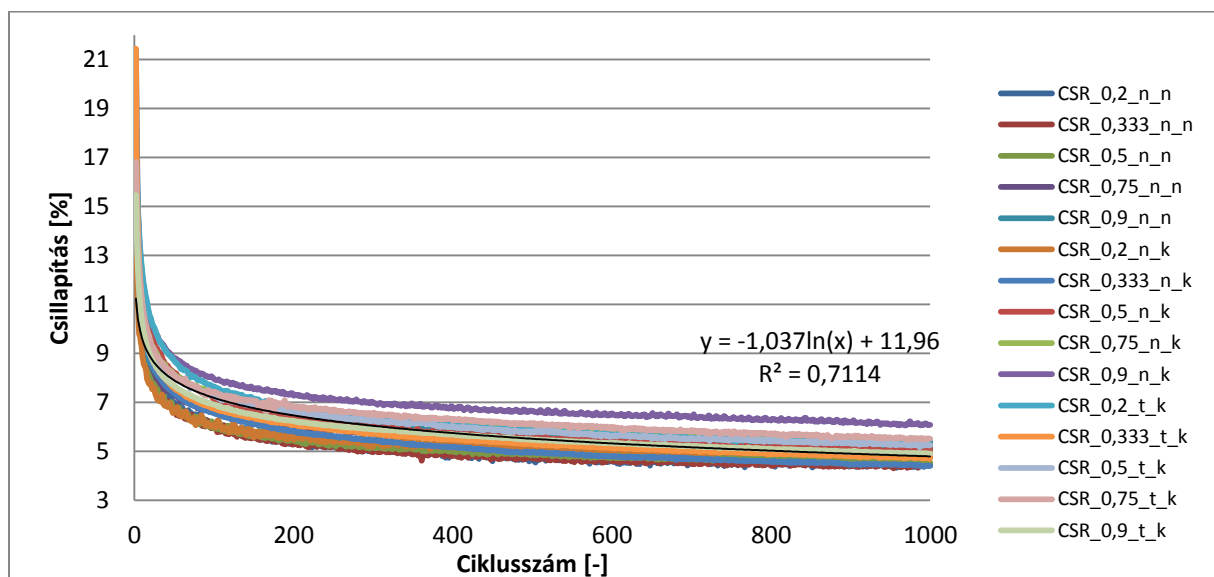


A csillapítás CSR szerinti vizsgálatokor minden esetben azt tapasztaltam, hogy a telített-konszolidált minták csillapítása volt a legnagyobb és a telítetlen-konszolidáltaké pedig a legkisebb. A 0,5-ös feszültségarányal terhelt minták csillapításának alakulását a ciklusszám függvényében mutatja a 60. ábra.



60. ábra: 0,5-ös CSR mellett terhelt minták csillapítása ciklusszám függvényében

Mivel az összes grafikon egy nagyon szűk tartományt fed le, ezért a csillapítás értéke általánosan tekintve (vagyis mind a telítettségtől, vagy a konszolidáltságtól, mind pedig a pulzáló feszültség arányától függetlenül) is jól közelíthető egyetlen logaritmikus függvényvel. Az összes mérési eredményt és az illesztett függvényt szemlélteti a 61. ábra.



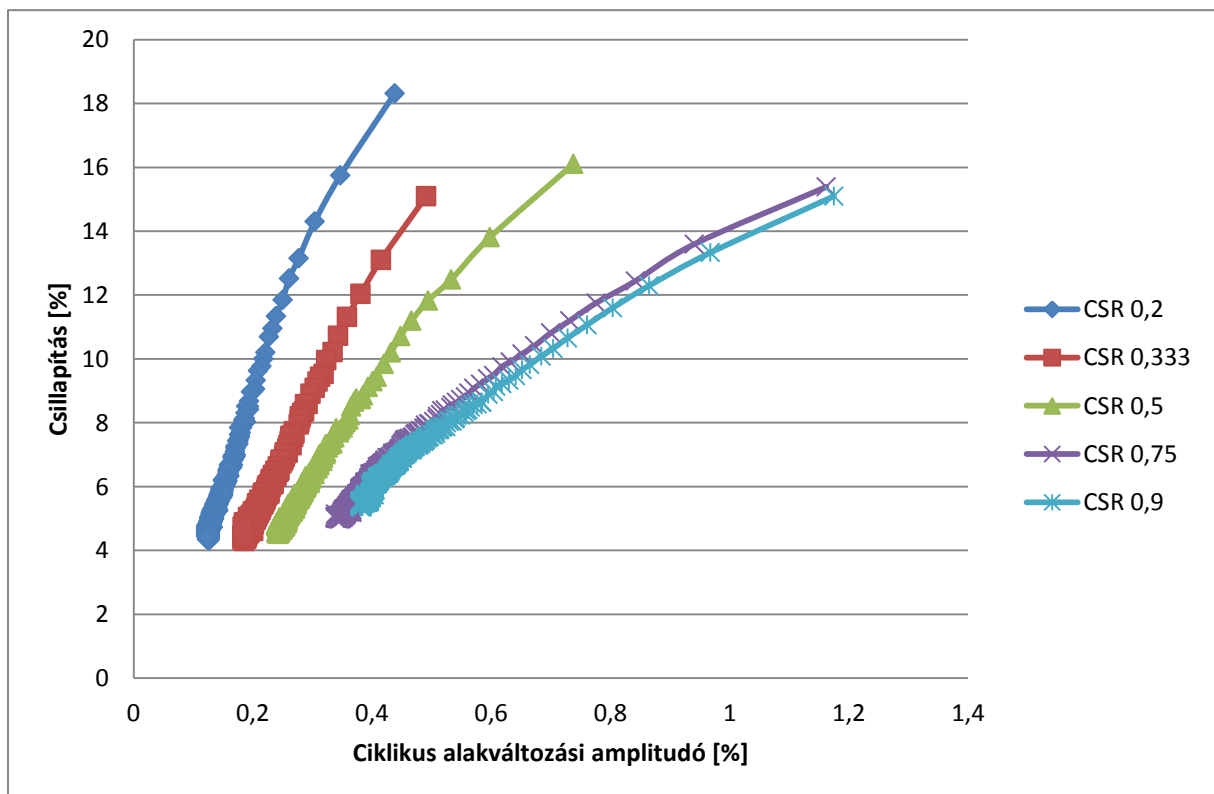
61. ábra: Az összes minta csillapítása a ciklusszám függvényében és a görbékre illeszthető logaritmikus regresszió



A csillapítás változását nemcsak a ciklusszám, hanem a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében is megvizsgáltam. Az eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- Adott CSR esetén a csillapítás nő a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a csillapítás csökken a pulzáló feszültségarány emelkedésével.

A 62. ábra a telítetlen-konzolidálatlan minták eredményeit szemlélteti, azonban mindhárom telítettségi-konzolidáltsági vizsgálati csoport esetében a fenti következtetésekre jutottam.

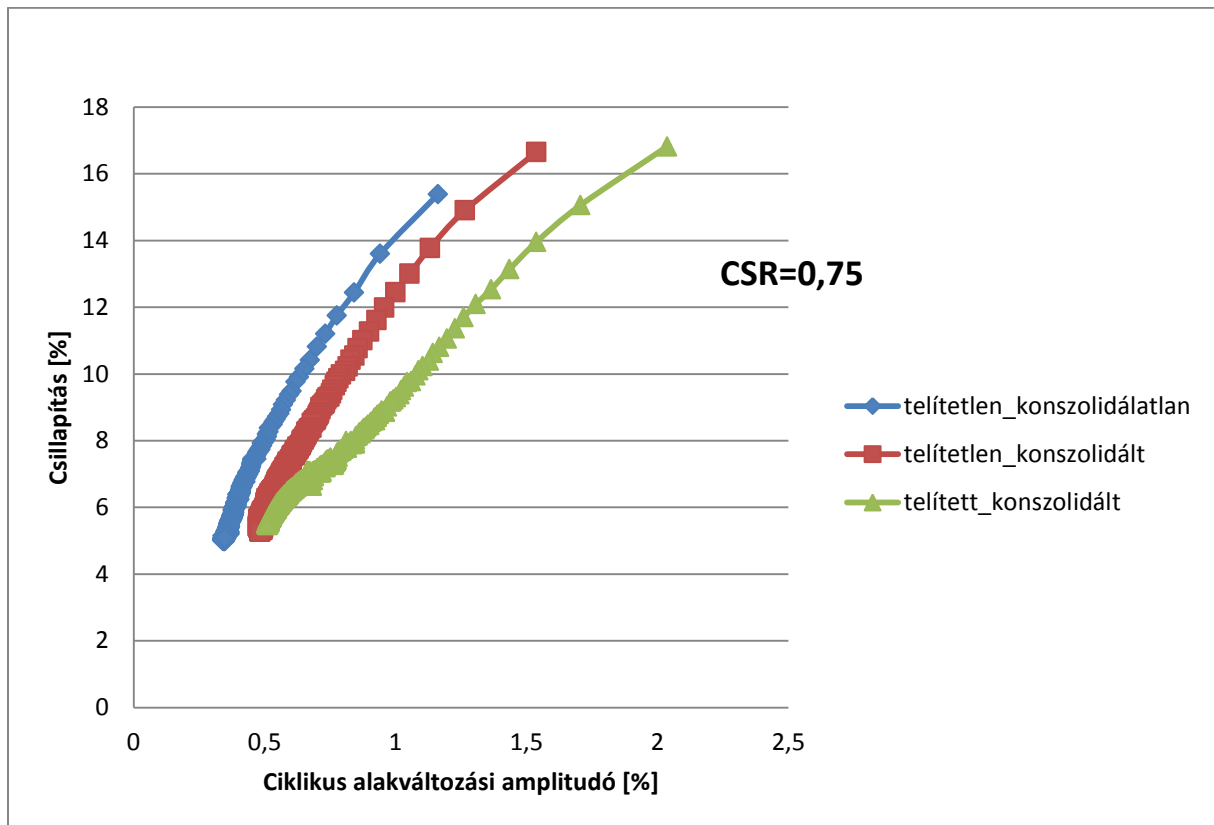


62. ábra: Telítetlen-konzolidálatlan minták csillapításának változása a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében

A pulzáló feszültségarányok szerinti csoportosítás eredményeit mutatja a 63. ábra. Az ábra a 0,75-ös CSR arány mellett terhelt minták eredményit tartalmazza, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a CSR nagyságától függetlenül a 63. ábrával analóg görbéket kaptam. Az eredmények alapján a következő megállapításokat tettem:

- Egy adott terhelés során a csillapítás nő a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó mellett a csillapítás csökken a konszolidáció hatására.

- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a csillapítás csökken a telítés hatására.



63. ábra: 0,75-ös pulzáló feszültségarány mellett terhelt minták csillapításának változása a ciklikus alakváltozási amplitúdó függvényében

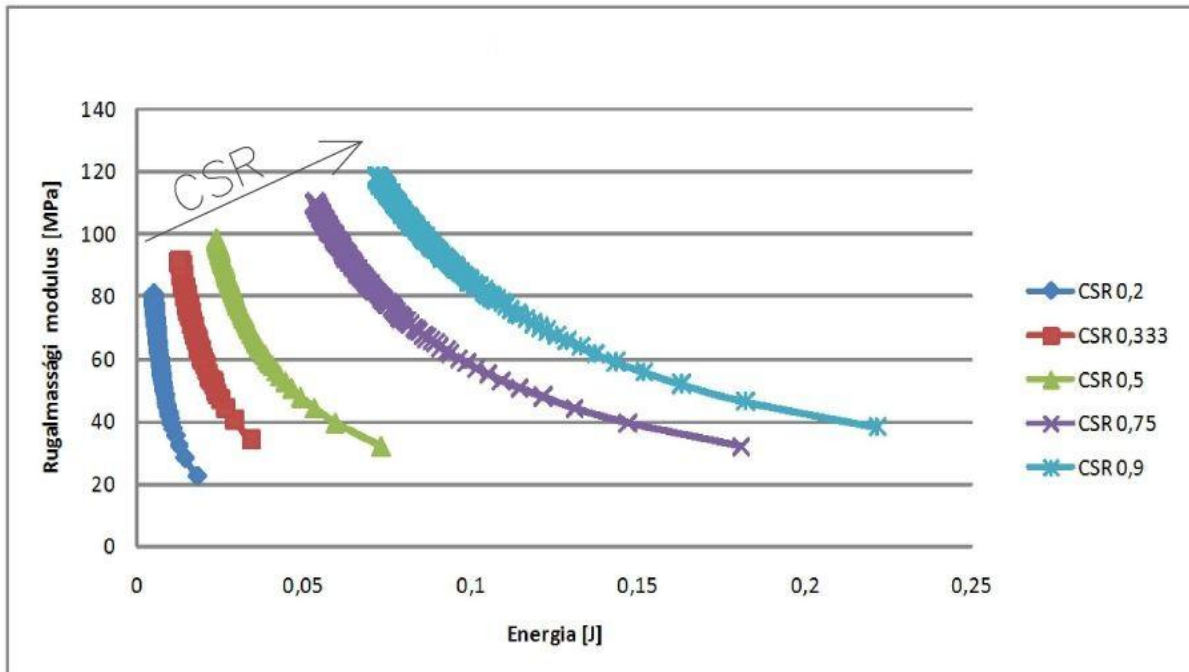
5.5. Potenciális- és disszipált energia összefüggései

Megvizsgáltam a ciklusonként a mintával közölt potenciális energia és a rugalmassági modulus kapcsolatát, és az eredmények alapján az alábbi következtetéseket vontam le:

- Adott CSR esetén a potenciális energia növekedésével a talaj rugalmassági modulusa csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia mellett a talaj rugalmassági modulusa nő a pulzáló feszültségarány növekedésével.
- A CSR emelkedésével nő a potenciális energia változásának mértéke a terhelés során.

Ezek a megállapítások természetesen azokra a mintákra vonatkoznak, amelyeknek a telítettségi és konszolidáltsági paramétereik megegyeznek. Mindhárom telítettségi-konszolidációs vizsgálati kör esetében elvégeztem az energia-rugalmassági modulus összefüggések összehasonlítását, és mindhárom csoport esetén érvényesnek bizonyultak a

fenti következtetések. A 64. ábra a telítetlen-konszolidálatlan vizsgálati kör eredményeit szemlélteti, de a másik két csoport esetében is ezzel majdnem egybevágó grafikonokat kaptam.

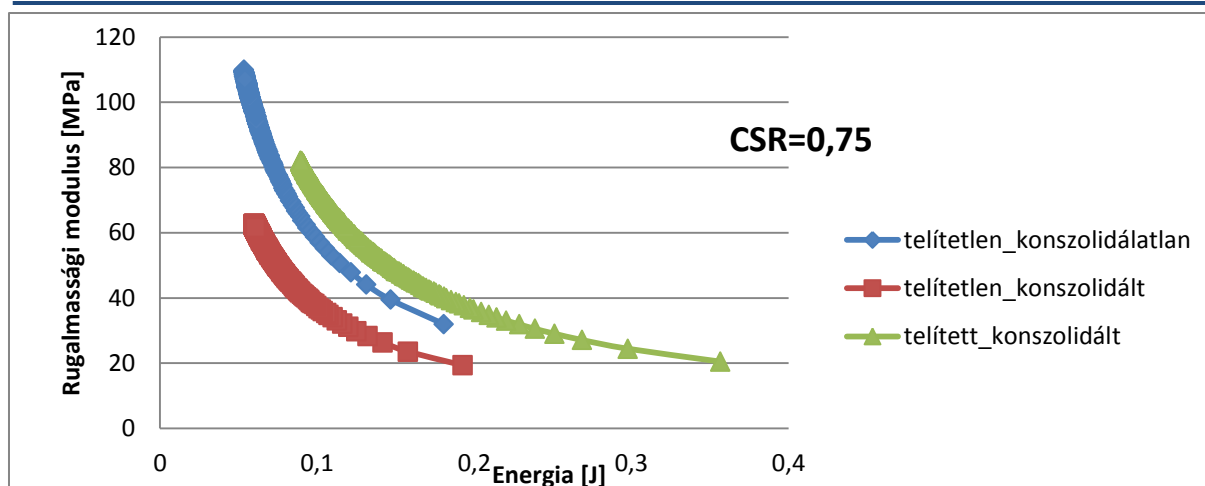


64. ábra: Telítetlen-konszolidálatlan minták rugalmassági modulusa a potenciális energia függvényében

Az energia és rugalmassági modulus közti összefüggéseket vizsgálat alá vettem az azonos nagyságú CSR-rel terhelt, különböző telítettségi-konszolidációs paraméterekkel rendelkező minták esetében is. A pulzáló feszültségarány nagyságától függetlenül az alábbi megállapítások tehetők:

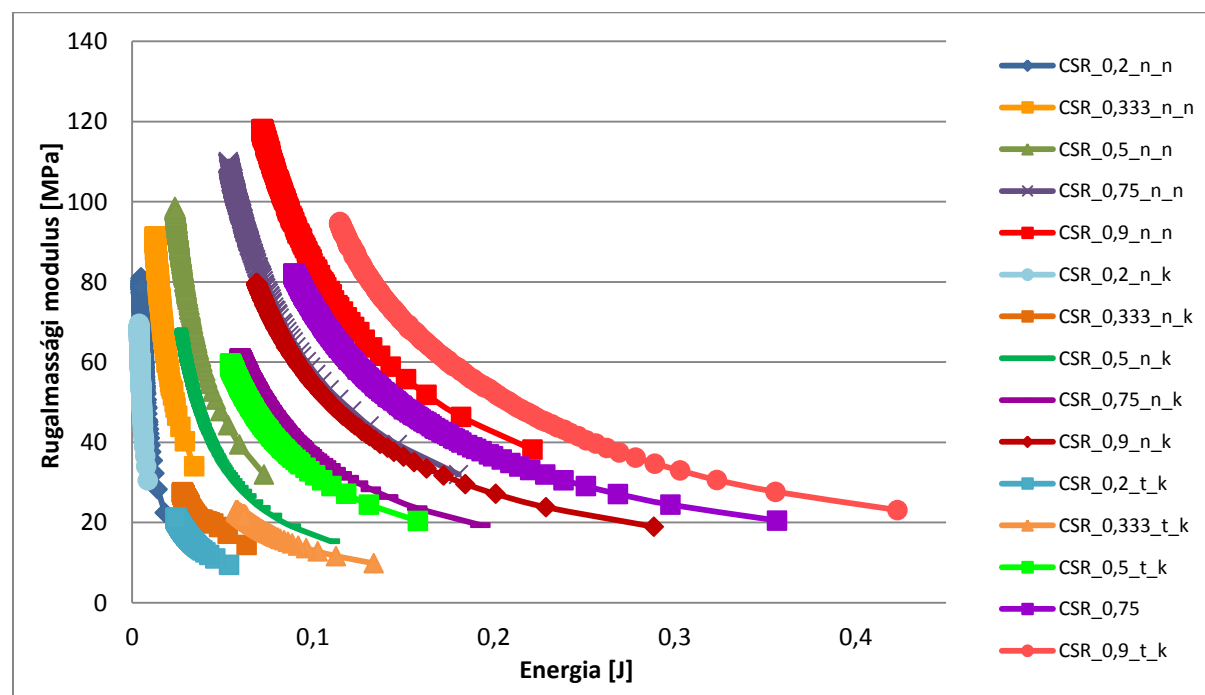
- Adott terhelés hatására a potenciális energia növekedésével a talaj merevsége csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia esetén a konszolidáció hatására a talaj rugalmassági modulusa csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia esetén a talaj rugalmassági modulusa nő a telítés hatására.
- Adott nagyságú potenciális energia mellett a telített-konszolidált talaj rugalmassági modulusa nagyobb lesz, mint a telítetlen-konszolidálatlan esetben.

A 65. ábra a 0,75-ös CSR mellett terhelt minták grafikonjait tartalmazza, de eltérő pulzáló feszültségarány mellett is az alábbi ábrával analóg diagramokat kaptam.



65. ábra: 0,75-ös CSR mellett terhelt minták rugalmassági modulusának változása a potenciális energia függvényében

Mivel mind a telítettségi-konszolidációs csoportok, mind pedig a CSR szerinti bontásban jól megfigyelhetők voltak egységes tendenciák, úgy döntöttem, hogy megvizsgálom az összes minta eredményét egybevetve is. Arra voltam kíváncsi, kimutatható-e valamilyen "szétválasztódás" az összesített eredményekben, vagyis elkülönülnek-e az egyes vizsgálati csoportok a globális rendszeren belül, és ha igen, akkor a telítettségi-konszolidációs vagy a CSR szerinti csoportok jelennek meg az összehasonlítás során. Az összes minta grafikonját a 66. ábra mutatja. Látható, hogy az eredmények gyakorlatilag a CSR-csoportok szerint különülnek el, tehát a CSR emelkedésének hatására bekövetkező változások jelentősebbek, mint amit konszolidáció vagy a telítettség növekedése okoz.



66. ábra: Az összes minta rugalmassági modulusának alakulása a potenciális energia függvényében



6. Összefoglalás

TDK dolgozatom célja az volt, hogy dinamikus triaxiális vizsgálatok segítségével kimutassam a pulzáló feszültségarány, az előterheltség, valamint a telítettség dinamikus talajparaméterekre gyakorolt hatását. Ehhez öt különböző CSR mellett telítetlen-konszolidálatlan, telítetlen-konszolidált valamint telített-konszolidált mintákat vettem alá dinamikus terhelésnek. A vizsgálatokat dunaújvárosi lösz talajon hajtottam végre.

Az alakváltozások vizsgálata során megállapítottam, hogy a ciklusszám emelkedésével az alakváltozás nő, amennyiben a pulzáló feszültségarányt is növekszik. A CSR emelkedésével továbbá nő az alakváltozások sebessége is. Az eredmények értékelésekor arra a következtetésre jutottam, hogy az eltérő tömörségek és telítettségek jelentősen befolyásolják a CSR változásának az alakváltozási paraméterekre gyakorolt hatását, ami a pórusvíznyomás-változás esetében is kimutatható.

Megállapítottam, hogy azonos CSR esetén az alakváltozások nagyobbak lesznek a telítettség emelkedésével. A konszolidált minták esetében is nagyobb alakváltozást tapasztaltam, mint ami konszolidálatlan minták terheléséből adódott. Azonban a tömörség ezen vizsgálatok eredményeit is jelentősen befolyásolta.

A rugalmassági modulus-ciklusszám összefüggés elemzése során azt a következtetést vontam le, hogy a CSR növekedésével a talaj merevsége is nő. Mivel a telítetlen-konszolidálatlan minták eredményei szűk tartományon belül mozogtak, célszerűnek látszott egy olyan összefüggés keresése, amelynek felhasználásával a rugalmassági modulus becsülhető bizonyos paraméterek ismeretében. Ezért előbb a hatékony főfeszültségek gyökével, majd a minták száraz térfogatsűrűségével normáltam az eredményeket. Az így meghatározott grafikonokra logaritmikus regressziót illesztve jó egyezésű függvényt kaptam, amellyel a ciklusszám, a tömörség, valamint a pulzáló feszültségarány ismeretében közelíthető a rugalmassági modulus értéke. Hasonló összefüggéseket kerestem a konszolidált minták esetében is. Azonban a telítetlen-konszolidált minták eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy el kell különíteni a kis- és nagy feszültségtartományon végzett kísérletek eredményeit egy hasonló összefüggés felállításához, illetve a telített minták esetében előnyös lenne egy új paraméter bevezetése, amely valamely módon kifejezi a telítettséget.



Azonos CSR-rel terhelve mindig a telítetlen-konszolidálatlan talaj viselkedett merevebben, kisebb pulzáló feszültségarány esetében a telítetlen-konszolidált, magasabb CSR mellett a telített-konszolidált minták rugalmassági modulusa lesz a nagyobb.

Az összes minta eredményeit egybevetve azt tapasztaltam, hogy a konszolidáció jóval nagyobb hatást gyakorol a rugalmassági modulus alakulására, mint a telítettség.

A rugalmassági modulus és a ciklikus alakváltozási amplitúdó kapcsolatának vizsgálata során az alábbi következtetésekre jutottam:

- Adott CSR esetén a rugalmassági modulus csökken a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó mellett a rugalmassági modulus nő a pulzáló feszültségarány emelkedésével.
- Adott rugalmassági modulus mellett a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekszik a pulzáló feszültségarány növekedésével.

Azonos CSR mellett terhelt minták eredményei alapján a következő megállapításokat tettem:

- Adott terhelés alatt a rugalmassági modulus csökken a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a talaj rugalmassági modulusa nő a telítés hatására.
- Adott rugalmassági modulus esetén a ciklikus alakváltozási amplitúdó csökken a konszolidáció hatására.
- Adott rugalmassági modulus esetén a ciklikus alakváltozási amplitúdó nő a telítés hatására.

Valamennyi minta eredményeinek egybevetése alapján azt a következtetést vontam le, hogy a rugalmassági modulus – ciklikus alakváltozási amplitúdó összefüggésekre a pulzáló feszültségarány jelentősebb hatást gyakorol, mint a konszolidáció vagy a telítettség változása.

A csillapítást illetően arra a megállapításra jutottam, hogy a CSR emelkedésével a csillapítás növekszik, azonban a ciklusszám emelkedésével fokozatosan csökken. A csillapítás becslésére alkalmas függvényeket is kerestem, az egyes vizsgálati körök görbéire illesztett jó egyezésű logaritmikus regressziók segítségével. Azonos CSR mellett terhelt minták eredményeiből kimutatható, hogy a konszolidáció és a telítés növeli a csillapítás nagyságát.



A csillapítás-ciklikus alakváltozási amplitúdó összefüggéseket vizsgálva az alábbi megállapításokat tettem:

- Adott CSR esetén a csillapítás nő a ciklikus alakváltozási amplitúdó növekedésével.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a csillapítás csökken a pulzáló feszültségarány emelkedésével.

Azonos CSR esetében az alábbi állítások bizonyultak érvényesnek:

- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó mellett a csillapítás csökken a konszolidáció hatására.
- Adott ciklikus alakváltozási amplitúdó esetén a csillapítás csökken a telítés hatására.

A mintákkal közölt potenciális energia és a rugalmassági modulus között fennálló összefüggések vizsgálata alapján jutottam az alábbi következtetésekre:

- Adott CSR esetén a potenciális energia növekedésével a talaj rugalmassági modulusa csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia mellett a talaj rugalmassági modulusa nő a pulzáló feszültségarány növekedésével.
- A CSR emelkedésével nő a potenciális energia változásának mértéke a terhelés során.

Azonos pulzáló feszültségarány mellett terhelt minták eredményei vezettek a következő megállapításokhoz:

- Adott terhelés hatására a potenciális energia növekedésével a talaj merevsége csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia esetén a konszolidáció hatására a talaj rugalmassági modulusa csökken.
- Adott nagyságú potenciális energia esetén a talaj rugalmassági modulusa nő a telítés hatására.
- Adott nagyságú potenciális energia mellett a telített-konszolidált talaj rugalmassági modulusa nagyobb lesz, mint a telítetlen-konszolidálatlan esetben.

Akárcsak a rugalmassági modulus- ciklikus alakváltozási amplitúdó összefüggések esetében, itt is igaz az a megállapítás, hogy a CSR emelkedése jelentősebben befolyásolja a bekövetkező változásokat, mint a konszolidáció vagy a telítettség növekedése.

További megállapítás, hogy a telítéssel kapott eredmények nem annyira megbízhatóak, mert nem sikerült tökéletesen azonos kiindulási feltételeket biztosítani, így magyarázható a kapott eredmények közötti szórás. A pontosabb eredmények érdekében célszerű lenne a



vizsgálatokat megismételni szakszerű és szinte tökéletes telítéssel, valamint a telítési nehézségek okaira fényt deríteni.

Az eredmények alapján levonható az a következtetés, hogy a hatékony főfeszültség jelentős hatást gyakorol az alakváltozási tulajdonságokra. A hatékony főfeszültséget a függőleges feszültség, illetve az oldalirányú megtámasztás értékéből számítjuk. Felmerül a kérdés, hogy azonos függőleges feszültség mellett, az oldalirányú megtámasztás változtatásával végzett vizsgálatok esetén ugyanazok lesznek az eredmények? Ezen kérdés megválaszolására célszerű lenne további vizsgálatokat végrehajtani.



7. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Vámos Máténak az izgalmas és érdekes témafelvetésért, valamint hasznos tanácsaiért, meglátásaiért, amelyekkel végigkísérte munkámat a laborvizsgálatoktól egészen a dolgozat elkészüléséig. Köszönet illeti továbbá Némethy Ferencet, aki segítségével és hasznos gyakorlati tanácsaival hozzájárult, hogy laboratóriumi vizsgálatokat végre tudjam hajtani.



8. Irodalomjegyzék

DAS, Braja. M. és RAMANA, G. V. (2011): „*Principles of soil dynamics*”, 2. kiadás, Cengage Learning, Stamford

KRAMER, S.L. (1996): „*Geotechnical Earthquake Engineering*”, Prentice-Hall, New Jersey

LIN, G., JUN, W., YUANQIANG, C., HANLONG, L., YUFENG, G., HONGLEI, S. (2013): „Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 28-37.

MOSES, G. G., RAO, S. N., RAO, P.N. (2003): „*Undrained strength behavior of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading*” *Ocean Engineering*, Vol. 30, p. 1765–1789.

PRAKASH, S. (1981): „*Soil Dynamics*”, McGraw-Hill Book Company, New York

SILVER, M. L., és SEED, H. B (1971): “*Deformation Characteristics of Sands under Cyclic Loading*,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM8, pp. 1081–1098

SZILVÁGYI, Zs., (2013): „*Dinamikus talajparaméterek meghatározása*”, 3. Kézdi Konferencia, szerk. NAGY, László, TAKÁCS, Attila, Budapesti Műszaki Egyetem, Geotechnikai Tanszék

VÁMOS, M. (2013a): „*Forgalom dinamikus hatása a töltéstartételek alakváltozási tulajdonságaira*”, TDK dolgozat, Geotechnika szekció, Budapest

VÁMOS, M. (2013b): „*Talajok dinamikus terhelésből adódó alakváltozási tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálata, Diplomamunka, BME Geotechnika Tanszék, Budapest*

VÁMOS, M. és SZENDEFY, J. (2014a): „*Kövérszilikumok dinamikus alakváltozási tulajdonságainak meghatározása*”, Konferencia kiadvány, XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, 2014 p. 325-328

VÁMOS, M és 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, p. 11-14

VÁMOS, M és SZENDEFY, J (2014c): „*Kövérszilikumok dinamikus alakváltozási tulajdonságait befolyásoló tényezők*”, Konferencia kiadvány, Geotechnika 2014. Konferencia, Ráckeve, p. 1-15