



Hidraulikus kötőanyaggal stabilizált talajok teherbírásának értékelése ciklikus CBR-vizsgálattal

Primusz Péter¹, Kisfaludi Balázs¹, Péterfalvi József¹

¹ Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet
e-mail: primusz.peter@uni-sopron.hu; kisfaludi@gmail.com; peterfalvi.jozsef@uni-sopron.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.02

Kivonat Opiyo 1995 kidolgozta a ciklikus CBR- (cCBR) eljárásnak nevezett módszert annak érdekében, hogy a szemcsés útépitési anyagok reziliens modulusát (M_r) a CBR-vizsgáló berendezéssel meg lehessen határozni. A jelen kutatásban a cCBR-eljárást mész-cement keverékkel stabilizált iszapos homokliszt talajokon teszteltük. A vizsgálathoz 18 db 3, 5 és 7%, 70–30 arányú mész-cement keverék hozzáadásával próbatestet készítettünk 10–22% tervezett kiindulási víztartalom mellett. A minták teherbírásának kifejezésére három mérőszámot használtunk: 1. az általánosan használt CBR% érték, 2. a cCBR-vizsgálat eredményeként meghatározott terhelőerő és rugalmas alakváltozás függvényében kiszámított M_r -érték, illetve 3. a CBR-értékből számított reziliens modulus. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a kiindulási víztartalom nagyobb hatással volt a teherbírásra, mint a kötőanyag adagolás. A cCBR eljárást könnyen kivitelezhetőnek találtuk. A vizsgálat eredményeit az Opiyo, illetve a Molenaar által kidolgozott képlet segítségével lehet átszámítani reziliens modulus értékre. Az Opiyo-képlettel kapott M_r -értékek az irodalomban a hasonló talajokra megadott értékhatárokon belülre estek. A CBR-értékből számított reziliens modulus értékek igen nagy szórást mutattak. Webb és Campbell, valamint Uzan képlete a Molenaar-képlettel számított reziliens modulusokhoz hasonló eredményt adott.

Kulcsszavak ciklikus CBR, reziliens modulus, teherbírás, analitikus méretezés, talajstabilizáció

Evaluating the bearing capacity of hydraulic road binder treated soils by the cyclic CBR method

Abstract The cyclic CBR (cCBR) method was developed by Opiyo (1995) in order to determine the resilient modulus (M_r) of unbound road construction materials with the standard CBR machine. In this research, the cCBR method was applied to lime-portland cement stabilized silty sand soils. 18 soil samples were produced with 70–30% lime-cement binder, 10–22% water content and 3%, 5% and 7% binder dosage. The bearing capacity of the treated soils was expressed by three metrics: 1) the classic CBR% value, 2) the resilient modulus calculated based on the force and elastic deformation resulted from the cCBR procedure and 3) the resilient modulus calculated from the CBR% value. It was found that the water content had greater effect on the bearing capacity than the binder dosage. The cCBR method proved to be an easy-to-use evaluation tool. The results of the test were transformed into resilient modulus value by the equations presented by Opiyo or by Molenaar. The calculated M_r values by Opiyo corresponded well with the M_r values derived from the literature. The resilient modulus values calculated from the CBR showed great variance. The results of the equations of Webb & Campbell and Uzan corresponded well with the modulus calculated with the Molenaar equation.

Keywords cyclic CBR, resilient modulus, bearing capacity, analytical pavement design, soil stabilization

Dr. Primusz Péter

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.

Dr. Kisfaludi Balázs

2019 februárjáig a Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa volt. Elsődlegesen erdészeti utak forgalomelemzésével foglalkozott, emellett részt vett talajstabilizációval, illetve úthálózatok vizsgálatával foglalkozó kutatásokban.

Dr. habil Péterfalvi József

Soproni Egyetem (SOE), Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Erdőfeltárási Tanszék. Fő szakterület: erdőfeltárási, erdészeti utépítés. Oktatott tárgyak: Erdészeti utak tervezése és építése, Feltáráshálózatok tervezése, Erdészeti utak számítógépes tervezése, Infrastruktúra és közlekedés. Az Erdészeti utak tervezési irányelveinek egyik kidolgozója. Szakmai gyakorlati tevékenység: részvétel több mint 130 km erdészeti, 8,6 km kerékpárút tervének kidolgozásában, több mint 20 szakértés.

Háttér

A nem aszfaltburkolatú erdészeti feltárási utak komoly kihívás elé állítják az erdőgazdálkodót, hiszen ezeken az utakon a faanyag szállíthatóságát az időjárás nagymértékben befolyásolja. Különösen igaz ez a klímaváltozás fényében, merthogy a fagyos napok száma csökken, aminek következtében a földutak a fakitermelési időszakban szállításra alkalmatlan állapotban vannak. Egy földút hagyományos – makadám vagy aszfalt – burkolattal történő ellátása jelentős anyagi ráfordítást igényel, ami nem minden esetben áll rendelkezésre. Ezért az erdőgazdálkodók folyamatosan keresik azokat a megoldásokat, amelyek segítségével jó ár-érték arányú pályaszerkezetek építhetők, és amelyek jelentősen megnyújtják a forgalmazható időszakot. A pályaszerkezetek építési költségét jelentősen csökkenteni lehet a helyi anyagok felhasználásával. A helyi talajok a fizikai féleségüknek megfelelő kötőanyag hozzáadásával jól megmunkálhatóvá, illetve teherbíróvá tehetők. A közútépítési gyakorlatban a stabilizált helyi talaj teherbírását nem veszik figyelembe, ám az erdészeti utépítésben nagy biztonsággal a pályaszerkezet teherbíró részének tekinthető.

A gazdaságos, alacsony költséggel építhető pályaszerkezetek tervezésére és kivitelezésére különösen nagy figyelmet kell fordítani, hiszen a költségek csökkentését nem varázsszerekkel, hanem precízen meghatározott anyagmennyiségekkel és építési technológiával érik el. Az erdészeti utak közutakéhoz viszonyított alacsony építési költsége általában nem bírja el a magas tervezési költséget. A számítástechnika fejlődésével, illetve az egyre bővülő anyagismerettel azonban a tervezőnek lehetősége nyílik a klasszikus CBR módszer helyett az újszerű, precíz anyagparamétereket felhasználó analitikus, mechanikai alapú pályaszerkezet méretezési módszer használatára. Ez a méretezési eljárás a pályaszerkezetet egymásra helyezett rugalmas lemezekként képzelel el. A lemezrendszer terhelésre adott válaszát a lemezek rugalmasságát le-

író anyagparaméterek, valamint a lemezek közti kapcsolat függvényében lehetséges kiszámítani.

Az analitikus méretezéshez szükséges anyagparaméterek közvetlenül a dinamikus triaxiális vizsgálattal határozhatók meg, ám ez a vizsgálat összetett és drága felszerelést igényel (Araya et al., 2010). Az egyszerűbb vizsgálatok (CBR, Egyirányú nyomóvizsgálat) eredményeinek átszámítását több szerző is megkísérelte, de az átszámított eredmények között nagy eltérések mutatkoztak. Opiyo (1995) kidolgozott egy olyan eljárást, amellyel az egyszerű CBR-vizsgáló berendezést felhasználva vizsgálható a talajminták rugalmas viselkedése. Az ciklikus CBR-eljárásnak nevezett módszer nagyban hozzájárulhat ahhoz, hogy a stabilizációs pályaszerkezetek mechanikai alapú méretezése költséghatékonyan elvégezhető legyen.

A ciklikus CBR-eljárás hazai talajok stabilizálhatóságának mérésében történő alkalmazhatóságára indított kísérlet-sorozat első eredményeit mutatja be a jelen tanulmány.

Irodalmi áttekintés

A hazai közúti pályaszerkezet méretezési gyakorlat a típus-pályaszerkezetek rendszerére épül, az erdészeti úttervezésben pedig a CBR-alapú módszer terjedt el. A talaj teherbírását a CBR-értékkel veszik figyelembe. Ez az érték egy viszonyszám, amely megmutatja, hogy egy etalonnak tekintett zúzottkő pályaszerkezeti réteg teherbírásához képest a vizsgált anyag mekkora teherbírású. A teherbírást azzal az erővel jellemzik, ami ahhoz szükséges, hogy egy 50 mm átmérőjű fém hengert 1,27 mm/s sebességgel 2,5 mm mélységben az előírás szerint elkészített talajmintába nyomjunk. A mért erőből az (1) képlet segítségével számítható a CBR-érték. A vizsgálat elvégzéséhez egy terhelő keretre, valamint egy erő-, illetve egy elmozdulásmérőre van szükség. Ezek az eszközök a legtöbb talaj-, illetve útlaborban rendelkezésre állnak, és használatuk rutinszerűen történik.

$$CBR\% = 100 - \frac{F_{2,5}}{13,2} \quad (1)$$

ahol: $F_{2,5}$ = a 2,5 mm benyomódáshoz szükséges erő (kN).

2016-ban Magyarországon is kidolgozásra került egy alternatív pályaszerkezet méretezési eljárás (Primusz és Tóth, 2018), amely lehetővé teszi a mechanikai alapú méretezést. Ehhez bemenő paraméterként a pályaszerkezeti réteg anyagának rugalmassági modulusára van szükség. A dinamikus terhelés mellett figyelembe vehető rugalmassági modulusra (E) a reziliens modulus (M_r) ad jó becslést. A reziliens modulus a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás arányaként írható fel, amelynek mértéke függ az oldalirányú nyomástól (Back és Szendefy, 2017). A feszültségállapot mellett, a reziliens modulus értékét a földmű víztartalma és hőmérséklet eloszlása is jelentősen befolyásolja, melynek számítására már több módszert is kidolgoztak (Pap M, Mahler A és Tóth Cs, 2017).

A reziliens modulus közvetlen meghatározása dinamikus triaxiális vizsgálóberendezéssel történik. A vizsgálat alatt a mintát állandó cellanyomás mellett ciklikus, gyors (0,1 mp), tengelyirányú terhelésnek teszik ki. Ezzel a pályaszerkezet valós igénybevételét lehet modellezni, ahol a gyorsan mozgó járművek hasonlóan rövid ideig terhelik a szerkezet egy adott pontját. A vizsgálatához használt berendezés költséges, használata összetettebb, mint a CBR-vizsgáló berendezésé, ezért alkalmazása annál kevésbé elterjedt.

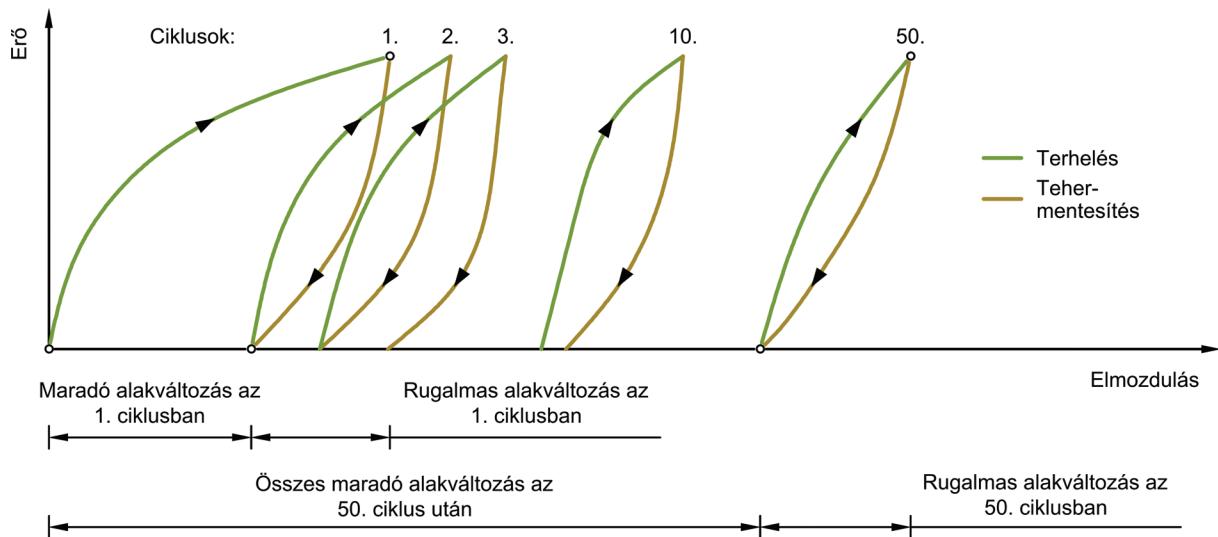
A mechanikai alapú méretezéshez szükséges reziliens modulus meghatározására kézenfekvő eljárásnak tűnt összefüggést keresni a könnyen meghatározható CBR és a reziliens modulus (M_r) értéke között. A kutatók több modellt is kidolgoztak, amelyek segítségével a CBR-érték átszámítható reziliens modulus értékre. Háromféle modell alkalmazása terjedt el: lineáris (Heukelom és Klomp, 1962;

Ohio DOT, 2008), hatványos (Green és Hall, 1975; Hopkins, 1994; Paterson és Maree, 1978; Powell et al., 1984; Uzan, 1985; Webb és Campbell, 1986) és polinomiális (Kenya Road Design Manual, 1987; Mukabi, 2016). Az átszámítási képleteket az 1. táblázat mutatja be. Fontos kiemelni, hogy a modellek alkalmazását meghatározott talajokra és CBR tartományokra javasolják, illetve hogy a használatukkal nyert reziliens modulus értékek esetenként nagy szórást mutatnak (Back és Szendefy, 2017).

A klasszikus CBR-vizsgálat egy terhelése alatt a vizsgált minta plasztikus és rugalmas alakváltozást is szenved, ezért Opiyo (1995) feltételezte, hogy ebből az egy értékből nem lehet tisztán a rugalmas tulajdonságokra következtetni, vagyis a CBR-érték nem számítható át megbízhatóan rugalmassági modulusra. Ezért 1995-ben kidolgozta a ciklikus CBR-vizsgálat módszerét azzal a céllal, hogy a talajok, illetve szemcsés útépitési anyagok rugalmassági modulusát egyszerű, már meglévő eszközökkel lehessen meghatározni. A vizsgálatot más kutatók sikerrel alkalmazták kötött talajokra és stabilizált talajokra is (Sas et al., 2012; Sas és Głuchowski, 2013). A CBR-vizsgálat első lépcsője (2,5 mm benyomódás, 1,25 mm/perc sebességgel) után további teherismétléseket javasolt. Az ismétléseket az első lépcsőben elért maximális terheléssel kell elvégezni. Az ismételt terhelések hatására az anyag egyre kisebb maradó alakváltozást szenved. A teherismétlési ciklusokat elméletileg addig kellene folytatni, amíg a minta már csak rugalmas alakváltozást mutat. A gyakorlatban megfelelő, ha az utolsó 5 ciklus együttes, maradó alakváltozása kisebb, mint a teljes maradó alakváltozás 2%-a. Ez az állapot jellemzően 50–100 teherismétlés után alakul ki (Araya, 2011; Molenaar, 2011). A rugalmas alakváltozást jól jellemzi az utolsó terhelési ciklusban mért alakváltozás, valamint az ezt kiváltó erő (1. ábra).

1. táblázat. Különböző átszámítási képletek CBR-ről reziliens modulusra

A modell típusa	A modell kidolgozója	Átszámító képlet	Ajánlott CBR tartomány
Lineáris	(Heukelom és Klomp, 1962)	$M_r = 10,340 \cdot CBR$	10–20
	(Ohio DOT, 2008)	$M_r = 8,274 \cdot CBR$	
Hatványos	(Green and Hall, 1975)	$M_r = 37,268 \cdot CBR^{0,711}$	2–200
	(Paterson és Maree, 1978)	$M_r = 20,670 \cdot CBR^{0,65}$	
	(Powell et al., 1984)	$M_r = 17,616 \cdot CBR^{0,64}$	2–12
	(Uzan, 1985)	$M_r = 91,226 + 0,017 \cdot CBR^2$	
	(Webb és Campbell, 1986)	$M_r = 21,470 \cdot CBR^{0,478}$	
	(Hopkins, 1994)	$M_r = 17,914 \cdot CBR^{0,874}$	
Polinomiális	(Kenya Road Design Manual, 1987)	$M_r = 0,0162 \cdot CBR^3 - 0,5454 \cdot CBR^2 + 10,062 \cdot CBR$	
	(Mukabi, 2016)	$M_r = 0,0022 \cdot CBR^3 - 0,1273 \cdot CBR^2 + 6,4261 \cdot CBR$	<170



1. ábra. A ciklikus CBR-vizsgálat sematikus erő-elmozdulás grafikonja

Ez a két változó, valamint néhány segédparaméter ismeretében több egyenletet is kidolgoztak a kutatók a reziliens modulus meghatározására. *Opiyo* (1995) eredeti összefüggését a (2) egyenlet mutatja be, míg *Molenaar* (2011) a (3) egyenletet állította fel.

$$E = \frac{\sigma d}{u d} \left[\frac{d(L-H)}{D} \right] \quad (2)$$

ahol: E : modulus (reziliens) (MPa)
 σ : átlagos nyomófeszültség (MPa)
 d : a terhelő felület átmérője (mm)
 u : rugalmas alakváltozás (mm)
 L : a minta magassága (mm)
 H : a kúpos rész magassága (mm)
 D : a minta átmérője (mm)

A fenti összefüggésben használt változók pontos értelmezését a 2. ábra segíti.

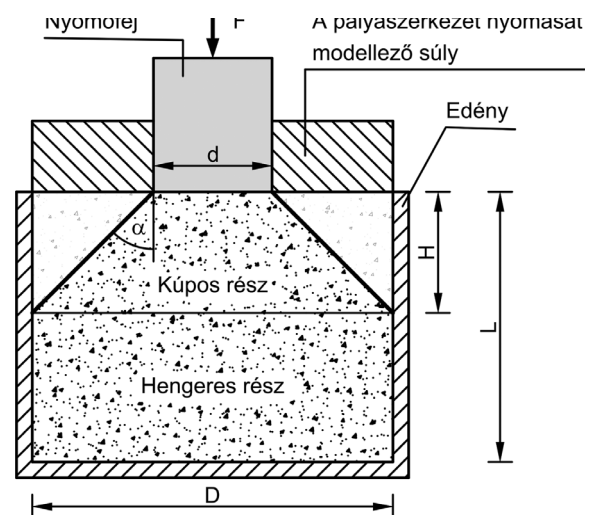
$$E_{equ} = \frac{1,513(1-\nu^{1,104})\sigma_p \cdot a}{u^{1,012}} \quad (3)$$

ahol: E_{equ} : ekvivalens modulus (MPa)
 ν : Poisson szám (-)
 σ_p : átlagos nyomófeszültség (MPa)
 u : Rugalmas alakváltozás (mm)
 a : A terhelő felület sugara (mm)

Anyag és Módszer

Mintaterület

A teherbírás-vizsgálatokat egy átfogó kutatás keretében végeztük, amihez az EGERERDŐ Zrt. biztosított helyszínt. A cég Parádfürdői Erdészetének terü-



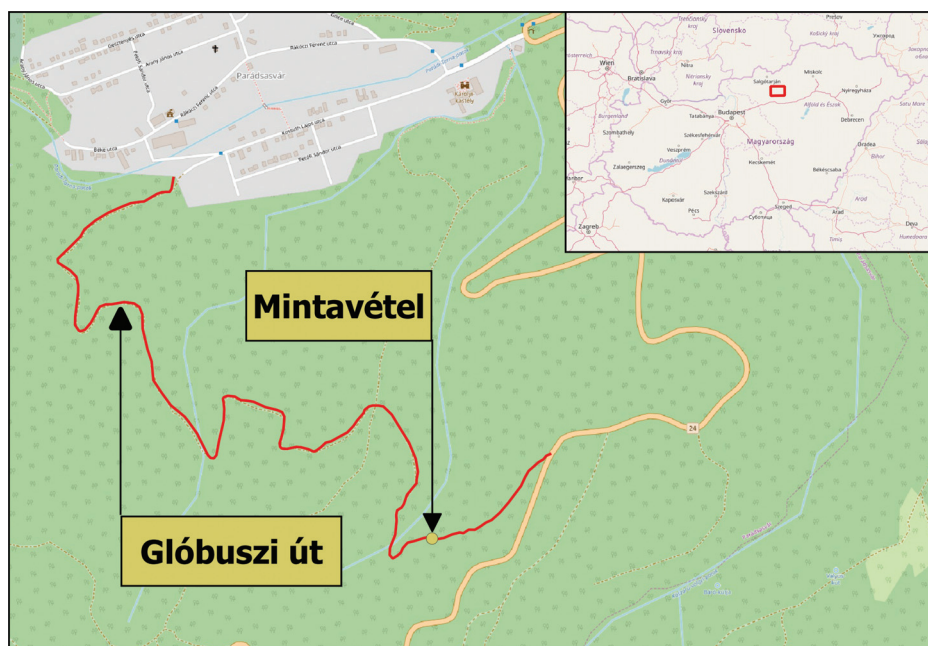
2. ábra. A ciklikus CBR vizsgálat feldolgozásánál használt méretek értelmezése (*Opiyo*, 1995)

(<http://utugyilapok.hu/wp-content/uploads/2015/11/Analitikus-TU.pdf>)

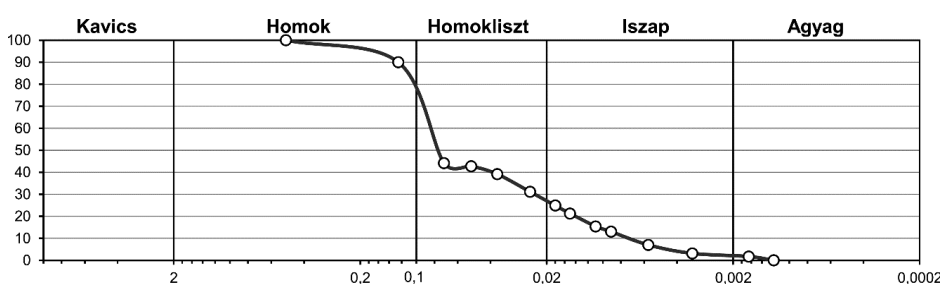
letén jellemzően kötött talajok találhatók, amelyek az útpépítés szempontjából kedvezőtlen körülményt jelentenek. A talajok stabilizálhatóságát egy konkrét, problémás út – „Glóbuszi” erdészeti feltáróút – mintáján demonstráltuk. Az út közvetlen közeléből, a humuszos réteg alatti réteg felső 50 cm vastag sávjából mintegy 300 kg talajmintát vettünk. A mintavétel pontos helye (3. ábra) AZ EOY koordinátákkal megadva: Y=284495,4; X=720066,5.

A vizsgált talaj

A talajon elvégeztük a talajazonosításhoz szükséges talajmechanikai vizsgálatokat. A talaj folyási



3. ábra. A talajmintavétel helye



4. ábra. A vizsgált talaj szemeloszlási görbéje

határa (W_L) 40,71%, a sodrási határa (W_P) 22,85%, a plasztikus indexe (IP) 17,86%-ra adódott. A talaj szemeloszlási görbéjét a 4. ábra mutatja be. A plasztikus index alapján a vizsgált talajt sovány agyagként azonosítottuk, míg a szemeloszlási gör-

talmazó kötőanyagot a Carmeuse Hungária Kft. biztosította. A talajkeverékekből széthyitható CBR edényekben (átmérő = 150 mm, magasság = 114 mm) edényekben mintákat készítettünk. A keveréket öt rétegen, rétegenként 25 ütessel Proctor-féle

be szerint az iszapos homokliszt kategóriába került. A talaj 15,8% víztartalom mellett tömöríthető legjobban, maximális halomsűrűsége $1,81 \text{ g/cm}^3$. Az irodalmi adatok alapján a talaj várható reziliens modulus értéke 60–100 MPa érték körül alakul (Drumm et al., 1990; Bandara és Rowe, 2003).

Próbatestek készítése

A vizsgálathoz a talajmintát levegőn szárítással és darálással készítettük elő. Az előkészített talajból 18 féle keveréket készítettünk a 2. táblázat szerinti kötőanyag és víz adagolásával. A talaj szemcseösszetétele alapján kötőanyagként mész, illetve mész-cement keverék jöhetett szóba. Az előzetes, három nap pihenés után végzett vizsgálatok szerint a mész-cement keverékkel kezelt talajok teherbírása 15–20%-kal magasabb, ezért ezzel a kötőanyaggal készítettük a próbatesteket. A vizsgálathoz szükséges, 70% mész és 30% cementet tartalmazó kötőanyagot a Carmeuse Hungária Kft. biztosította. A talajkeverékekből széthyitható CBR edényekben (átmérő = 150 mm, magasság = 114 mm) edényekben mintákat készítettünk. A keveréket öt rétegen, rétegenként 25 ütessel Proctor-féle

2. táblázat. Kísérleti talaj-kötőanyag keverékek

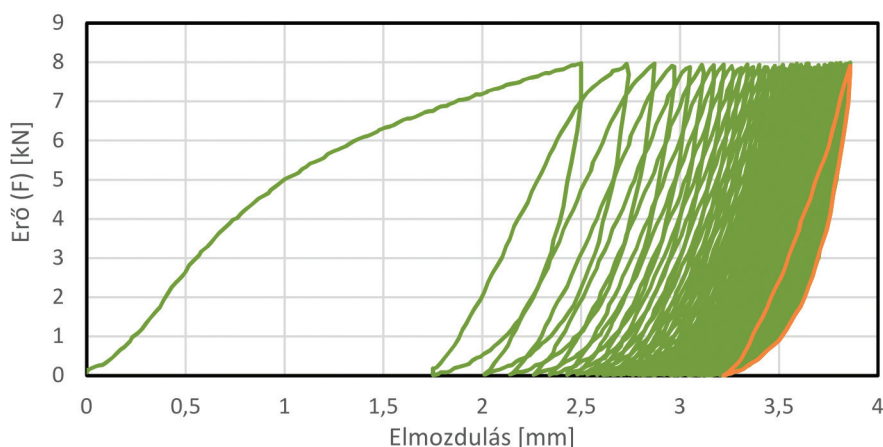
Minta száma #	Kötőanyag	Kötőanyag-adagolás (m/m %)	Mért víztartalom (m/m %)	Minta száma #	Kötőanyag	Kötőanyag-adagolás (m/m %)	Mért víztartalom (m/m %)
MC1	70% mész, 30% cement	3	10,0	MC10	70% mész, 30% cement	5	16,3
MC2		3	12,8	MC11		5	18,8
MC3		3	15,3	MC12		5	21,4
MC4		3	16,4	MC13		7	7,9
MC5		3	17,8	MC14		7	10,3
MC6		3	20,7	MC15		7	12,5
MC7		5	8,9	MC16		7	15,7
MC8		5	12,0	MC17		7	20,1
MC9		5	14,0	MC18		7	22,7

tömörítőgépben tömörítettük be az edényekbe. Az edényből kivett mintákat párazáró csomagolásban 28 napig állni hagytuk.

Ciklikus CBR vizsgálat

A pihentetés után a CBR mintákat visszatettük az edénybe, majd Multiensayo univerzális terhelő berendezés segítségével egy 1,25 mm/perc sebességgel mozgó, 50 mm átmérőjű acél hengerrel terheljük a készítés kori felső síkot, 2,50 mm mélységű behatolásig. Tehermentesítés után a benyomáshoz szükséges maximális erővel 50 teherismétlést alkalmaztunk. A vizsgálat alatt rögzítettük a terhelő fej elmozdulását és az elmozduláshoz szükséges erőt.

Az első ciklusban mért maximális erő alapján az (1) képlet segítségével számítottuk ki a minták CBR% értékét. Az utolsó ciklusban mért alakváltozás és a terhelő erő függvényében a (2) képlettel az Opiyo féle, míg a (3) képlettel a Molenaar-féle ekvivalens moduluszt számítottuk.



5. ábra. Az MC3 minta ciklikus CBR vizsgálatának erő-elmozdulás grafikonja

CBR átszámítása M_r -értékre

A szakirodalom több olyan képletet is bemutat, amelyekkel a CBR érték a szerzők szerint átszámítható reziliens modulus értékévé. A kísérleti eredményeken elvégeztük ezeket az átszámításokat annak érdekében, hogy össze lehessen vetni a rugalmassági paramétereket is figyelembe vevő képletek eredményeivel. Az 1. táblázatban bemutatott tíz féle képlettel számítottuk az M_r várható értékét.

Eredmények

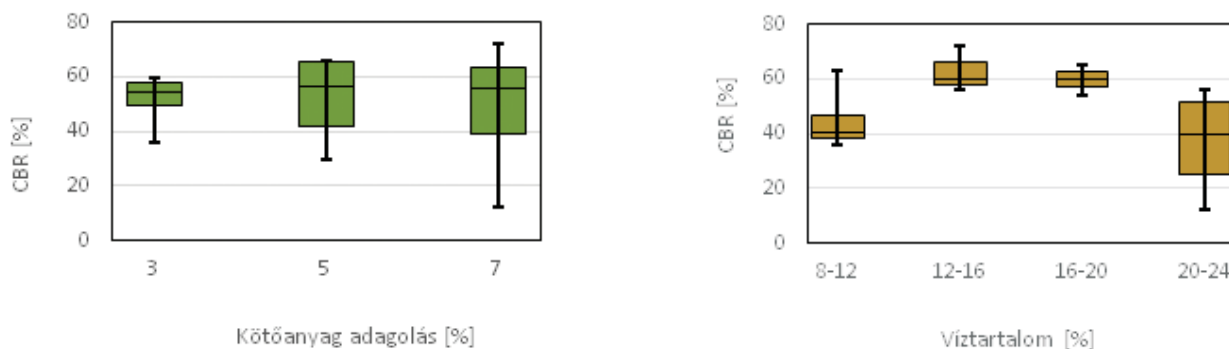
A ciklikus terhelés hatására a szakirodalomnak megfelelő erő-elmozdulás grafikon rajzolódott ki (5. ábra) a minták vizsgálatakor. A példán látható, hogy a vizsgált anyag mintegy 3 mm maradék, és 0,5 mm rugalmas alakváltozást szenvedett az 50. ciklus végén.

A mért CBR, illetve a kétféle összefüggéssel számított M_r - értékeket a 3. táblázat tartalmazza. A minták CBR-értékei 13 és 80 CBR% között változtak, az átlagos CBR-érték 53,9 CBR% (szórás: 16,3%) volt. Az Opiyo szerint számított reziliens modulusok átlaga 44,2 MPa (szórás: 13,1 MPa), a Molenaar-féle számítás szerinti átlaga 157,6 MPa-ra (szórás: 46,9 MPa) adódott.

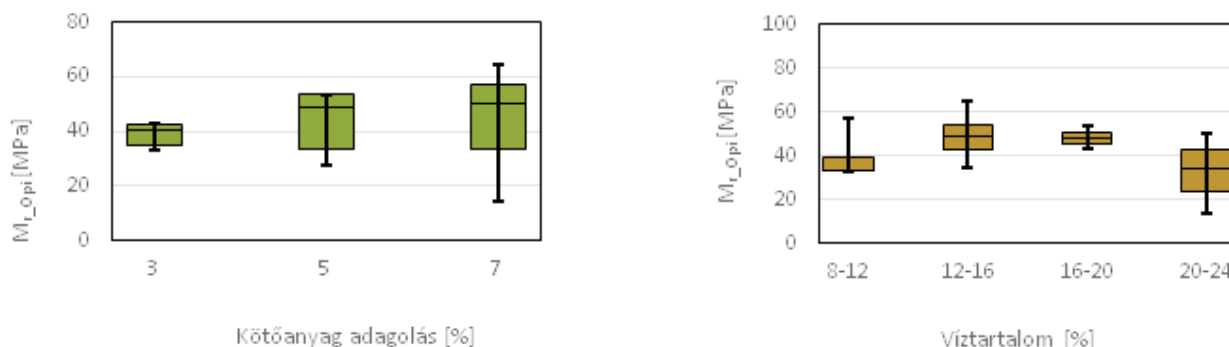
A kísérletben feltételeztük, hogy a stabilizáció teherbírása függ a kötőanyag típusától, a kötőanyag adagolástól, illetve a talaj víztartalmától. Az erre vonatkozó eredményeket a 6. ábra és a 7. ábra

3. táblázat. A talajkeverékek számított CBR értékei, valamint az Opiyo, illetve Molenaar képlettel számított egyenértékű modulusai

Minta #	CBR (%)	Mr_Opi (MPa)	Mr_Mole (MPa)	Minta #	CBR (%)	Mr_Opi (MPa)	Mr_Mole (MPa)
MC1	36,0	33,0	117,5	MC10	71,3	54,8	196,6
MC2	59,9	42,9	152,3	MC11	65,4	53,5	190,3
MC3	58,1	34,6	122,4	MC12	29,8	27,3	97,2
MC4	58,8	44,6	160,0	MC13	39,3	33,3	118,6
MC5	54,3	42,9	152,4	MC14	63,3	56,9	202,4
MC6	49,8	40,7	144,8	MC15	72,0	64,7	230,3
MC7	41,7	33,5	119,2	MC16	80,3	63,5	239,3
MC8	56,3	53,7	191,4	MC17	55,8	50,1	178,4
MC9	66,1	48,8	173,4	MC18	12,6	14,1	50,4



6. ábra. A keverékek CBR-értéke a kötőanyag-adagolás függvényében



7. ábra. A keverékek M_r -értéke a víztartalom függvényében

mutatja be. A box-plot ábrák alapján az látszik, hogy a kötőanyag adagolás nagysága csak kis mértékben befolyásolta a minták átlagos CBR-, illetve M_r -értékeit. Ezt erősítik meg a 4. táblázat korrelációs adatai is. Ezzel szemben úgy tűnik, hogy a talaj víztartalma nagyobb hatással van a teherbírásra. A 6. ábra alapján a mintákra megadható egy, a CBR,

illetve az M_r -érték szempontjából optimálisnak tekinthető víztartalom.

A számított M_r -értékeket megvizsgálva szembevető, hogy a két adatsor között szoros összefüggés van (4. táblázat), ám a Molenaar-féle képlet háromszor magasabb értéket ad, mint az eredeti, Opiyo-féle. A két összefüggést különböző talajra és

4. táblázat. Korreláció a vizsgált változók között

W_{terv}	$W_{mért}$	Alakv.	$F_{2,5}$	F/alak	$CBR_{2,5}$	M_{r_Opi}	M_{r_Mol}	MC
0,00	-0,05	-0,58	-0,08	0,16	-0,08	0,16	0,16	B
	0,65	0,12	0,11	0,03	0,11	0,03	0,03	W_{terv}
		-0,16	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27	$W_{mért}$
			0,47	0,09	0,47	0,09	0,09	Alakv.
				0,92	1,00	0,92	0,91	$F_{2,5}$
					0,92	1,00	1,00	F/alak
						0,92	0,91	$CBR_{2,5}$
							1,00	E_{Opi}
								E_{Mol}

B: kötőanyag adagolás (%), W_{terv} : tervezett víztartalom (%), $W_{mért}$: valós víztartalom (%), Alakv: rugalmas alakváltozás az 50. ciklusban (mm), $F_{2,5}$: a 2,5 mm behatoláshoz szükséges erő (kN), F/alak: az $F_{2,5}$ és az alakváltozás hányadosa (-), $CBR_{2,5}$: a minta mért CBR értéke (%), M_{r_Opi} : Az Opiyo-féle képlettel számított reziliens modulus (MPa), M_{r_Mol} : A Molenaar-féle képlettel számított reziliens modulus (MPa)

edényméretre dolgozták ki, ami magyarázatot adhat az eltérő eredményre. Az *Opiyo*-féle képlettel számított modulusok nagyságrendje közelebb áll a vizsgált talaj irodalom alapján becsült modulusához (60–100 MPa).

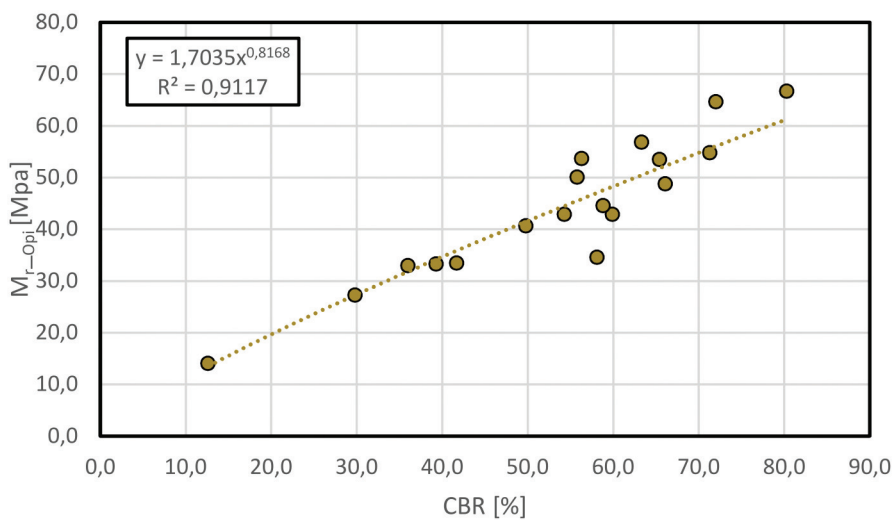
A kísérletsorozattal célunk volt annak vizsgálata is, hogy a CBR és a reziliens modulus értéke között található-e összefüggés. A 8. ábra a mért CBR-értékeket és a hozzájuk tartozó, *Opiyo*-féle képlettel számított reziliens modulus értékeket mutatja. A talajminták CBR értékének növekedésével a reziliens modulus értékek is nőnek. A pontokra illesztett lineáris, illetve hatvány modell R_2 -értéke

(0,86, illetve 0,91) is szoros összefüggést feltételez.

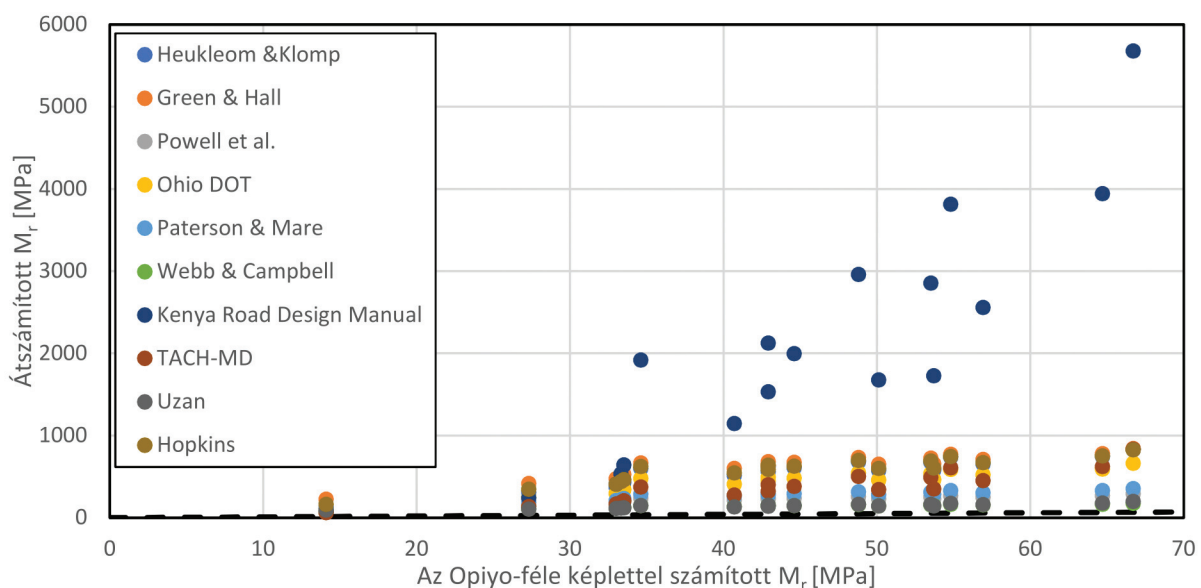
Az 1. táblázatban bemutatott összefüggésekkel kiszámítottuk a mért CBR értékekből becsült reziliens modulus értékeket (9. ábra). Azt tapasztaltuk, hogy a képletek eredményei jelentős szórást mutatnak, valamint, hogy az *Opiyo*-féle képlethez képest a CBR-ből számított reziliens modulusok jelentősen nagyobbak. Ezzel szemben volt olyan átszámító képlet, amelynek eredménye a Molenaar-féle képlettel számított M_r -értékekkel jó egyezést mutatott. A 45°-os egyeneshez Uzan, valamint *Webb* és *Campbell* (10. és 11. ábra) modellje áll a legközelebb. Az így számított M_r értékek legalább kétszer magasabbak, mint az *Opiyo*-képlettel számított reziliens modulus értékek, ellenben a *Molenaar*-féle képletből kapott eredményekkel nagyságrendileg megegyeznek.

Következtetések

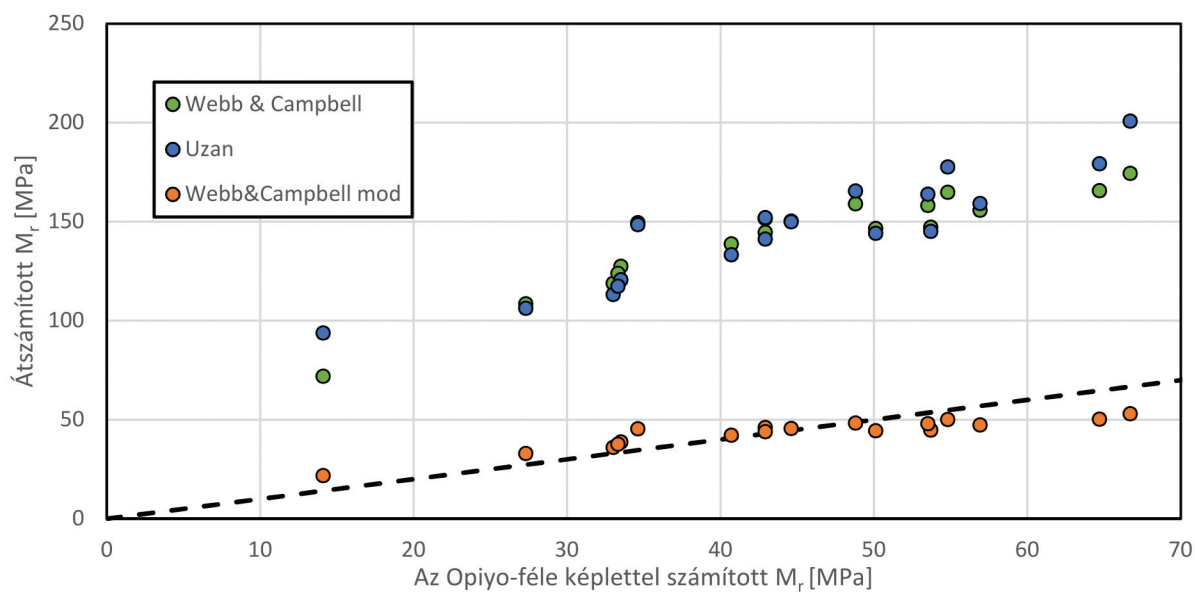
Az eredmények azt mutatják, hogy a vizsgált talajstabilizációk teherbírására nagyobb hatással volt a készítéskori víztartalom, mint a kötőanyag adagolás. Ezen felül megadható volt az optimális víztartalom, ahol a CBR, illetve az M_r értéke a legmagya-



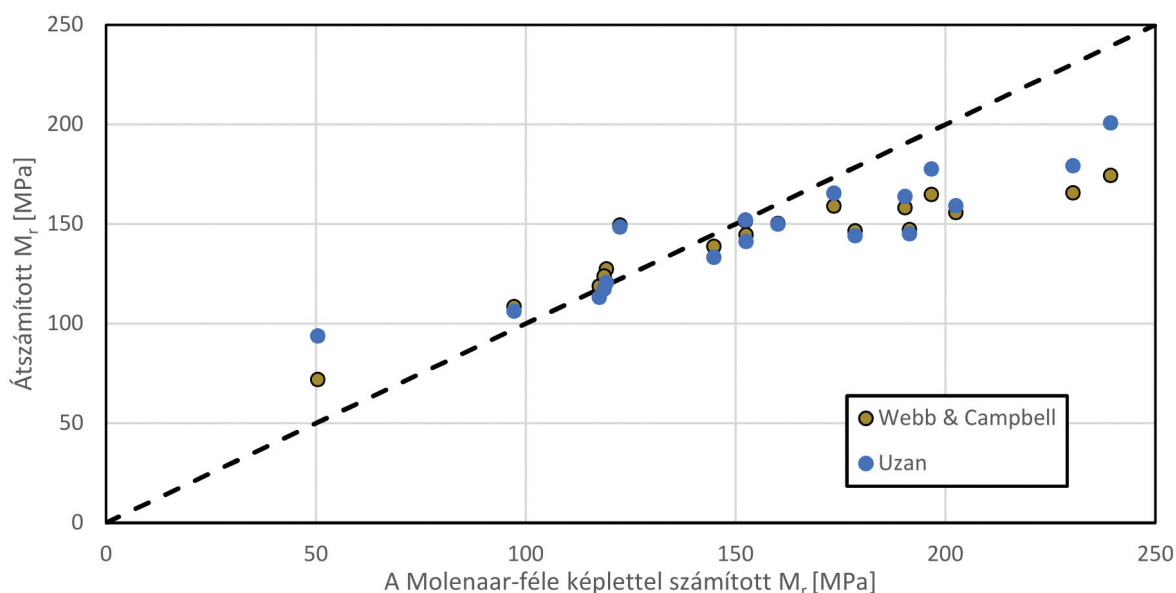
8. ábra. Összefüggés a CBR és a számított M_r értékek között kötőanyag szerinti bontásban



9. ábra. A különböző CBR átszámítási képletekkel kapott M_r -értékek összehasonlítása az *Opiyo*-féle képlettel számított értékekkel



10. ábra. A *Webb és Campbell* (1986), valamint az *Uzan* (1985) által javasolt képlettel számított M_r -értékek összehasonlítása az *Opiyo*-féle képlettel számított értékekkel



11. ábra. A *Webb és Campbell* (1986), valamint az *Uzan* (1985) által javasolt képlettel számított M_r -értékek összehasonlítása a *Molenaar*-féle képlettel számított értékekkel

sabb volt. Néhány kísérletből hosszútávú következtetéseket nem szabad levonni, ám az eredmények alapján a stabilizációk készítésénél a talaj víztartalmának optimális értéken tartása a teherbírás szempontjából fontosabb, mint a kötőanyag pontos adagolása.

A ciklikus CBR-vizsgálat ígéretes eljárásnak látszik a stabilizációk rugalmas viselkedésének meghatározására, hiszen a vizsgálat a meglévő CBR-vizsgáló berendezéssel könnyen elvégezhető, és az eredményekből a reziliens modulus számítható. *Opiyo* képletével (2) a szakirodalom alapján várt reziliens modulus értékekhez nagyságrendileg hasonló reziliens modulus értékeket számítottunk,

míg *Molenaar* képlete (3) az irodalomban fellelt $CBR-M_r$ átszámító képletek eredményével adott nagyságrendileg azonos eredményt. *Back és Szendefy* (2017) triaxiális mérésből származó reziliens modulusokkal összehasonlítva kimutatta, hogy az átszámító képletek jelentősen túlbecsülik a reziliens modulus valós értékét. Emiatt az *Opiyo*-féle képlet eredményeit a valósághoz közelebb állónak feltételezzük, és a további vizsgálatokig ennek alkalmazását javasoljuk.

A CBR értékből a 9. ábra tanúsága szerint nem számítható nagy biztonsággal a reziliens modulus értéke. A számítások azt mutatták, hogy az egyik legjobban illeszkedő modellt *Webb és Campbell*

(1986) dolgozta ki, ami összecseng a *Back és Szendefy* (2017) által bemutatott eredményekkel. Ezért a reziliens modulus durva becslésére ezt az összefüggést javasoljuk. A mérési adatok alapján a képlet eredményét a 11. ábra szerint szorozni kellene 0,3-del ahhoz, hogy a jelen kísérletben az Opiyo-féle képlettel meghatározott reziliens modulus értéket kapjuk. Ezt a módosítást azonban nem érdemes alkalmazni, hiszen az *Opiyo-féle* képletből számított reziliens modulus jóságának ellenőrzésére nem áll rendelkezésre mérési adat.

További kutatás

A ciklikus CBR-vizsgálat eredményeiből számított reziliens modulus értékek nagyságrendileg a várakozásoknak megfelelően alakultak, illetve a keverék tulajdonságainak változásával a számított modulus értékek is többé-kevésbé szabályosan változtak. Célszerűnek tartjuk a bemutatott keverékek dinamikus triaxiális vizsgálatát elvégezni annak érdekében, hogy a kétféle számítás közül ki lehessen választani a jobban használhatót, esetleg fel lehessen írni egy, az előzőeknél pontosabban illeszkedő modellt.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a „Soproni Egyetem Struktúraváltási Terve” – 32388-2/2017 INTFIN sz. projekt keretében az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával valósult meg. A tanulmányban bemutatott vizsgálatokhoz és elemzésekhez a talajt az Egererdő Zrt., a kötőanyagot a Carmeuse Hungária Kft. biztosította.

Felhasznált irodalom

- Araya A, Molenaar AAA, Houben L. A Realistic Method of Characterizing Granular Materials for Low-Cost Road Pavements. Delft University of Technology, Delft, Netherland, 2010; 10.
- Araya AA. Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements (PhD disszertáció). Delft University of Technology, Delft, Hollandia. 2011.
- Back M, Szendefy J. Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke. *Útgyilapok*. 2017. <http://utgyilapok.hu/cikkek/reziliens-modulus-merese-es-talajstabilizacioknal-mert-erteke/>
- Bandara N, Rowe GM. Design Subgrade Resilient Modulus for Florida Subgrade Soils, in: Durham GN, Marr WA, DeGroof, WL (Eds.), Resilient Modulus Testing for Pavement Components, STP. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003; 274, <https://doi.org/10.1520/STP12524S>
- Drumm EC, Boateng-Poku Y, Johnson Pierce T. Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. *J. Geotech. Eng.* 1990; 116:774–789. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1990\)116:5\(774](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1990)116:5(774)
- Green JL, Hall JW. Nondestructive vibratory testing of airport pavements. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1975.
- Heukelom W, Klomp AJG. Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction. Presented at the 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1962; pp. 495–510.
- Hopkins T. Minimum bearing strength of soil subgrades required to construct flexible pavements, in: Proceedings of the 4th International Conference, Bearing Capacity of Roads and Airfields. Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, MN, USA, 1994; pp. 605–617.
- Kenya Road Design Manual, Road design manual, Part III: Materials and pavements design for new roads. Ministry of Transportation and Communications, Nairobi, Kenya. 1987.
- Molenaar AAA. Characterization of unbound base materials for roads using a new developed repeated load CBR test. Presented at the 8th International Conference on Managing Pavement Assets, Santiago de Chile, Chile. 2011.
- Mukabi JN. Review of DCP Based CBR UCS and Resilient Modulus Models for Applications in Highway and Airport Pavement Design. Acad. E-Publ. Pre-Print. 2016.
- Ohio DOT. Pavement Design Manual. The Ohio Department of Transportation, Office of Pavement Engineering, Columbus, Ohio, USA. 2008.
- Opiyo TO. A Mechanistic Approach to Laterite-based Pavements (M.Sc thesis). International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft. 1995.
- Pap M, Mahler A, Tóth Cs. Klimatikus viszonyok hatása a reziliens modulusra I.: Környezeti hatások és talajjellemzők meghatározása, *Útgyilapok* 2017; 5(10):49-57.
- Pap M, Mahler A, Tóth Cs. Klimatikus viszonyok hatása a reziliens modulusra II.: Reziliens modulus meghatározása, *Útgyilapok* 2017; 5(10):58-63.
- Paterson WDL, Maree JH. An interim mechanistic procedure for the structural design pavements. National Institute for Transport and Road Research, Pretoria, South Africa, 1978.
- Primusz P, Tóth Cs. Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése. *Közlekedéstudományi szemle*, 2018; 68(5):17-33. ISSN 0023-4362, <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.5.2>
- Powell WD, Potter JF, Mayhew HC, Nunn ME. The structural design of bituminous roads (No. LR1132). TRRL, Crowthorne, Berkshire, UK. 1984.
- Sas W, Głuchowski A. Rutting prediction for stabilized soils based on the cyclic CBR test. *Roads Bridg. Drogi Mosty* 2013; 411–423, <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.026>
- Sas W, Głuchowski A, Szymański A. Determination of the Resilient Modulus Mr for the Lime Stabilized Clay Obtained from the Repeated Loading CBR Tests. *Ann. Wars. Univ. Life Sci. - SGGW Land Reclam.* 2012; 44. <https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- Uzan J. Characterization of granular material. *Transp. Res. Rec.* 1985; 1022:52–59.
- Webb WM, Campbell BE. Preliminary Investigation into Resilient Modulus Testing for New AASHTO Pavement Design Guide. Office of Materials and Research, Georgia Department of Transportation, Atlanta, GA, USA. 1986.