

A reziliens modulus mérése és jelentősége a pályaszerkezetek méretezése során

Kötőanyaggal stabilizált talajok reziliens modulusa

Hazánkban az útpályaszerkezet méretezése jelenleg típuspályaszerkezetek használata alapján történik. A méretezés során a forgalom nagyságának és az alapréteg típusának függvényében táblázatok alapján megállapítják a szükséges pályaszerkezeti rétegrendet.



A földmű tetején a minimálisan elvárt teherbírás $E_2 = 40$ MPa értékben van megadva, aminek biztosítása érdekében az ÚT 2-3.206:2007 előírás a legkedvezőtlenebb helyen és körülmények között is $E_2 \geq 50$ MPa teherbírást ír elő a földmű koronaszintjén. Ezek alapján elmondható,

hogy a jelenlegi tervezési módszer használata esetén nem érvényesül egy magasabb teherbírási földmű előnye, amivel a pályaszerkezetek vastagsága lenne hatékonyan csökkenthető.

További problémát okoz, hogy a hazánkban előforduló talajok döntő része nem tudja az előírt földműteherbírást biztosítani, ezért durva szemcsés anyagból (pl.: homokos kavics, zúzottkő) teherbírásjavító réteget építenek be. A teherbírás-javítás elvégezhető lenne a talajok kötőanyagossal stabilizálásával is; ez a technológia lehetőséget adna az $E_2 = 40$ MPa-nál magasabb földműteherbíráskor elérésére is. Azonban a típuspályaszerkezet-méretezés nem teszi lehetővé a magasabb földműteherbírásból származó műszaki előny figyelembevételét, azaz az útpálya alaprétegei és a burkolati rétegek vastagsága vagy anyagminősége nem csökkenthető, így az ezzel járó műszaki előny elvész. Ennek a megoldásaként dolgoztak ki egy új alternatív méretezési eljárást (Pethő, Primusz, Tóth 2016), amely figyelembe veszi az elvárt földműteherbírást meghaladó értéket a méretezés során.

Alternatív pályaszerkezet-méretezés

A méretezési eljárás az útpályaszerkezet háromrétegű modelljének megalkotásával kezdődik, amelynél három rétegcsoportot különböztünk el: az aszfaltréteget, az alapréteget és a földművet. Az alternatív méretezési módszer az útpályaszerkezeteket rugalmas, végtelen izotróp féltéren (úttükör) fekvő, többrétegű hajlékony lemezekként kezeli, melyeket vastagságuk (H), rugalmassági modulusuk (E) és Poisson-tényezőjük (μ) jellemez. A felsorolt három paraméter ismeretében – a legfelső aszfaltréteg felszínén ható, egyenletesen megoszló,

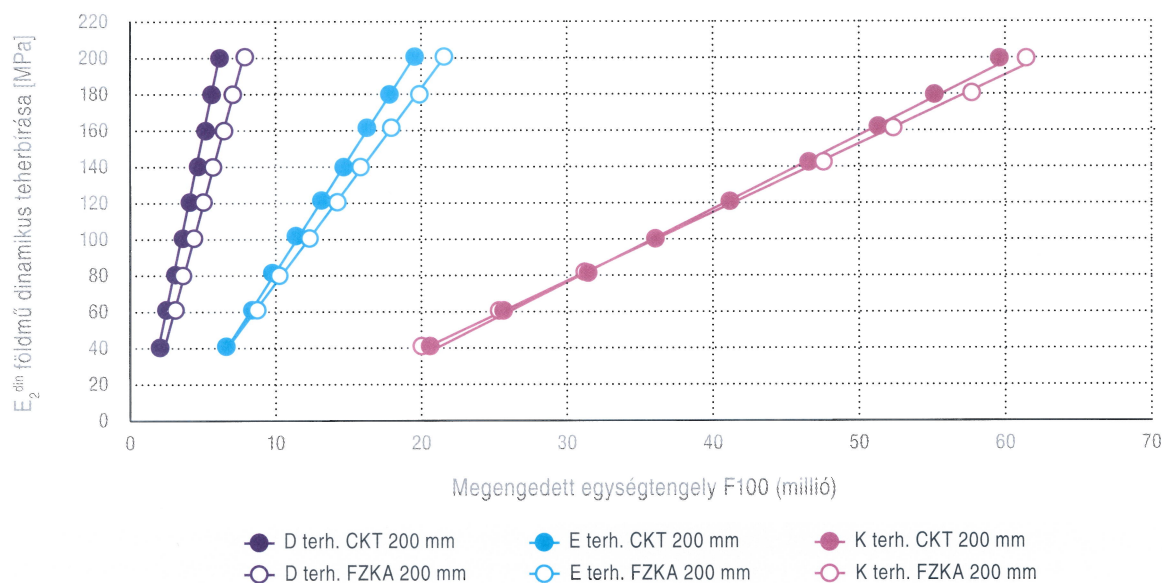
kör alakú terhelőfelület hatására – számítható a többrétegű rendszer bármely belső pontjában a létrejövő feszültség, a megnyúlás, illetve az elmozdulás. Az eljárás az aszfaltrétegek alsó szálában ébredő vízszintes fajlagos megnyúlást, illetve közvetlenül az útpályaszerkezet alatt keletkező fajlagos függőleges összenyomódást tekinti kritikus igénybevételnek. Az eljárás alkalmazásakor a megadott anyagparaméterek segítségével megalkotott modellben a kritikus helyeken meghatározva az ébredő igénybevételeket, a szerkezet megfelel, ha ezek az értékek kisebbek az anyagi tulajdonságok alapján megengedhető határ-igénybevételek értékeinél.

Az új méretezési eljárással lehetőség nyílik arra, hogy a tervező egy gazdaságossági összehasonlítást végezzen különböző földműteherbírással, alaprétegekkel és burkolati rétegekkel, ami alapján meghatározható, hogy az adott helyszínen és rendelkezésre álló technológiákkal, azonos műszaki tartalom mellett, melyik pályaszerkezet valósítható meg a leg gazdaságosabban. Például ha a minimális földműteherbírás helyett $E_2^{\text{din}} = 200$ MPa tudunk biztosítani, akkor az aszfaltvastagság akár 4-5 cm-rel csökkenthető, vagy a pályaszerkezet élettartama akár 2-3-szorosára növekedhet (1-gyel jobb terhelési osztály). Az 1. ábra egy pályaszerkezet élettartamát ábrázolja, különböző földműteherbíráskor esetén. Ha a földmű teherbírása nagyobb, mint a minimális követelmény, akkor az aszfalt alsó szálában keletkező vízszintes fajlagos megnyúlás csökken, és a megengedett egyégtengely-áthaladás (élettartam) növekszik.

A minták előkészítése és a reziliens modulus mérése

Az alternatív pályaszerkezet méretezéséhez használt összefüggések a földmű dinamikus, forgalmi terheléshez hasonló terhelésből számítható rugalmassági modulusát, az úgynevezett reziliens modulus (M_R) értéket használják.

1. ábra. A pályaszerkezet élettartama három terhelési osztály (D, E és K) és két különböző alaprégteg (CKT 200 mm és FZKA 200 mm) esetén



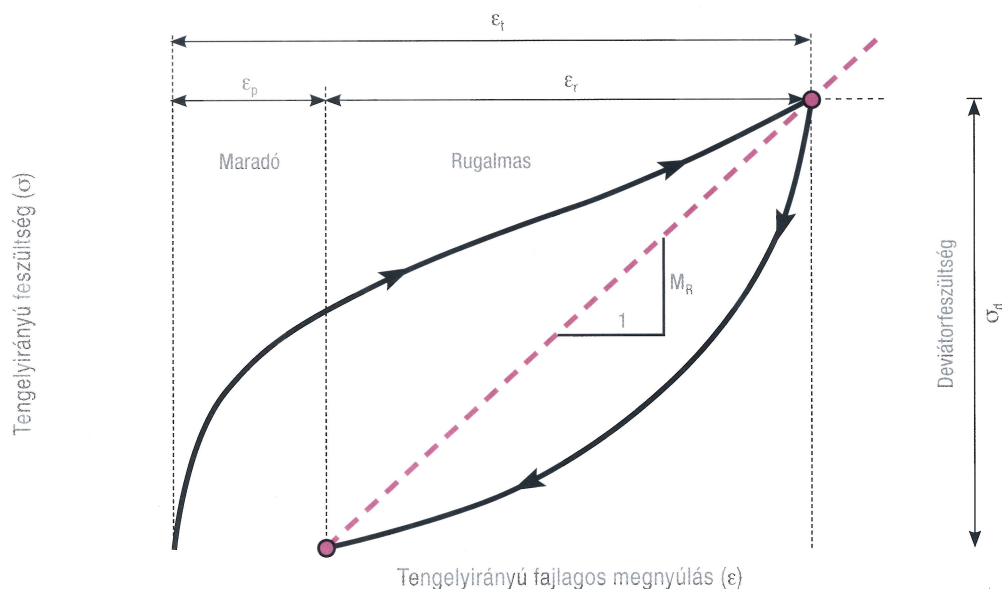
A reziliens modulus az útpályaszerkezetek alsó rétegeként definiált földműréteg dinamikus terhelésnél figyelembe vehető rugalmassági modulusa. A földmű M_R értéke bemenő paraméterként szolgál az útpályaszerkezetek méretezésénél, értéke nagy hatással van a pályaszerkezet alap- és burkolati rétegeinek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

Az M_R közvetlenül meghatározható dinamikus triaxiális berendezéssel, azonban ilyen vizsgálat hazánkban korábban még nem készült. A dinamikus triaxiális vizsgálatok mellett az M_R meghatározására a szakirodalom a laboratóriumban egyszerűbb eszközökkel is előállítható CBR teherbírási vizsgálatot javasolja, aminek eredményéből különböző összefüggésekkel származtathatók az értékek. Ezeknek az összefüggéseknek a segítségével akár helyszíni CBR teherbírásmérés alapján is számíthatóvá válik a reziliens modulus

értéke, vagyis kiváltható a speciális berendezést igénylő és költséges dinamikus triaxiális vizsgálat. Komoly hátrányuk azonban, hogy egy-egy összefüggés legtöbbször csak egy adott értéktartományon belül érvényes, illetve azokban az esetekben, ahol több ilyen összefüggés alkalmazása is lehetséges, a kapott értékekben jelentős szórás tapasztalható.

Általános definíciója szerint a reziliens modulus a deviátorfeszültség és a rugalmas alakváltozás aránya. A reziliens modulus 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 (2. ábra).

2. ábra. A reziliens modulus értelmezése

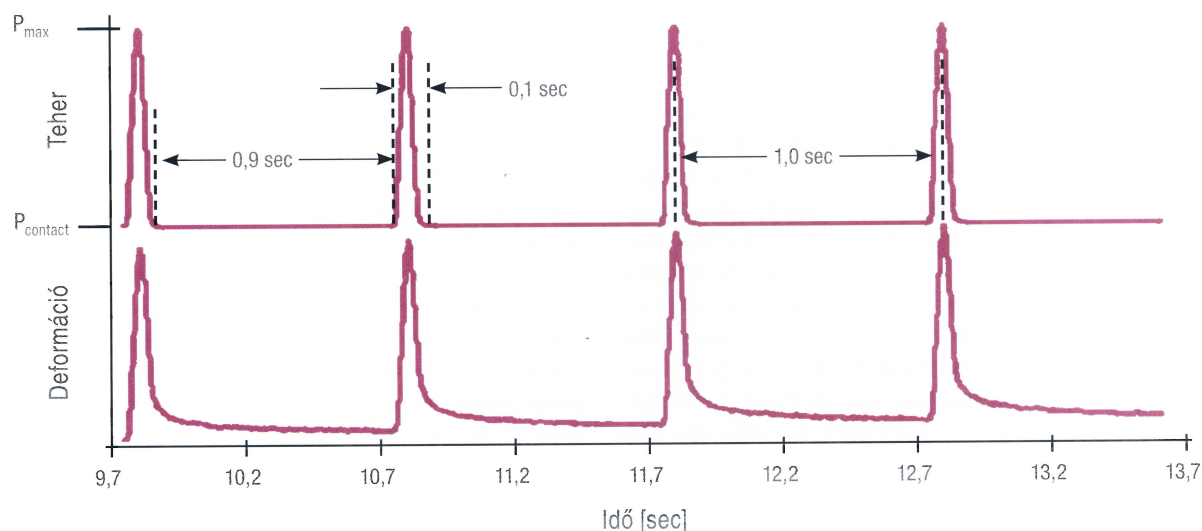


E cikkben tárgyalt kutatás célja elsősorban a kötőanyagokkal stabilizált talajok M_R értékének meghatározása volt közvetlen módszerrel, vagyis dinamikus triaxiális berendezés alkalmazásával. Ezzel párhuzamosan CBR-vizsgálatok is készültek azonos módon előkészített próbatesteken annak érdekében, hogy a szakirodalomban ajánlott CBR-vizsgálatokra vonatkozó összefüggéseket is vizsgáljni lehessen. E vizsgálatok mellett további célkitűzés volt a stabilizált talajok esetében megvizsgálni az M_R értékének elnedvesedés hatására bekövetkező változását. Ezért a ciklikus vizsgálatokhoz elkészített minták egy részét 28 napos pihentetést követően, míg másik részét további 4 nap víz alatt tárolás után terheltek a dinamikus teherrel.

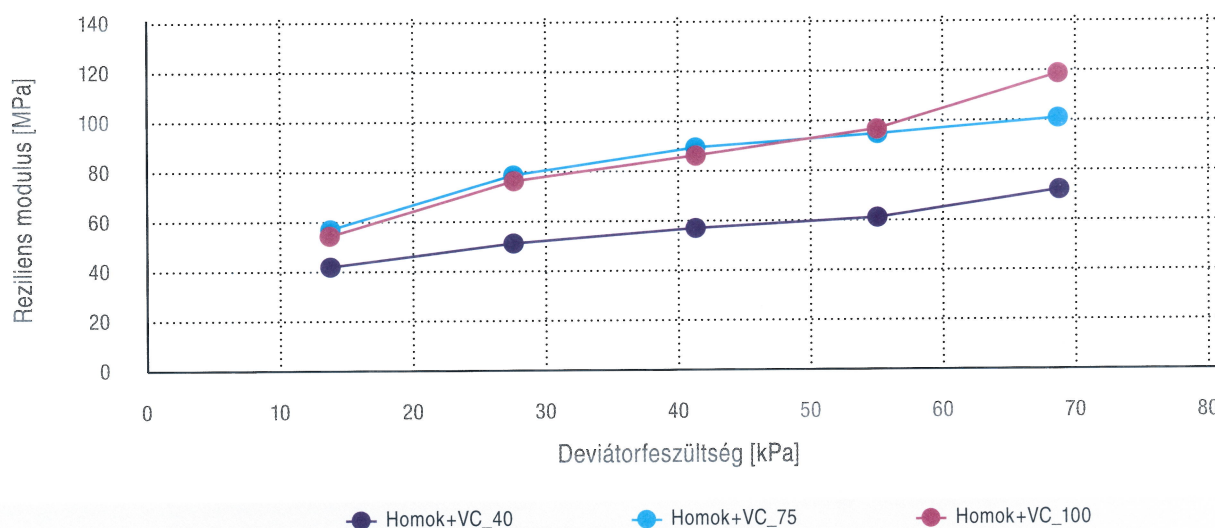
A laboratóriumi vizsgálati programot az AASHTO T-307 amerikai előírásnak megfelelően végeztük el. Ennek keretében különböző deviátorfeszültségek alkalmazása mellett összesen 150 db vizsgálat készült. Az elvégzett vizsgálatok során előre megadott nagyságú tengelyirányú ciklikus terhelés került a mintákra. Egy

ciklus minden esetben 1 másodperc hosszúságú volt, ennek során a 0,1 másodpercig tartó terhelési fázist 0,9 másodperces nyugalmi periódus követte. Az egyes minták elsőként 1000 cikluson keresztül 27,6 kPa cellanyomás és 27,6 kPa deviátorfeszültség mellett ún. kondicionáló terhelést kaptak, ami arra szolgált, hogy megszüntesse a tömörödés és a terhelés közti időszak hatását, illetve a kezdeti terhelés megszüntetésére az újrateherelés ellenében. Ezenfelül minimalizálja az esetlegesen nem megfelelő érintkezés hatását, amely a minta végei, valamint a terhelőfej és az alapzat között fennállhat. A kondicionáló terhelés után szintén 27,6 kPa cellanyomás mellett, 5 különböző, fokozatosan növekvő deviátorfeszültség alkalmazásával 100-100 cikluson keresztül történt a minták terhelése. A végső vizsgálat során pedig az utolsó terhelési lépcső 68,9 kPa nagyságú deviátorfeszültségének alkalmazásával további 10 000 terhelési cikluson keresztül folytatódott a minták terhelése a maradó alakváltozások vizsgálata céljából (3. ábra).

3. ábra. A vizsgálatok során alkalmazott ciklikus teher időbeli lefutása



4. ábra. A stabilizált homoktalaj reziliens modulus értékének változása a deviátorfeszültség és a kötőanyag adagolásának függvényében



A mérési eredmények kiértékelése

A vizsgálatokat stabilizált homok- és löszmintákon végeztük el. A homoktalaj stabilizációja cement és ViaCalco 50, a lösztalaj pedig cement, ViaCalco 30 és ViaCalco 50 kötőanyagok hozzáadásával történt. A kötőanyag-adagolást tekintve háromféle dózist alkalmaztunk: 40, 75 és 100 kg/m³ volt a keverési arány. Ahogy korábban már említettük, a vizsgálat sorozatokat normál állapotú, illetve 4 napig víz alatt tárolt mintákon is elvégeztük.

A 100 db ciklusszám mellett végzett terhelések esetében általános tapasztalat, hogy a reziliens modulus növekszik a deviátorfeszültség emelkedésével. Ezt a megfigyelést a normál, nem stabilizált talajokra fellelt szakirodalmi adatok nem támasztják alá, sőt az ellenkezőjéről számolnak be. Némi magyarázatot adhat az, hogy az általunk alkalmazott deviátorfeszültségek a törőfeszültség kb. 10%-áig terjedtek, míg a szakirodalmi hivatkozásokban több helyen a deviátorfeszültséget törőközeli feszültség növelték.

A vizsgálatok alapján szintén megállapítható volt, hogy az M_R értéke a kötőanyag-adagolás növelésével növekszik. A növekedés nem egyenesen arányos a kötőanyag-adagolással, ahogyan arra korábbi szakirodalmak (Szendefy 2009) is rámutatnak. A növekedés az optimális kötőanyag-mennyiségig jelentős lehet, majd azt követően már nincs számottevő hatása (4. ábra).

A normál talajokból készült minták a víz alá helyezve felpuhulnak és szétesnek, így az áztatás utáni teherbírásuk nem értékelhető. A stabilizált talajminták vízzel szembeni tartósságának vizsgálata

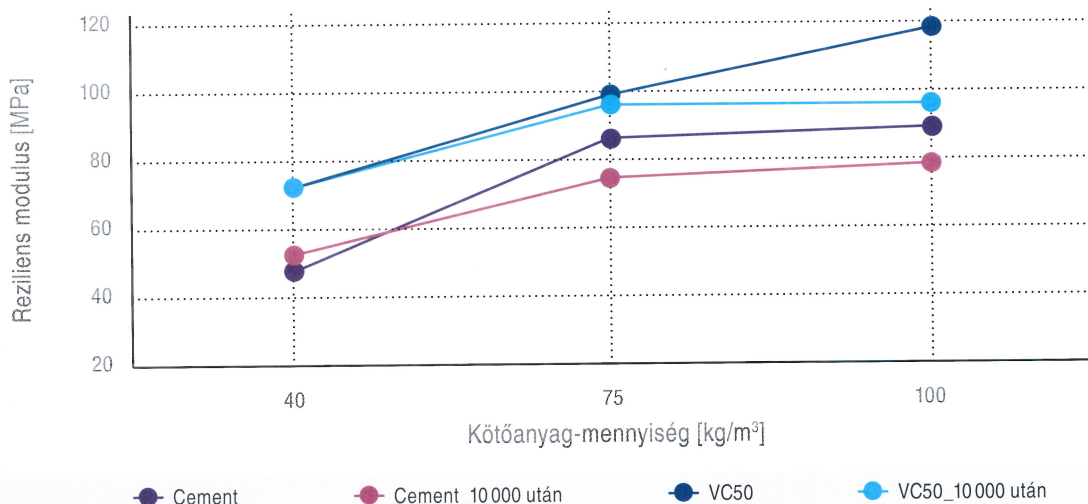
A homoktalajból készült stabilizációknál – azoknál a mintáknál, amelyeket nem áztattuk víz alatt – megfigyelhető volt, hogy a 10 000 ciklus hatására az M_R kismértékben csökken. Az adatok értékelése alapján a csökkenés mértéke függ a kötőanyag-adagolástól, egyre nagyobb kötőanyag-mennyiségnél egyre nagyobb csökkenés volt tapasztalható. Ez a trend talán azzal magyarázható, hogy a kötőanyag-adagolással nő a merevség is, aminek jó része kevésbé rugalmas hidraulikus kötésekből áll, és ezek terhelés okozta tönkremenetele a merevség csökkenését okozhatja (5. ábra).

A stabilizált homoktalajoknál tapasztalt trendet nem követte a stabilizált lösztalajok reziliens modulus értéke. Itt ugyanis nem volt tapasztalható leromlás, inkább kismértékű felkeményedést okozott a 10 000 ciklus (6. ábra).

A 4 napig víz alatt tárolt mintáknál a száraz mintákhoz hasonló eredmények adódtak. Bár a homoktalajokból készült stabilizációk esetében csökkenés nem mutatkozott, de javulás sem volt mérhető, míg a lösztalajokból készült stabilizációk esetében inkább kis emelkedésre utalnak az eredmények.

A reziliens modulus elemzése során vizsgáltuk a feszültség alakváltozás összefüggéseket. A tapasztaltak alapján az első 1000 ciklus alatt az alakváltozások növekedése figyelhető meg, majd az első terhelési lépcsőnél az alacsonyabb deviátorfeszültség hatására az alakváltozások csökkennek, expanszió jön létre. Mivel a második terhelési lépcső során a deviátorfeszültség megegyezik a kondicionáló terhelés esetében alkalmazottal, gyakorlatilag nem alakul ki maradó alakváltozás a 100 ciklus alatt. Ezután a további 100-as ciklusszámú

5. ábra. A stabilizált homoktalaj reziliens modulus értékének változása a kötőanyag-adagolás mennyiségétől és a terhelési ciklusszámtól függően

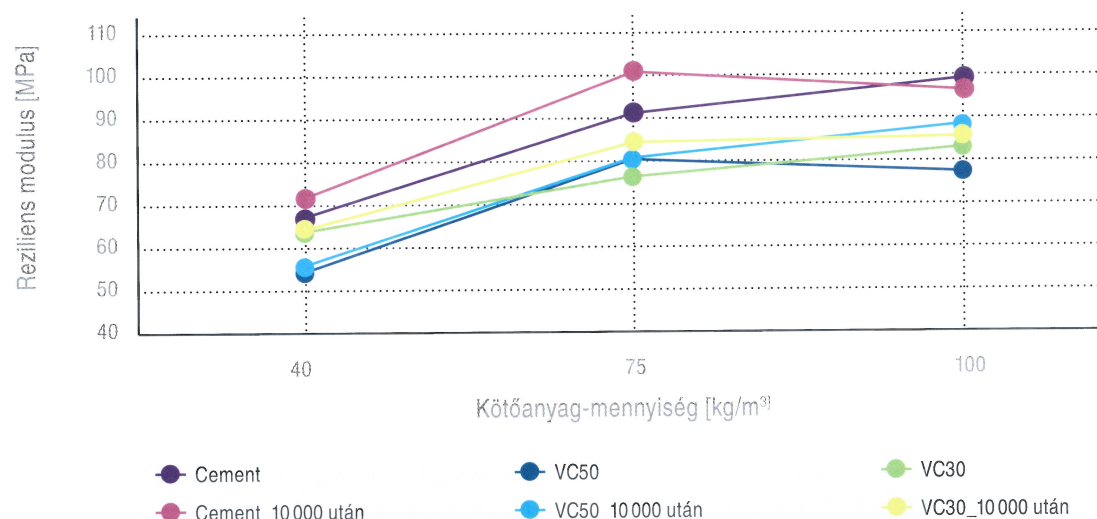


érdekében a mintákat 4 napon keresztül víz alatt tároltuk, majd utána végeztük el a dinamikus triaxiális vizsgálatokat. Az eredmények nem adtak koherens összefüggést. A homoktalaj cementtel stabilizált mintáinál, illetve a VC50 50 kg/m³ adagolású mintájánál a száraz mintánál is magasabb értékek adódtak, 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.

terhelési lépcsők során a deviátorfeszültség emelkedése az alakváltozások növekedését eredményezi. Az egyes terhelési lépcsők között a maradó alakváltozás az expanszió hatására gyakorlatilag eltűnik. A 10 000 ciklusszámú terhelés során az alakváltozások további növekedése következik be, a növekedés üteme azonban nem egységes.

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.

6. ábra. A stabilizált lösztalaj reziliens modulus értékének változása a kötőanyag-adagolás mennyiségétől és a terhelési ciklusszámtól függően



A szakirodalomban több átszámítási mód is fellelhető a talajoknál az M_R érték CBR teherbírásból való átszámítására vonatkozóan. A laboratóriumi vizsgálatok során végzett CBR-mérések eredményeit 7 különböző szakirodalmi ajánlás alapján számítottuk át M_R értékekké és vetettük össze a laboratóriumban mért M_R értékekkel. Az összehasonlítás alapján, a stabilizált földművek esetében a fellelt átszámítási módok közül a legkisebb értékeket adó Georgia Department of Transportation ajánlása is 1,5-szeresen meghaladják a laboratóriumban dinamikus triaxiális berendezéssel mért M_R értékeket, míg a 7 különböző összefüggéssel számítható értékek átlagértéke 3-4-szeres értéket mutat. Ezek alapján a stabilizált talajokra vélhetően más összefüggés kidolgozása javasolt.

Összefoglalás

A hazai útépitések földműépítéseinél nagy tömegben felhasznált talajok önmagukban nem alkalmasak kellően nagy teherbírású földművek előállítására, ezért durva szemcsés anyagokból és talajokból teherbírásjavító réteg beépítése szükséges az $E_2 = 40$ MPa teherbírás eléréséhez. Ekkora vagy ennél magasabb földműteherbírás is elérhető lenne a nagy tömegű földműveknél használt helyi talajok kötőanyaggal történő stabilizálása esetén, amellyel jelentősen csökkenthetők a szükséges szállítmányozás mértéke is. Ezen előnyök mellett az alternatív pályaszerkezet-méretezés lehetőséget nyújt ahhoz, hogy a magasabb földműteherbírás figyelembevételével gazdaságosabbá tegye a pályaszerkezetet.

A pályaszerkezet-méretezésnél bemenő adatként szolgáló földmű dinamikus rugalmassági modulus, azaz reziliens modulus (M_R) dinamikus triaxiális berendezéssel határozható meg. Ma már hazánkban is elérhető ez a laboratóriumi mérés, amellyel a termett talajok mellett a kötőanyaggal stabilizált talajok M_R értékei is meghatározhatóak.

Az elvégzett vizsgálatok szerint a stabilizált talajok M_R értéke alapján $E_2 > 40$ MPa teherbírású földmű előállítására van lehetőség. A vizsgálatok szerint a stabilizált talajok teherbírása a termett talajokkal szemben elnedvesedésre kevésbé érzékeny, kellően ellenálló, így a földművek leromlásából származó útkárosodások kockázata hatékonyan csökkenthető.

Az előzetes vizsgálatok rávilágítottak arra, hogy az egyéb paraméterekből történő közvetett számítással meghatározott reziliens modulus értékek szórása igen magasra adódik, ezért inkább a közvetlen módszer alkalmazása javasolt.

A stabilizált földművek M_R értékeinek különböző hatások okozta érzékenységeinek, változásának vizsgálatára irányuló kutatások jelenleg is folynak a BME Építőmérnöki Kar Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén, azok újabb eredményeiről, reményeink szerint, mihamarabb újra hírt adhatunk. ▲

Irodalom

- Achampong, F., Usman, M., Kagawa, T. (1997): *Evaluation of resilient modulus for lime- and cement-stabilized synthetic cohesive soils*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1589.
- Berg, R. L., Bigl S. R., Stark, J., Durell, G. (1996): *Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD Phase1*. Technical Report Minnesota Department of Transportation.
- Buchanan, S. (2007): *Resilient Modulus: What, Why and How?* Report, Vulcan Materials Company.
- Dankó B. (2016): *Stabilizált talajrétegek teherbírásának vizsgálata és annak pályaszerkezeti rétegekre gyakorolt hatása*. MSc diplomamunka. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar.
- Durham, G. N., Marr, W. A., De Groff, W. L. (2003): *Resilient Modulus Testing for Pavement Components*. ASTM STP 1437.
- Primusz P., Tóth Cs., Pethő L. (2016): *Alternatív méretezési eljárásokra vonatkozó tanulmány és az alternatív módszerek bevezetését segítő irányelv*. Tanulmány
- Qiu, X., Yang, Q., Wang, B., Luo, X. (2014): *Prediction model of dynamic resilient modulus of cohesive subgrade soil based on triaxial test system*. Key Engineering Materials Vols. 579–580, pp. 873–876.
- SAS, W., Gluchowski, A., Szymanski, A., (2012): *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 Reclamatoin No44.
- Szendefy J. (2009): *A hazai talajok szerkezetének és teherbírásának változása meszes talajstabilizáció hatására*. PhD-dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar.
- Szendefy J. (2014): *ViaCalcóval kezelt talajok laboratóriumi vizsgálata*. Geotechnika Konferencia, Ráckeve.
- Szendefy J. (2017): *Kutatási jelentés aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere című tervezői utasítás geotechnikai paramétereinek pontosítására*.
- Vogrig, M. & all. (2003): *A Laboratory Technique for Estimation the Resilient Modulus of Unsaturated Soil Specimens from CBR and Unconfined Compression Test*. 56th Canadian Geotechnical Conference.