

Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke

Back Márta, Szendefy János

BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

e-mail: marta.back92@gmail.com; szendefy.janos@epito.bme.hu

Kivonat Hazánkban a földművek teherbírását jelenleg is statikus teherbírasi mérőszámokkal jellemzik. Azonban célszerű lenne áttérni a forgalmi terhelést jobban modellező dinamikus terhelésből számítható teherbírás modulusra, a reziliens modulusra. A cikk bemutatja a reziliens modulus mérésének menetét, valamint az első hazai mérési eredményeket, amelyek stabilizált talajokkal készültek. Mindezek mellett összehasonlítja a közvetlen méréssel kapott eredményeket a CBR-ből számítottakkal.

Kulcsszavak reziliens modulus, földművek teherbírása, stabilizált talaj, CBR

Measurement and measured values of the resilient modulus at soil stabilizations

Abstract The bearing capacity of the earthwork is defined with static bearing capacity parameters in Hungary now. However, it would be suggested to use dynamic modulus, called resilient modulus, which describes better the traffic load. The paper introduces the way of the laboratory measuring of the resilient modulus via the first domestic test results made with stabilized soils. In addition, it compares the results of dynamic triaxial test with the calculated based on CBR results.

Keywords resilient modulus, bearing capacity of earthwork, stabilized soils, CBR

Back Márta

Építőmérnök, MSc hallgató, BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Dr. Szendefy János

Okl. építőmérnök, PhD, egyetemi adjunktus, BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Bevezetés

Hazánkban jelenleg a típuspályaszerkezetek használatával történik az útpályaszerkezet méretezése. A módszer hátránya, hogy alkalmazásával egy magasabb teherbírású földmű előnye nem érvényesül, ami lehetővé tenné a pályaszerkezetek vastagságának hatékony csökkentését. Ennek lehetővé tétele érdekében egy alternatív pályaszerkezet méretezési eljárást dolgoztak ki (Pethő, Primusz, Tóth, 2016), amely már számolni tud a korábban elvárt földműteherbírástól magasabb értékekkel is. Az alternatív pályaszerkezet méretezéséhez alkalmazott összefüggések a földmű dinamikus, forgalmi terheléshez hasonló terhelésből számítható rugal-

massági modulusát, az úgynevezett reziliens modulus (M_R) értékét használják.

A reziliens modulus (M_R) az útpályaszerkezetek alsó rétegeként definiált földműréteg dinamikus terhelésnél figyelembe vehető rugalmassági modulusa. A földmű M_R értéke, mint bemenő paraméter szolgál az útpályaszerkezetek méretezésénél, értéke nagy hatással van a pályaszerkezet alap és burkolati rétegeinek vastagságára és élettartamára.

Az M_R közvetlenül meghatározható dinamikus triaxiális berendezés segítségével, azonban ilyen vizsgálat hazánkban korábban még nem készült. A dinamikus triaxiális vizsgálatok mellett az M_R meghatározására a szakirodalom a CBR teherbírás vizsgálatot javasolja, amely laboratóriumban egy-

szzerűbb eszközökkel is végrehajtható, és aminek eredményéből különböző összefüggésekkel származtathatók az értékek. Ezen összefüggések segítségével laboratóriumi vagy helyszíni CBR teherbírási mérés alapján is számíthatóvá válik a reziliens modulus értéke, vagyis kiváltható a speciális berendezést igénylő és költséges dinamikus triaxiális vizsgálat. Jelentős hátrányuk, hogy egy-egy összefüggést adott területen található talajok eredményei alapján állították fel, ezért értéktartományokhoz, talajtípusokhoz ajánlottak, így a belőlük származó értékekben jelentős szórás és bizonytalanság adódik.

Kutatásunk során a reziliens modulus mérési lehetőségét vizsgáltuk, abból a célból, hogy ennek az új paraméternek a közvetlen módszerrel történő meghatározására hazai mérések is készüljenek. Vizsgálataink során jellemző hazai talajok kötőanyag stabilizálásával készített mintákat alkalmaztunk, mivel az útépitésben a teherbírási javítása érdekében beépített durva szemcsés anyagú rétegek sikeresen kiválthatók a helyi talajok kötőanyag stabilizálásával is.

Szakirodalmi adatok az M_R értékére

Külföldi kutatások már vizsgálták a különböző talajok M_R értékeit, illetve ezek változását eltérő kötőanyagokkal készült stabilizációk hatására. Az általunk fellelt adatok alapján természetes állapotú talajok esetében az M_R értéke jellemzően 10–100 MPa között változik, az optimális víztartalomnál szárazabb minták általában magasabb, a kissé nedvesebb minták alacsonyabb reziliens modulussal rendelkeznek. A természetes állapotú talajok között a Közép-Amerikában és Afrikában sok helyen előforduló laterites talaj kiugró, 70–600 MPa nagyságú reziliens modulus értékkel jellemezhető, ami csaknem egy nagyságrenddel nagyobb a többi talajtípushoz képest. Az általunk fellelt szakirodalmi adatok az 1. táblázatban láthatók.

A 2. táblázat a stabilizált talajok szakirodalomban fellelhető reziliens modulus értékeit tartalmazza a talaj típusának és a stabilizációhoz alkalmazott kötőanyag és adagolás megnevezésével. Látható, hogy a szakirodalomban talált stabilizált talajokat $M_R = 40\text{--}140$ MPa értékkel lehetne jellemezni. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyakorlatban használt kötőanyag mennyiség (3–6%) az M_R értékét nem növeli jelentősen, azonban a nedvességgel szemben kevésbé lesz érzékeny a talaj, azaz viszonylag magas M_R értékkel lehet számolni a stabilizált rétegek tartóssága miatt a földmű élettartama alatt. A stabilizált laterit talajokra talált szakirodalmi értékek egy nagyságrenddel magasabbat mutatnak, így hasonló különbség adódott, mint a stabilizálatlan talajok esetében. Azonban a stabilizált

1. táblázat. Szakirodalmi adatok a talajok M_R értékére

Publikáció	Talaj típusa	Reziliens modulus [MPa]
Drumm et al.	sovány agyag (CL)	34–103
	iszapos homok (SM)	72–83
	sovány iszap (ML)	14–124
	kövér iszap (MH)	45–117
Mohammad et al.	kötött (A-4, A-6, A-7-5, A-7-6)	8–87
Akoto	laterit	350–500
Achampong et al.	sovány agyag (CL)	14–66
	kövér agyag (CH)	10–61
Kung et al.	laterit (CL, A-7-6)	110–250
	porított iszapkő (CL, A-6)	40–440
Qiu et al.	kötött	10–129
Li és Qubain	sovány agyag (CL)	38–111
	agyagos homok (SC)	50–125
	agyagos kavics (GC)	53–104
	homokos sovány agyag	58–137
	homokos sovány agyag kavicssal	55–90
	agyagos homok kavicssal	41–132
Bandara et al.	homok, iszapos homok	60–97
Trindade et al.	latosol	70–500
	szaprolit	60–200

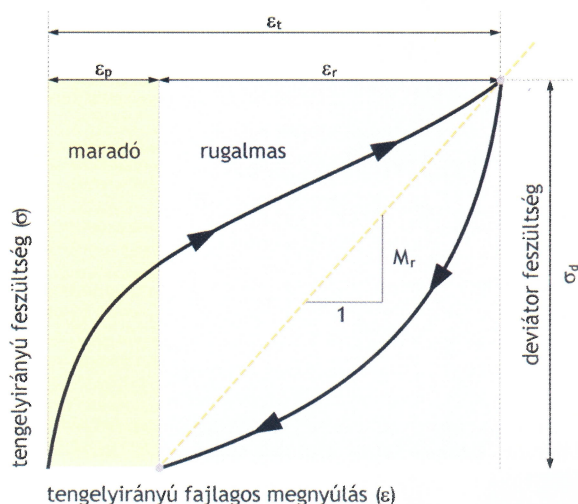
2. táblázat. Szakirodalmi adatok a stabilizált talajok M_R értékére

Publikáció	Talaj típusa	Stabilizáció	Reziliens modulus [MPa]
Akoto	laterit	10% mész	3000–12000
Achampong et al.	sovány agyag (CL)	2% mész	40–86
		4% mész	47–103
		6% mész	50–115
		4% cement	42–121
		8% cement	48–139
	kövér agyag (CH)	2% mész	34–79
		4% mész	47–96
		6% mész	50–111
		4% cement	35–80
		8% cement	50–132
Trindade et al.	latosol	11% cement	2500–6000
	szaprolit	5% cement	1000–3000

laterit talajok M_R értékeinek értékelése során azt is figyelembe kell venni, hogy a stabilizáláshoz az általánosan több kötőanyag-mennyiséget használtak, ami természetesen nagyobb teherbírást is szolgáltat.

A reziliens modulus mérésének bemutatása

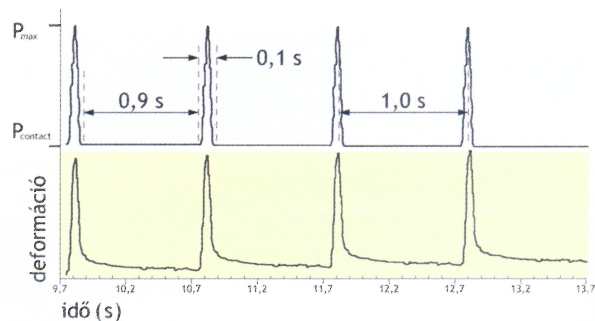
Általános definícióját tekintve a reziliens modulus a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás aránya. Alapvetően a merevséget jellemzi, nem pedig az anyag szilárdságát. Értéke függ az oldalirányú nyomás nagyságától is, ezért többféle terhelés és oldalnyomás kombinációja mellett is meghatározható. A reziliens modulus többnyire olyan terhelési körülmények között jellemzi a talajt, amely nem eredményezi a pályaszerkezet tönkremenetelét.



1. ábra. A reziliens modulus értelmezése

A jelen cikkben tárgyalt kutatás elsődleges célja a kötőanyagokkal stabilizált talajok M_R értékének közvetlen módszerrel, azaz dinamikus triaxiális vizsgálattal történő meghatározása volt. A dinamikus kísérletekkel párhuzamosan CBR-vizsgálatok is készültek azonos módon előállított próbatesteken annak érdekében, hogy a szakirodalomban található CBR-vizsgálatokra vonatkozó összefüggéseket is össze lehessen hasonlítani a dinamikus vizsgálatok eredményeiből kapott M_R értékekkel. Ezen vizsgálatokon kívül a kutatás további célkitűzése volt az M_R értékének elnedvesedés hatására bekövetkező változásának vizsgálata stabilizált talajok esetében. Ehhez a vizsgálathoz az elkészített próbatestek egy részét 28 napos kötési időt követően, míg a másik részét további 4 nap víz alatt tárolás után vetették alá dinamikus terhelésnek.

A laboratóriumi vizsgálati programot az AASHTO T-307 amerikai előírás alapján végeztük el. Ennek keretében különböző deviátor feszültségek alkalmazása mellett összesen 150 db dinamikus triaxiális vizsgálat készült, amelyek során előre megadott nagyságú tengelyirányú ciklikus terhelés került a mintákra. Egy terhelési ciklus minden esetben 1 másodperc hosszúságú volt, ez alatt a 0,1 másodpercig tartó terhelési fázist 0,9 másodperces nyugalmi periódus követte (lásd 2. ábra). Az egyes minták elsőként 1000 cikluson keresztül 27,6 kPa cellanyomás és 27,6 kPa deviátor feszültség mellett, ún. kondicionáló terhelést kaptak, aminek célja, hogy megszüntesse a tömörödés és a terhelés közti időszak hatását, illetve a kezdeti terhelést az újrateherelés ellenében. Ezen kívül minimalizálja a minta végei, illetve a terhelőfej és az alapzat között esetlegesen fennálló nem megfelelő érintkezés hatását. A kondicionáló terhelés után a 27,6 kPa cellanyomást fenntartva 5 különböző, fokozatosan emelkedő deviátor feszültség alkalmazása mellett, 100–100 cikluson keresztül történt a minták terhelése. A vizsgálat záró fázisaként pedig az utolsó terhelési lépcső 68,9 kPa nagyságú deviátor feszültségének alkalmazásával a minták terhelése további 10 000 cikluson keresztül folytatódott a maradó alakváltozások vizsgálata érdekében.



2. ábra. A ciklikus triaxiális vizsgálat során alkalmazott teher időbeli lefutása

A mérési eredmények bemutatása és értékelése

A vizsgálatokat kötőanyag hozzáadásával stabilizált homok- és löszmintákon hajtottuk végre. A homok talaj stabilizációja cement és ViaCalco 50, a lösz talajok pedig cement, ViaCalco 30 és ViaCalco 50 kötőanyagok felhasználásával történt. A kötőanyagok hozzáadása három különböző adagolással valósult meg, amelyek 40, 75 és 100 kg/m³ voltak. Ahogy a fentiekben már szerepel, a vizsgálat sorozatok normál állapotú, illetve 4 napig víz alatt tárolt próbatesteken is végrehajtásra kerültek.

A reziliens modulus értékei a 100-as ciklusszámú terhelési lépcsők eredményeiből, valamint a 10 000 ciklusszám mellett végzett terhelés első és utolsó 10 ciklusának mérési adatsorából kerültek meghatározásra.

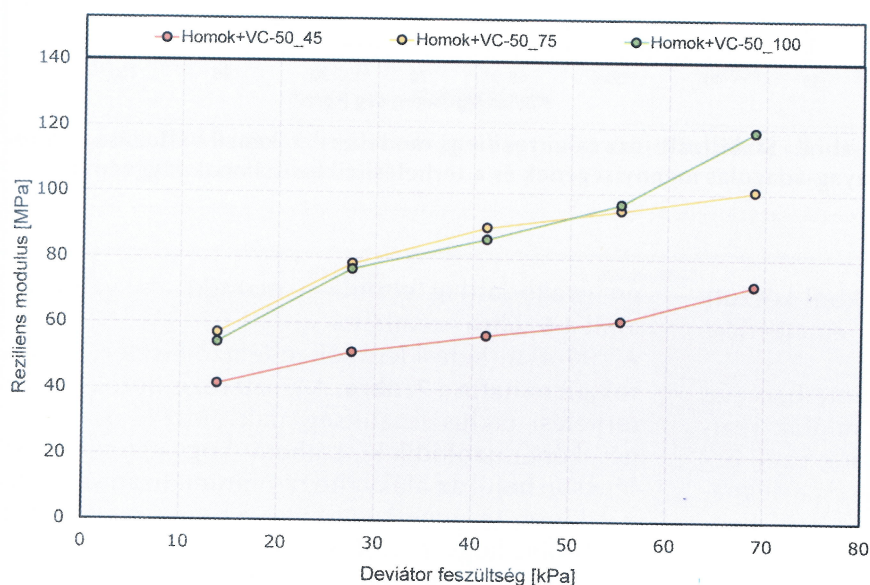
A 100 db ciklusszám mellett végzett terhelések esetében általános tapasztalat volt, hogy a reziliens modulus növekszik a deviátor feszültség emelkedésével, amint azt a 3. ábra is mutatja. Ezt a megfigyelést a normál, nem stabilizált talajokra fellelt szakirodalmi adatok nem támasztják alá, sőt az ellenkezőjéről számolnak be. Az ellentmondásra némi magyarázattal szolgál, hogy az általunk alkal-

mazott deviátor feszültségek a törőfeszültség kb. 10%-áig terjedtek, míg a szakirodalmi hivatkozásokban több helyen a deviátor feszültséget törésközi feszültségig emelték.

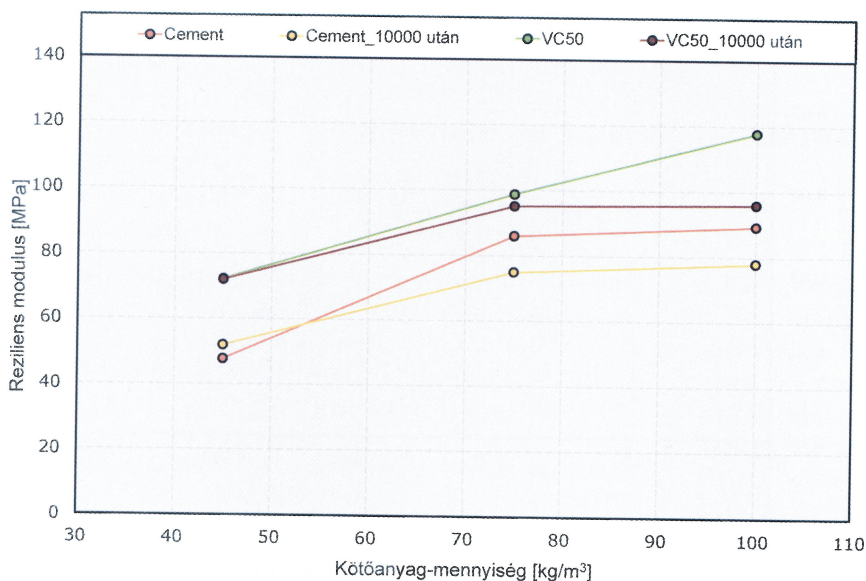
A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható volt továbbá, hogy az M_R értéke a kötőanyag-adagolás növelésével emelkedik. Az emelkedés mértéke nem egyenesen arányos a kötőanyag-adagolással, ahogyan az a korábbi szakirodalmakban (Szendefy, 2009) is szerepel, ami szerint az optimális kötőanyag-mennyiség eléréséig jelentős növekedés következhet be, azonban azt követően már nincs számottevő hatása az adagolás növelésének.

A nem stabilizált talajokból készült minták a víz alá helyezve felpuhulnak és szétesnek, így az áztatás utáni teherbírást nem mérhető. A stabilizált talajminták vízzel szembeni tartósságának vizsgálata céljából a mintákat 4 napon keresztül víz alatt tároltuk, majd utána végeztük el a dinamikus triaxiális vizsgálatokat. Az eredmények nem adtak koherens összefüggést. A homok talaj cementtel stabilizált mintáinál, illetve a VC50 50 kg/m³ adagolású mintájánál a száraz mintánál is magasabb értékek adódtak, ami szerint a víz alatt tárolás nem rontotta, hanem javította a minták ellenálló képességét, míg a VC50 75 kg/m³ és 100 kg/m³ adagolásánál ~20%-os leromlás volt tapasztalható. A lösztalajok keverékeinél 20–40%-os leromlás volt tapasztalható, azonban a leromlás mértéke nem mutatott korrelációt a kötőanyag típusával vagy a kötőanyag adagolásával.

A homok talaj alapú stabilizációk esetében, azoknál a mintáknál, amelyeket nem tároltunk víz alatt, megfigyelhető volt, hogy a 10 000 ciklusszámú terhelés hatására az M_R értékében kismértékű csökkenés következik be. Az eredmények alapján a csökkenés nagyságát a kötőanyag-adagolás befolyásolja, ugyanis magasabb kötőanyag mennyiséget alkalmazva nagyobb csökkenés volt tapasztalható, amint azt a 4. ábra mutatja. Ez valószínűsíthetően



3. ábra. ViaCalco C50-tel stabilizált homokminták reziliens modulusa a deviátor feszültség és a kötőanyag-mennyiség függvényében



4. ábra. Stabilizált homok talaj reziliens modulus értékének változása a kötőanyag-adagolás mennyiségének és a terhelési ciklusszámnak függvényében

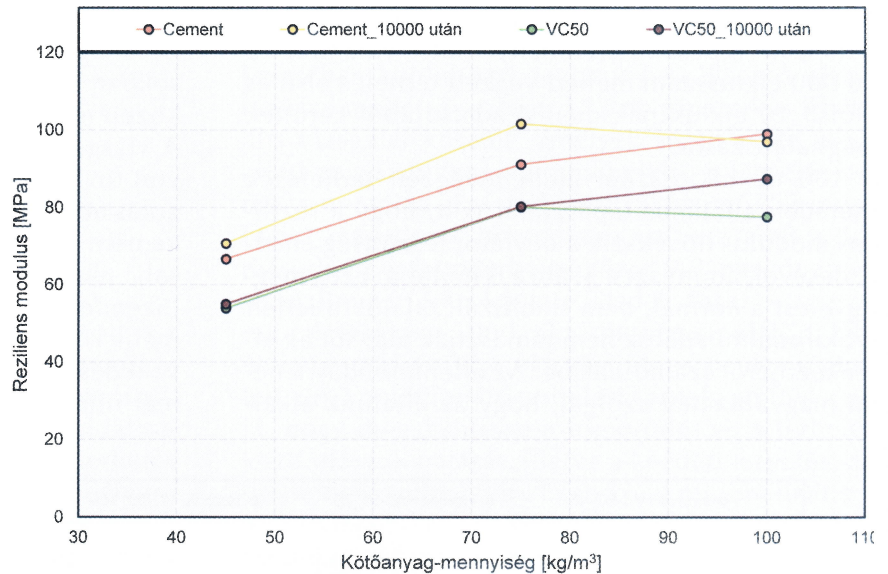
azért következik be, mert a kötőanyag-adagolással a merevség is nő, aminek jó része a kevésbé rugalmas hidraulikus kötésekből áll, és ezek terhelés hatására bekövetkező tönkremenetele okozhatja a merevség csökkenését is.

A stabilizált homok talajoknál tapasztalt trend nem jelent meg a stabilizált lösz talajok reziliens modulus értékeiben, ugyanis itt nem volt megfigyelhető leromlás, a 10 000 ciklus után inkább kismértékű felkeményedés volt tapasztalható. Ezt mutatja be az **5. ábra**.

A 4 napig víz alatt tárolt minták hasonló eredményeket mutatnak, mint a száraz próbatestek. A stabilizált homok talajok esetében csökkenés nem volt kimutatható, ugyanakkor javulás sem következett be, míg a lösz talajokból készült stabilizációk eredményei kismértékű emelkedést mutattak.

Valamennyi vizsgálati eredményt tekintetbe véve megállapítható volt, hogy a homok minták reziliens modulusai adódtak a legnagyobbra, ezen belül a cementtel stabilizált minták adták a legnagyobb, 100 MPa feletti értékeket, míg a ViaCalcoval kezelt homok valamivel alacsonyabb, $M_R = \sim 100$ MPa körüli modulust mutatott. A lösz minták esetében a reziliens modulus $M_R = 30\text{--}80$ MPa közötti értékekre adódott.

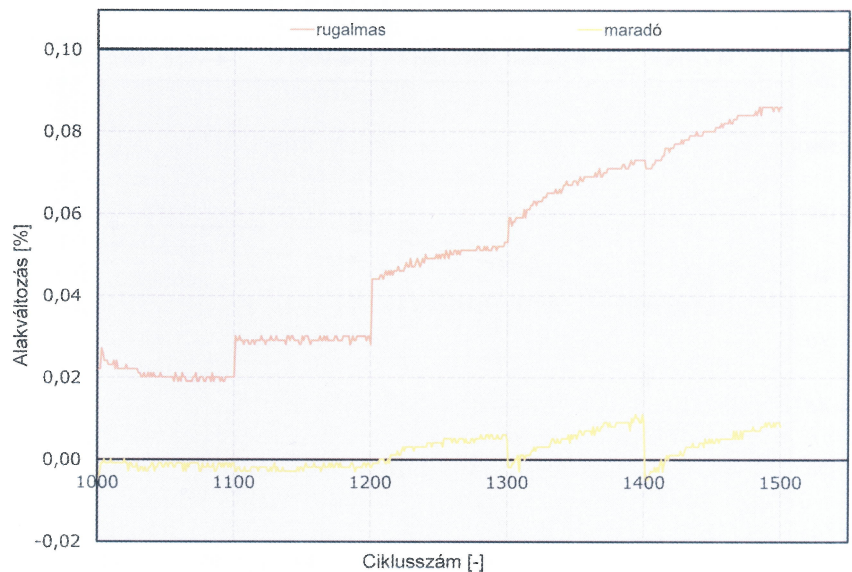
A reziliens modulus vizsgálata során a feszültség–alakváltozás összefüggéseit is elemeztük. Az eredményeket tekintve az első 100 ciklus során az alakváltozások növekednek, majd az első terhelési lépcső esetében az alacsonyabb deviator feszültség alkalmazása miatt az alakváltozások csökkennek, azaz expanzió alakul ki. A második terhelési lépcső esetében a deviator feszültség megegyezik a kondicionáló terhelés során alkalmazott értékkel, így gyakorlatilag nem alakul ki maradó alakváltozás. A további 100-as ciklusszámú terheléseken keresztül a deviator feszültség emelkedésével az alakváltozások is növekednek. Az egyes terhelési lépcsők között az expanzió hatásának köszönhető-



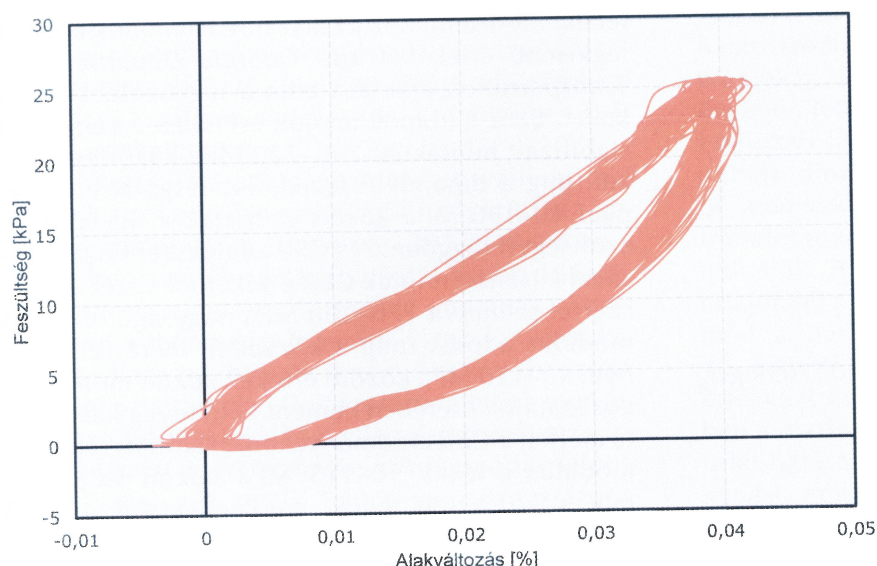
5. ábra. Stabilizált lösz talaj reziliens modulus értékének változása a kötőanyag-adagolás mennyiségének és a terhelési ciklusszámnak függvényében

en gyakorlatilag eltűnik a maradó alakváltozás, amit a **6. ábra** szemléltet.

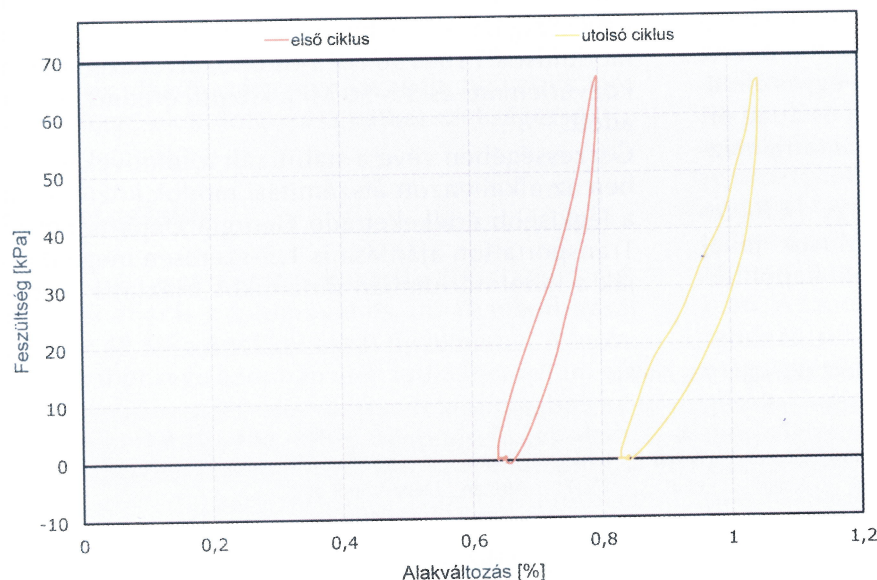
A 100-as terhelési lépcsők jellemző hiszterézis hurokjait mutatja a **7. ábra**. A hiszterézis hurok az egy terhelési ciklus feszültség–alakváltozás összefüggéseként rajzolódik ki. Látható, hogy egy terhelési lépcsőn belül az alakváltozás minimálisan változik a ciklusszám emelkedésével. Szintén megjelenik az ábrán, hogy a 27,6 kPa deviator feszültséggel végzett terhelési lépcső esetében gyakorlatilag nincs maradó alakváltozás, mivel a hurok mindig az origóba térnek vissza. Minimális mértékű nega-



6. ábra. Áztatott, 100 kg/m³ adagolású cementtel stabilizált homok alakváltozása a 100 ciklus időtartamú terhelési lépcsők során a ciklusszám függvényében



7. ábra. A 27,6 kPa deviátor feszültség mellett végrehajtott 100-as ciklusszámú terhelés histerézis hurokjai



8. ábra. A 10 000-es ciklusszámú terhelés első és utolsó ciklusához tartozó histerézis hurok

tív feszültség és alakváltozás is létrejön, a terhelő berendezés elhanyagolható pontatlanságából fakadóan. Látható továbbá, hogy a reziliens modulus is szinte változatlan a terhelési lépcső során, mivel a hurok meredeksége gyakorlatilag valamennyi ciklus esetében azonos.

A végső, 10 000 ciklusszámú terhelés során az alakváltozások további növekedése figyelhető meg, azonban a növekedés ütemében eltérések tapasztalhatók az egyes minták eredményeinek összehasonlításakor. A teljes terhelések végén kapott alakváltozás alapján megállapítható, hogy globálisan az a tendencia érvényesül, miszerint a

magasabb kötőanyag-adagolás esetén kisebb rugalmas és maradó alakváltozások jönnek létre, tehát nagyobb és „tartósabb” reziliens modulus érték adódik. A 10 000 ciklus során bekövetkező maradó alakváltozás jól szemléltethető a terhelés első és utolsó histerézis hurokjának ábrázolásával (8. ábra). A hurok távolsága mutatja a 10 000 ciklus során kialakuló teljes maradó alakváltozást. Látható, hogy ennek mértéke akár az egy cikluson belül bekövetkező alakváltozás nagyságát is meghaladhatja.

A dinamikus triaxiális mérések és a CBR-ből származtatott értékek összehasonlítása

A reziliens modulus meghatározása alapvetően a CBR érték alapján történik. Ennek megfelelően a szakirodalomban több különböző összefüggés is megtalálható, amelyek segítségével a CBR teherbírás átszámítható M_R értékre. Ezen összefüggések többek között azt a célt szolgálják, hogy a laboratóriumi vagy helyszíni CBR teherbírás mérés alkalmazásával számítható legyen a reziliens modulus, illetve a még kevésbé elterjedt dinamikus triaxiális berendezést igénylő közvetlen mérés helyett az M_R értéke egy egyszerűbb, kevésbé költséges laboratóriumi vizsgálattal is előállítható legyen. A laboratóriumi vizsgálatok során végrehajtott

CBR-mérések eredményeit 7 különböző szakirodalmi ajánlás felhasználásával számítottuk át M_R értékekké, és vetettük össze a laboratóriumban mért M_R értékekkel. Az alábbiakban ismertetjük a szakirodalom kutatás során fellelt különböző szerzők által javasolt CBR és M_R összefüggéseket. Amennyiben az egyes összefüggések esetén valamilyen értéktartományt is megadtak a szerzők, úgy az egyes összefüggéseknél azokat is feltüntettük.

1. Heukleom&Klomp (1962):

$$M_R (\text{psi}) = 1,42 \times \text{CBR}$$

(értéktartomány $\text{CBR} < 10$)

$$M_R (psi) = 1,5 \times CBR$$

(értéktartomány $CBR = 10-20$)

2. Green&Hall (1975):

$$M_R (psi) = 5,409 \times CBR^{0,711}$$

(értéktartomány $CBR = 2-200$)

3. Powell et al (1984):

$$M_R (psi) = 2,554 \times CBR^{0,64}$$

(értéktartomány $CBR = 2-12$)

4. Lofti et al (1988):

$$\log M_R (ksi) = 1,0016 + 0,043(CBR) - 1,9557 \left(\frac{\log \delta_d}{CBR} \right) - 0,1705 \log \sigma_8$$

5. Ohio DOT (2008):

$$M_R (psi) = 1,2 \times CBR$$

6. South African Council (2002):

$$M_R (psi) = 3,0 \times CBR^{0,65}$$

7. Georgia Department of Transportation:

$$M_R (psi) = 3,116 \times (CBR)^{0,4779707}$$

A különböző szerzők által publikált összefüggések alapján a laboratóriumban mért CBR értékből meghatározott M_R értékek a **3. táblázatban** láthatók. Az elemzés során kiszámításra kerültek az egyes elméletekből kapott legkisebb, legnagyobb és átlag értékek is, amelyeket szintén a **3. táblázat** tartalmazza.

Az eredményeket vizsgálva látható, hogy a CBR teherbírásból számított reziliens modulusok jóval magasabbak, mint a közvetlen mérésből kapott ér-

tékek. Méréseinkhez az átszámítási módok közül a legkisebb értékeket adó *Georgia Department of Transportation* ajánlása adta a legközelebbi értékeket. Ezek a homok talajok esetében a cementtel stabilizált mintáknál 200–220 MPa közötti értékeket, míg a dinamikus triaxiális vizsgálat eredményei 40–180 MPa között változtak a deviátor feszültségtől függően. A VC50 adalékszer hozzáadásával készített minták CBR értékeiből ezzel a módszerrel számítva 170–200 MPa nagyságú reziliens modulus adódik, míg a közvetlen mérés eredményei 40–120 MPa közötti értékek között mozogtak. Löss talajok esetében cement kötőanyag használata mellett a CBR eredményekből számított reziliens modulus értékek 90–175 MPa között változtak, míg a közvetlen mérés eredményeként 45–105 MPa közötti értékeket kaptunk. A VC30 kötőanyaggal készített mintákon végzett CBR vizsgálatok 115–130 MPa közötti eredményeket mutattak, míg a dinamikus triaxiális vizsgálatok 30–85 MPa nagyságú reziliens modulus értékeket adtak. A tendencia a VC50 kötőanyag esetében is hasonló volt: a CBR vizsgálatok eredményeiből számított reziliens modulusok 110–150 MPa-os értékeivel szemben a közvetlen mérés 30–90 MPa közötti eredményeket adott.

Összességében véve a stabilizált földművek esetében az alkalmazott átszámítási módok közül tehát a legkisebb értékeket adó *Georgia Department of Transportation* ajánlása is 1,5-szeresen meghaladják a laboratóriumban dinamikus triaxiális beren-

3. táblázat. Stabilizált talajminták CBR értékeiből számított M_R értékei

Talaj	Kötőanyag típusa és mennyisége	CBR	1. Heukleom & Klomp	2. Green & Hall	3. Powell et al	4. Ohio DOT	5. South African Council	6. Georgia Department of Transportation	Min.	Max.	Átlag
Homok	Cement 40 kg/m ³	128,15	1325,4	1175,5	393,3	1060,3	484,9	218,6	218,6	1325,4	776,3
Homok	Cement 75 kg/m ³	133,50	1380,7	1210,2	403,7	1104,6	498,0	222,9	222,9	1380,7	803,3
Homok	Cement 100 kg/m ³	133,70	1382,3	1211,2	404,0	1105,8	498,4	223,0	223,0	1382,3	804,1
Homok	VC50 40 kg/m ³	74,30	797,5	797,5	277,3	614,3	340,1	168,4	168,4	797,5	494,3
Homok	VC50 75 kg/m ³	96,80	1001,2	963,0	328,6	800,9	404,1	191,1	191,1	1001,2	614,8
Homok	VC50 100 kg/m ³	106,00	1096,3	1027,2	348,3	877,0	428,7	199,6	199,6	1096,3	662,8
Löss	Cement 40 kg/m ³	23,50	243,0	351,9	132,8	194,4	161,0	97,2	97,2	351,9	196,7
Löss	Cement 75 kg/m ³	63,10	652,6	710,3	249,9	522,1	306,0	155,8	155,8	710,3	432,8
Löss	Cement 100 kg/m ³	79,30	820,2	835,7	289,3	656,1	355,0	173,8	173,8	835,7	521,7
Löss	VC30 40 kg/m ³	32,80	339,2	446,1	164,4	271,4	200,0	113,9	113,9	446,1	255,8
Löss	VC30 75 kg/m ³	37,55	388,4	491,1	179,3	310,7	218,3	121,5	121,5	491,1	284,9
Löss	VC30 100 kg/m ³	40,85	422,5	521,4	189,2	338,0	230,6	126,5	126,5	521,4	304,7
Löss	VC50 40 kg/m ³	30,75	318,0	426,1	157,8	254,4	191,8	110,5	110,5	426,1	243,1
Löss	VC50 75 kg/m ³	52,65	544,5	624,5	222,6	435,6	272,0	142,9	142,9	624,5	373,7
Löss	VC50 100 kg/m ³	58,00	599,9	669,0	236,8	479,9	289,7	149,6	149,6	669,0	404,1

dezéssel mért M_R értékeket. A 7 különböző összefüggéssel számítható értékek összehasonlítása alapján azonban látható, hogy az egyes eljárásokkal számított reziliens modulusok átlagértéke 3–4-szeres értéket mutat.

A közvetett eljárással meghatározott reziliens modulusok értéke jó egyezést mutat helyszíni vizsgálatok eredményével (Szendefy, 2017), azonban a dinamikus triaxiális vizsgálatokból kapott értékekhez képest jelentős eltéréseket mutatnak. Ezzel szemben a dinamikus triaxiális vizsgálatokból kapott reziliens modulusok hasonló értékeket vettek fel, mint az általunk fellelt szakirodalmakban meghatározott értékek. A közvetlen és közvetett módszerek között ezért bizonyos ellentmondás jelentkezik, amelynek egyik lehetséges magyarázata, hogy a reziliens modulus érzékenyebben reagál a teherbírás változására, mint a CBR érték. Az ellentmondás feloldása érdekében további vizsgálatok lennének szükségesek, amelyek segítségével meghatározható lenne, hogy az M_R értéke hogyan reagál a különböző paraméterek, mint például a víztartalom változására. Ezen felül megfontolandó továbbá, hogy a stabilizált talajokra a fenti számítási eljárások alkalmazása nem javasolt, helyettük más összefüggések kidolgozása válhat szükségessé.

Összefoglalás

A típuspályaszerkezetek használatán alapuló méretezési eljárás a földművet és annak teherbírását az $E_2 = 40$ MPa értékkel veszi figyelembe. A hazai talajok többsége azonban nem tudja biztosítani ezt a teherbírást, ezért durvaszemcsés anyagból készült teherbírásjavító réteg beépítése szükséges. A durvaszemcsés réteg helyettesíthető a talajok kötőanyagossal talajstabilizálásával, ami lehetőséget adna magasabb földmű teherbírások elérésére is. Azonban ezt a magasabb földmű teherbírási értéket a típuspályaszerkezet méretezés nem tudja figyelembe venni. Ezzel szemben az alternatív méretezési eljárás lehetőséget biztosít arra, hogy a pályaszerkezet optimalizálása elvégezhető legyen a földmű, az alapréteg és a burkolati rétegek teherbírása és más fizikai tulajdonságai alapján.

A kutatás során az alternatív pályaszerkezet méretezéséhez használt összefüggések bemenő paraméterét, a földmű dinamikus, forgalmi terheléshez hasonló terhelésből számítható rugalmassági modulusát, az úgynevezett reziliens modulus (M_R) értékét vizsgáltuk kötőanyaggal stabilizált talajok esetében. Az M_R a dinamikus teher és az annak hatására létrejövő rugalmas alakváltozás hányadosából számítható, mérése dinamikus triaxiális berendezéssel történik, illetve a szakirodalomban fellelhetők más talajfizikai mérésekből (pl. CBR) való átszámítási módok is.

Hazánkban korábban még nem végeztek M_R meghatározásához szükséges dinamikus triaxiális vizsgálatokat, a technikai feltételek is csak az elmúlt években lettek adottak ehhez. A vizsgálatok során homok és lösz talajokból készült talajstabilizációs minták dinamikus triaxiális vizsgálatait végeztük el, amelyekből meghatározott M_R értékek a szakirodalomban fellelhető értékekkel jó azonosságot mutattak. A mérési eredmények alapján a homok talajoknál a kötőanyag típusa és mennyisége, valamint a deviátor feszültség függvényében $M_R = 40\text{--}120$ MPa, míg lösz talajoknál $M_R = 30\text{--}80$ MPa értékeket kaptunk. A stabilizált talajminták esetében a reziliens modulus értékek 4 nap víz alatti tárolás hatására nem mutattak számottevő értékcsökkenést, ami bizonyítja a stabilizált talajok vízzel szembeni ellenállóképességét.

A reziliens modulus mérések során kiegészítő vizsgálatokat végeztünk, ahol további nagy számú (10 000 db) teherciklussal terheltük a mintákat, és vizsgáltuk a létrejövő alakváltozásokat. A mérések szerint a rugalmas alakváltozás nagysága érdemben nem változott a 10 000 ciklus után, így az M_R értéke is kvázi változatlanul tekinthető, azonban említésre méltó maradó alakváltozások következtek be, amelyek pályaszerkezetre gyakorolt hatását a továbbiakban még vizsgálni szükséges.

A stabilizált talajok teherbírásának meghatározása céljából CBR vizsgálatok is készültek. A CBR vizsgálatok eredményeiből a szakirodalomban megtalálható összefüggések alapján M_R érték is számítható. A számított értékek a dinamikus triaxiális berendezéssel mért M_R értékeknél minden esetben magasabb értékeket adtak, a különböző összefüggések alapján számítható értékek között akár fél nagyságrendi eltérés is adódott. A dinamikus triaxiális vizsgálatok eredményeiből közvetlenül kapott reziliens modulus értékek jó egyezést mutatnak a szakirodalomban fellelhető értékekkel. Egyelőre bizonytalan, hogy mi eredményezi ezt az ellentmondást az eredményekben, ennek feloldására az összefüggések további elemzése és hazai összehasonlító vizsgálatok készítése lenne szükséges.

Irodalom

- Achampong, F, Usmen, M, Kagawa, T. Evaluation of reziliens modulus for lime- and cement-stabilized synthetic cohesive soils, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1997; 1589.
- Akoto BKA. The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime-stabilized laterite, Engineering Geology, 1986; 23:125-135.
- Bandara N, Rowe GM. Design subgrade resilient modulus for Florida subgrade soils, in: Durham. 2003.
- Berg RL, Bigl SR, Stark J, Durell G. Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD Phase1, Technical Report Minnesota Department of Transportation, 1996.

- Buchanan S. Resilient Modulus: What, Why and How? Report, Vulcan Materials Company, 2007.
- Drumm EC, Boateng-Poku Y, Johnson Pierce T. (1990): Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests, Journal of Geotechnical Engineering, 1990; 116(5).
- Durham GN, Marr WA, De Groff WL. Resilient Modulus Testing for Pavement Components ASTM STP 1437. 2003.
- Kung JHS, Lin HD, Yand S-J, Huang W-H. Reziliens modulus and Plastic Strain of Unsaturated Cohesive Subgrade Soils, The 4th International Conference on Unsaturated Soils. ASCE, Arizona, 2006; 1: 541-552.
- Li J, Qubain BS. Resilient modulus variations with water content. In: Durham GN, Marr WA, De Groff WL. Resilient Modulus Testing for Pavement Components ASTM STP 1437, 2003.
- Mohammad, L. N, Herath, A, Abu-Farsakh MY, Gaspard K, Gudishala R. (2007): Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007 november
- Primusz P, Tóth Cs, Pethő L. Alternatív méretezési eljárásokra vonatkozó tanulmány és az alternatív módszerek bevezetését segítő irányelv. 2016.
- Qiu X, Yang Q, Wang B, Luo X. Prediction model of dynamic resilient modulus of cohesive subgrade soil based on triaxial test system, Key Engineering Materials Vols. 2014; 579-580, pp 873-876
- SAS W, Gluchowski A, Szymanski A. Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilizaed clay obtained from the repeted loading CBR test, Annals of Warsaw University of Life Sciences Land Reclamation, No44. 2012.
- Szendefy J. A hazai talajok szerkezetének és teherbírásiának változása meszes talajstabilizáció hatására, PhD-dolgozat, Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar, 2009.
- Szendefy J. Viacalcoval kezelt talajok laboratóriumi vizsgálata, Geotechnika Konferencia, Ráckeve, 2014.
- Szendefy: Kutatási jelentés aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere című tervezői utasítás geotechnikai paramétereinek pontosítására. 2017.
- Trindade TP, Carvalho CAB, Silva CHC, de Lima DC, Barbosa PSA. Resilient modulus of soils and soil-cement mixtures, In: Durham, GN, Marr WA, De Groff WL. Resilient Modulus Testing for Pavement Components ASTM STP 1437; 2003.
- Vogrig M, et al. A Laboratory Technique for Estimation the Resilient Modulus of Unsaturated Soil Specimens from CBR and Unconfined Compression Test, 56th Canadian Geotechnical Conference, 2003.



NEMZETKÖZI SZEMLE

Kerékpáros és gyalogos forgalomszámlálás kezdeményezése Minnesota államban: a kerékpáros és gyalogos forgalomfigyelésének rendszeressé tétele

The Minnesota Bicycle and Pedestrian Counting Initiative: Institutionalizing Bicycle and Pedestrian Monitoring

Szerző(k): G. Lindsey, M. Petesch, T. Vorvick, L. Austin, B. Holdhusen
University of Minnesota USA

Terjedelem: 114 oldal

The Minnesota Department of Transportation (MnDOT) launched the Minnesota Bicycle and Pedestrian Counting Initiative in 2011, a statewide, collaborative effort to encourage and support non-motorized traffic monitoring. This report summarizes work by MnDOT and the University of Minnesota between 2014 and 2016 to institutionalize bicycle and pedestrian monitoring. The project team established a new statewide bicycle and pedestrian traffic monitoring network with 25 permanent monitoring locations and a new district-based portable counting equipment loan program. Other key accomplishments included Minnesota's first Bicycle and Pedestrian Annual Traffic Monitoring Report, a new MnDOT website for reporting annual and short-duration counts, and a new Bicycle and Pedestrian Data Collection Manual that local jurisdictions and consultants can use to design manual and automated non-motorized traffic monitoring programs. The project team also included provisions in MnDOT equipment vendor agreements that enable local governments to purchase bicycle and monitoring equipment; established new annual training programs for bicycle and pedestrian monitoring; and contributed provisions in the Statewide Bicycle System Plan and Minnesota Walks that call for bicycle and pedestrian traffic monitoring and creation of performance measures based on counts. Despite this progress, challenges in implementing monitoring remain and continued investment in and support for bicycle and traffic monitoring is needed.