



Reziliens modulus helyszíni mérési lehetősége SMART-BC műszerrel

Subert András¹, Subert István²

¹ CEO Alltest Műszerfejlesztő Kft., ² CEO Andreas Építőipari Fejlesztő és Szolgáltató Kft.
e-mail: allest-office@gmail.com; mail@andreas.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.05

Kivonat Az alternatív pályaszerkezet méretezés lehetővé teszi az altalaj jellemzőit figyelembe vevő pontos méretezést biztosítva a hosszú élettartamot. Ehhez szükséges a reziliens modulus ismerete. Nagy előny lenne, ha a reziliens modulus helyszíni méréssel is meghatározható lenne, a jelenleg alkalmazott laboratóriumi triaxiális vagy CBR-módszer mellett, vagy a helyett. A SMART-BC mérési módszer továbbfejlesztése alkalmaznak tűnik a reziliens modulus előzetes meghatározására a helyszínen, építés alatti ellenőrzésére és akár önellenőrzésre vagy minősítésre.

Kulcsszavak Reziliens modulus, alternatív pályaszerkezet méretezés, SMART-BC, CWA15846, dinamikus tömörség- és teherbírásmérés, terepi mérések, SP-LFWD, alapozás, K+F+I

Possibility of On-site Measurement of Residual Modulus, Measuring by SMART-BC Instrument

Abstract Alternative pavement structure design allows to taking into consideration the characteristics of the subsoil for the precise scaling, ensuring long pavement life-time. This requires the knowledge of the resilient modulus. It would be a great advantage if the resilient modulus could be determined by a field measurement, in addition to or instead of the current triaxial and CBR laboratory method. The further development of the SMART-BC measurement system seems to be suitable for the preliminary determination of the resilient modulus in site, controlling during construction and even for self-control or qualifying.

Keywords Resilient modulus, alternative pavement design, SMART-BC, CWA15846, dynamic compactness- and bearing capacity test, field measurements, SP-LFWD, foundation, R+D+I

Subert András

Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar Kereskedelem és Marketing Szakos hallgató

Subert István

Okl. ép. mérnök, okl. közlekedésgazdasági mérnök

Bevezető, előzmények

Az útpálya-szerkezetek tervezését jelenleg a hagyományos e-UT06.03.13 (ÚT2-1.202), illetve kisforgalmú utakra e-UT06.03.12 (ÚT2-1.503) szabályozza, mely a tervezett élettartamra számított terheléssel, táblázatból való választással teszi tervezhetővé a típus-pályaszerkezet összetételét, réteg-

rendjét (19, 20). A földmű tetején a minimálisan elvárt teherbírás elvárt értéke $E_2 = 40$ MPa, aminek biztosítása érdekében az e-UT06.03.53. (ÚT 2-3.206) előírás a legkedvezőtlenebb helyen és körülmények között $E_2 \geq 50$ MPa teherbírást ír elő a földmű koronaszintjén. A jelenlegi tervezési módszer használata esetén tehát nem érvényesülhet egy ennél jóval magasabb teherbírási

100–160 Mpa teherbírású javított (stabilizált) földmű előnye, amivel a pályaszerkezetek vastagsága hatékonyan és gazdaságosan lenne csökkenthető. További problémát okoz, hogy a hazánkban előforduló talajok döntő része (adott terepi víztartalommal) nem is tudja az előírt földműteherbírást biztosítani, ezért szemcsés anyagból (pl. homokos kavics, zúzottkő) teherbírást javító réteget kell tervezni és beépíteni. A teherbírás-javítás ugyanakkor gazdaságosan elvégezhető a talajok kötőanyag stabilizálásával is. Ez a technológia egyben lehetővé teszi az $E_2 > 40$ MPa földmű-teherbírást indokolt és műszakilag lehetséges jelentős meghaladását is. A típuspályaszerkezet-méretezés azonban nem teszi lehetővé azt, hogy az 50 Mpa-nál magasabb földmű-teherbírástól származó műszaki előnyöket figyelembe vegyünk. Az útpálya alaprétegei és a burkolati rétegek vastagsága, anyaga, rétegrend összetétele nem változtatható, ezzel egy hatékony műszaki előny veszik el. Ennek a megoldásaként dolgozták ki egy az első magyar alternatív méretezési eljárást (*Pethő, Primusz, Tóth, Karoliny*), amelyek már mindezt figyelembe veszik a pályaszerkezet méretezéskor [2, 12, 16, 26].

A korszerű tervezéséhez azonban szükséges lenne a reziliens modulus helyszíni meghatározására, mely az analitikus méretezés alkalmazását széleskörűen lehetővé tenné. Reziliens modulus (M_r) a rugalmas visszalakulásból számított rugalmassági modulus, mely az alternatív pályaszerkezet méretezéshez szükséges fontos paraméter. Ezt a paramétert jelenleg laboratóriumi mérésekből, zavart mintákból mérve határozzák meg triaxiális vizsgálattal direkt módon [11, 13, 14, 25] vagy CBR-vizsgálattal és átszámítással indirekt módon (10, 15, 21) – erősen különböző pontossággal.

Az alternatív pályaszerkezet méretezési módszer alkalmazása lehetővé tenné a pontosabb méretezést, elkerülhetővé a korai leromlást, kezelve a lokális problémákat és biztosítva a hosszú és teljes szakaszon homogén élettartamot.

Számos külföldi és hazai cikk foglalkozik az alternatív pályaszerkezet méretezéssel és a reziliens modulus meghatározásával, alkalmazásával. Hazai cikkek közül kiemelendő *Szendefy, Back* és *Primusz, Tóth* cikke [1, 22, 23, 24]. Külföldi cikkek sokasága foglalkozik ezzel a témával [3, 4, 5, 6, 7, 10, 11], felvetve, hogy ejtősúlyos nagytárcsás mérési módszer alkalmazása is eredményes lehet az M_r reziliens modulus meghatározására [9, 30]. Mindezen összefüggéseknél azonban a közreadott regressziós együtthatók nem megnyugtatók.

A pályaszerkezet-tervezés kritikus pontja lett annak meghatározása, hogy a fogadóréteg teherbírása, hajlékonysága milyen, az élettartama alatt a rá helyezett alap- és aszfaltrétegek milyen hajlítóhúzó igénybevételeket kapnak, melyeket el kell vi-

seljenek károsodás, fáradási repedés, illetve deformáció nélkül [2, 16, 24, 26].

Minden tehát az alapoknál kezdődik, azaz a földmű és a szemcsés rétegek, kötőanyag, vagy kötőanyag nélküli alaprétegek jellemzőin múlik, így annak reziliens modulusán. A földmű tetején a minimálisan elvárt teherbírás $E_2 = 40$ MPa értékben van megadva, aminek biztosítása érdekében az eUT06.03.53. (ÚT 2-3.206) 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 teherbírású földmű előnye, amivel a pályaszerkezetek vastagsága hatékonyan csökkenthető lenne.

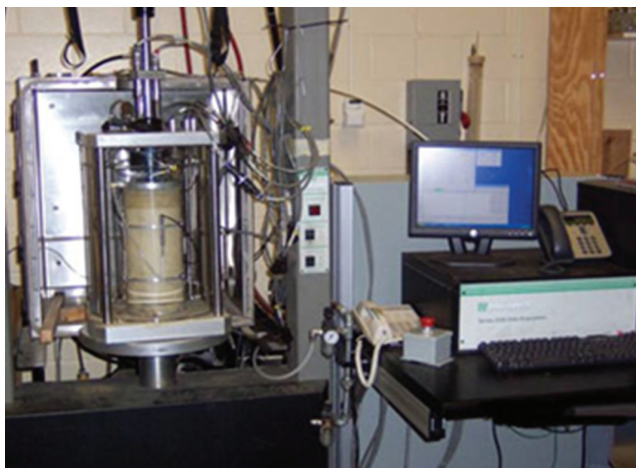
További problémát okoz, hogy a hazánkban előforduló talajok döntő része nem is képes az előírt $E_2 \geq 50$ MPa földműteherbírást biztosítani, ezért durva szemcsés anyagból (pl. homokos kavics, zúzottkő) teherbírásjavító réteget kell terveznünk és építsünk. A teherbírás-javítás gazdaságosan elvégezhető lenne a talajok kötőanyag stabilizálásával, ez a technológia lehetőséget adna az $E_2 = 40$ MPa-nál jóval magasabb földműteherbírást elérésére is. A típuspályaszerkezet-méretezés tehát nem teszi lehetővé a magasabb földmű-teherbírást, mint műszaki előny figyelembevételét, mert az útpálya alaprétegei és a burkolati rétegek vastagsága vagy anyagminősége nem csökkenthető. Ennek a megoldására dolgozták ki az új alternatív méretezési eljárást (*Pethő, Primusz, Tóth, Szendefy és sokan mások*), amely már figyelembe veszi az elvárt földműteherbírást meghaladó értéket a méretezéskor.

Mi a reziliens modulus?

A reziliens modulus általános definíciója alapján a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás aránya – visszalakuláskor, a felterhelés utáni tehermentesülés mellett:

$$M_r = \sigma/\varepsilon \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Az M_r értéke nem az anyag szilárdságát jellemzi, hanem annak reziliens (visszaalakuló) merevségét. Mivel nagysága változik az oldalnyomás függvényében, így laboratóriumban többféle terhelés és oldalnyomás párosítás mellett kell meghatározni. Természetes körülmények közötti vizsgálata nehézkes, helyszíni CBR-vizsgálattal lenne lehetséges. A laboratóriumi triaxiális vizsgálatok (1. ábra) hátránya, hogy drága, lassú, körülményes és mivel zavart mintán történik, ezzel megbízhatósága gyengül.



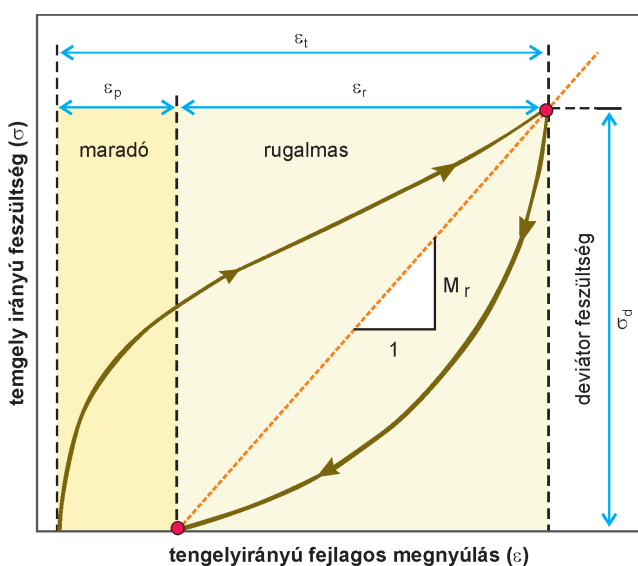
1. ábra. Triaxiális vizsgálat
(<http://www.dot.state.mn.us/materials/mr/>)

Ideális eset lenne egy gyors helyszíni mérés a meghatározására, mely nem időigényes, olcsó és ezzel a mérési gyakoriság növelhetővé válik. Gyakoribb vizsgálat a felület állapotát jobban jellemzi és az eredeti célt – a statisztikai alapon történő méretezés lehetőségét is megteremthetné.

Az M_r értékének meghatározására közvetett módszerként a szakirodalom a CBR vizsgálatot javasolja, amely a laboratóriumban egyszerűbb eszközökkel végrehajtható, mint a speciális berendezést igénylő és költséges dinamikus triaxiális vizsgálat.

AASHTO T-307 szerinti laboratóriumi triaxiális vizsgálatok

AASHTO T-307 amerikai előírás szerint eltérő deviátor feszültségek alkalmazásával egy mintán



2. ábra. A reziliens (visszaalakulási) modulus általános értelmezése

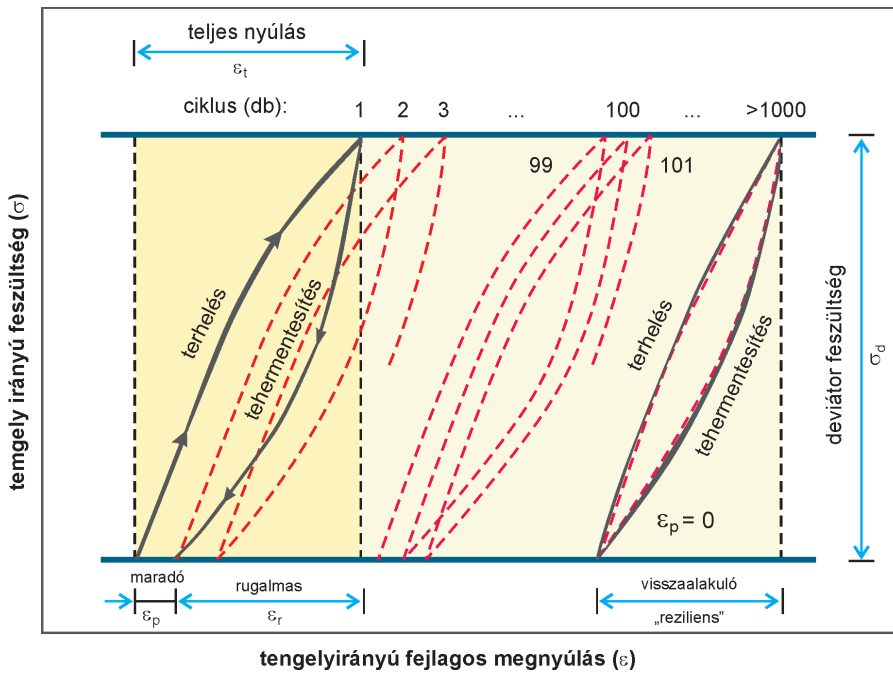
több száz dinamikus triaxiális vizsgálatot végeznek el, amelyek során előre meghatározott nagyságú tengelyirányú ciklikus terhelés alá vetetik a próbatestet. Egy terhelési ciklus 0,1 másodperc hosszúságú terhelési fázisból, valamint egy 0,9 másodpercig tartó nyugalmi periódusból áll, így teljes időtartama 1 másodperc. A mintákat először 1000 cikluson keresztül 27,6 kPa cellanyomás és 27,6 kPa deviátor feszültség mellett, ún. kondicionáló terhelésnek vetetik alá, aminek célja, hogy megszüntesse a tömörödés és a terhelés közti időszak hatását, illetve a kezdeti terhelést az újratehelés 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 végső lépéseként az utolsó terhelési lépcső 68,9 kPa nagyságú deviátor feszültségének alkalmazásával a minták terhelése további 10 000 cikluson keresztül folytatódik a maradó alakváltozások meghatározása céljából. Elterjedten alkalmazzák az M_r reziliens modulus meghatározására (2. ábra). Korlátai az anyag szemnagysága és mintázásának határai.

A szakirodalom a reziliens modulus egyszerűbb, de közvetett meghatározására a CBR-értékből történő átszámítást javasolja, amihez a 30 éves szakirodalomban számos különböző összefüggés szerepel [15, 18, 24, 25]. Ezen összefüggések célja, hogy a még kevésbé elterjedt dinamikus triaxiális berendezést igénylő közvetlen mérés helyett az M_r értéke egy egyszerűbb, kevésbé költséges vizsgálatlaltal is előállítható legyen.

Szendefy által bemutatott eredmények szerint a CBR teherbírásból számított M_r reziliens modulusok jóval magasabbak, mint a triaxiális mérésekből kapott értékek (1). Az átszámítási módok közül Szendefy szerint a Georgia Department of Transportation ajánlása adta a legközelebbi értékeket, azonban még ezek is 1,5-szer nagyobbra adódtak, mint a laboratóriumban dinamikus triaxiális berendezéssel mért M_r -értékek. Megítélése szerint ezek az értékek túl tág határok közöttiek, mérnöki méretezésre alig, inkább becslésre alkalmasak.

Szendefy szerint a stabilizációknál a mért, illetve „átszámított”, szakirodalomban található különböző összefüggéssel meghatározott reziliens modulusok átlagértéke erősen szór. Az eltérés akár az átlag 3–4-szeres is lehet, ami a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából elgondolkodtató.

Nyilvánvaló, hogy ha a reziliens modulus meghatározásának alapfeltétele az, hogy a maradó fajlagos alakváltozás már nulla legyen a ciklikus terhelések hatására (3. ábra). Ekkor a terhelési szakasz



3. ábra. A reziliens (visszalakulási) modulus – nulla maradó alakváltozásnál (Tervezési Útmutató, 7. ábra)

kezdő- és végpontjai egyeznek a tehermentesítési szakasz kezdő-vég pontjaival. Kimondható tehát, hogy ha bármely ciklikus terhelési vizsgálat a nulla maradó alakváltozást eléri, akkor a rugalmas alakváltozásból (ϵ_r) számított „teherbírási” modulus, a reziliens modulussal egyező értékű (3. ábra piros

kezdeti szakasz kezdő-vég pontjaival. Kimondható tehát, hogy ha bármely ciklikus terhelési vizsgálat a nulla maradó alakváltozást eléri, akkor a rugalmas alakváltozásból (ϵ_r) számított „teherbírási” modulus, a reziliens modulussal egyező értékű (3. ábra piros

Nagy előny lenne, ha az alternatív pályaszerkezet méretezés a valós körülményeket figyelembe vevő dinamikus mérési modelltől meghatározott, azaz

a rétegen mért reziliens modulusra alapozhatná a méretezést, nem többszörös átszámításokkal terhelt, táblázatos értékekből. További előny lehet, hogy az $E_2 - E_d$ statikus – dinamikus modulusok közötti összefüggés $n = 763$ mérésekből 58 db próbabeépítés összesített eredményeiből korábban már igazolódott [17, 33, 34] és ezért nem becsülni kell, hanem az közvet módon alkalmazható lenne (4. ábra).

Az összefüggést jelen esetben a következő, SP-LFWD (Small-Plate LFWD $d=163$ mm) mérőeszközzel történt nagy vizsgálati számú statisztikai elemzés alapján a pontosabb összefüggéssel javasolt figyelembe venni [28]:

$$E_2 = 0,94 \cdot E_d (R^2=0,8) \quad (3)$$

Az ejtésekkor rugalmas és maradó alakváltozás keletkezik. A maradó és rugalmas alakváltozás figyelembe vételének módját már meg kellett oldjuk a dinamikus tömörségi fok elméletének kidolgozásakor, ezt a 18 ejtési sorozat süllyedési amplitúdóinak különbségéből számítottuk. A dinamikus tömörségmérési mód a

szaggatott vonal, illetve 2. ábra jobb oldala), azaz általanosságban:

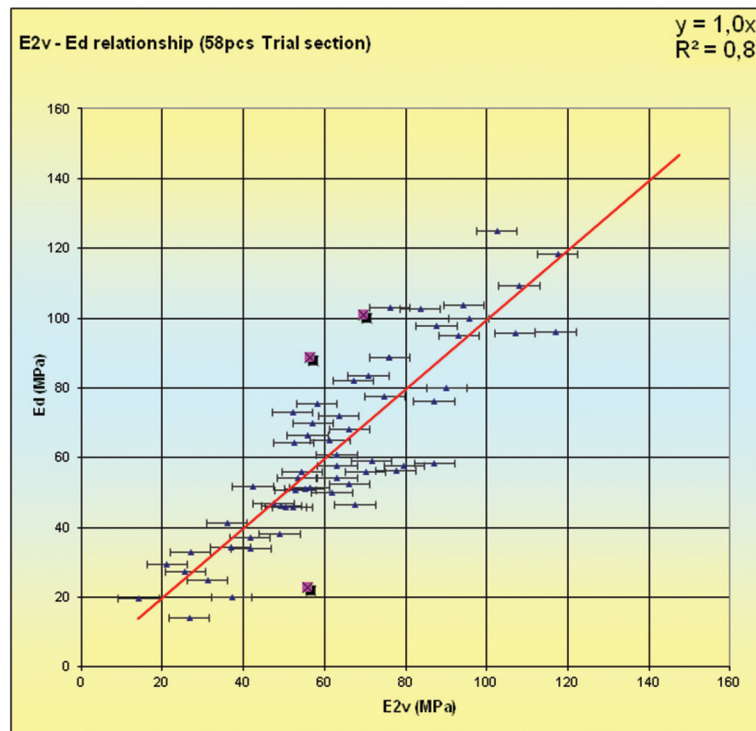
$$\epsilon_{der} = M_r \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Reziliens modulus mérési lehetőségei SMART-BC vizsgálattal

Vizsgálatunk ezek után arra irányult, hogy lehetséges-e az 3. ábra szerinti terhelési és mérési modell alkalmazása a reziliens modulus direkt meghatározására az MSZ 15846 szerinti dinamikus kistárcsás tömörség- és teherbírási vizsgálattal.

A SMART prototípus műszer fejlesztése

a GINOP-2.1.7-15-2016-001 79 projektben „SMART-BC – Okostelefonra fejlesztett dinamikus tömörség- és teherbírási mérés kutatása és prototípus kifejlesztése” címmel folyik és befejezés előtt áll (36).



4. ábra. $E_d - E_2$ dinamikus–statikus modulusok próbabeépítésekkel megállapított összefüggése

ténylegesen mért *maradó alakváltozások sorozatának* meghatározásával tette lehetővé a deformációs mutató (továbbá ebből a dinamikus tömörségi fok) meghatározását és azt elméleti levezetéssel is igazolta [34]. A dinamikus tömörségi fok mérése a *rugalmas alakváltozást kiküszöbölve* a maradó alakváltozások súlyozott átlagával határozza meg a D_m deformációs mutatót. A mérési módszert szabvány rögzíti (MSZ 15846, a CWA15846, és az e-UT09.02.35 is).

Adódik tehát, hogy ezen elv mentén lehetséges – a maradó alakváltozás kiküszöbölésével – a tisztán rugalmas alakváltozás mérése, ebből pedig a reziliens modulus meghatározása $\varepsilon_{der} = M_r$ adott terepi mérési pontokon, a reziliens modulusra vonatkozó – elfogadott – Poisson-tényezővel számítva. Ennek több lehetséges megoldása is elképzelhető, melyek közül a meghatározás pontossága, egyszerűsége és ismételhetősége dönthet, nagy mintaszámú elemzés után (5. ábra).



5. ábra. SMART-BC mérőeszköz a legújabb tagja az LFWD műszercsaládnak (MSZ15846)

Elemzés alá vont lehetséges alternatívák

A megoldást keresve az alábbiakból indultunk ki: a nyomás (stressz) hatására alakváltozási görbe jön létre jelölése σ - ε . Fajlagos alakváltozás $\varepsilon = \Delta L/L$ (strain). A teljes fajlagos alakváltozástól levonva a maradó alakváltozást kapjuk a rugalmas alakváltozást. Reziliens (mert visszalakuló) – azaz nem az összenyomódásból, hanem utána következő tehermentesülés alatti szakaszból határozható meg ez az összefüggés, illetve M_r paraméter. Ez egyenlő az 3. ábra $\varepsilon_p = 0$ lineáris meredekséggel (slope). Tömörségi fok ($Cr =$ Compaction-rate) elméleténél levezetett számításból látható, hogy a Proctor-talajhenger magasságának változásból levezethető a tömörségi fok

$$C_{ri} = \frac{V^*}{V_i} = \frac{A \cdot h^*}{A \cdot h_i} = \frac{h_i - \Delta h}{h_i} = \frac{h_i}{h_i} - \frac{\Delta h}{h_i} = 1 - \varepsilon_i \quad (4)$$

ahol * optimális víztartalom melletti értéket jelöl,
 C_r : Compaction-rate és $i \neq \text{opt}$

Elméletileg is bizonyított [17, 28], hogy a tömörség $Cr\% = 1 - \varepsilon$, míg a tömörségi fok

$$Trd\% = 100 \cdot (1 - \varepsilon)\% \quad (5)$$

Azaz ebből már látható, hogy ha meghatároztuk a tömörségi fokot, akkor ε értéke is számítható. Ezzel a fajlagos alakváltozás σ - ε összefüggése regresszióanalízissel is meghatározható az adott talajmintára. A relatív helyszíni tömörségi fok adott terepi víztartalommal a szabványos mérési módszerrel MSZ15846 szerint:

$$TrE\% = 100 - 0,380 \cdot 1,25 \cdot D_m \quad (6)$$

Alternatíva-1 ha mérhető a teljes alakváltozás (fajlagos alakváltozás), valamint annak maradó alakváltozása minden ejtésnél, akkor akár a rugalmas alakváltozás is számítható (teljes alakváltozás – maradó alakváltozás).

Alternatíva -2 a mért rugalmas alakváltozás ugyanúgy súlyozható az ejtések számával, mint azt teszi a tömörségmérés a maradó alakváltozás soral. Resiliens alakváltozás= teljes alakváltozás – maradó alakváltozás. Ezt az ismert képlettel számíthatjuk:

$$D_m = \left[\sum_{i=1}^{i=17} d_i \cdot \sum_1^i SUM \Delta s_i \right] \cdot \frac{1}{17} \quad (7)$$

ahol Δs helyére az $(s - \Delta s)$ kerül, minden más változatlan. A képlet szorzadó a kiemelt $(1/L)$ értékkel. A D_m jelölés helyett mást kell választani (mr_0). A fajlagos alakváltozásból kiemelhető szorzóként minden tagnál az $1/L$ ezzel a fajlagos alakváltozás (ε) számításának akadály nincs

Alternatíva-3 a feszültég (σ) felfejlődése és lefutása a SMART-BC ejtősúlyánál ismert, időtartama ismert (mért) terhelés nagysága a tárcsaméretből és a *Boussinesq*-féle feszültség eloszlásból meghatározható. Ez a statikus tárcsás E2 mérésnél és a dinamikus E_d mérésnél a SMART-BC esetében 0,35 Mpa, míg más nagy tárcsás LFWD mérés tárcsa alatti terhelése nagyságrenddel kisebb, 0,1 Mpa.

Alternatíva-4 a dinamikus tömörség- és teherbírásmérés algoritmusában korábban is alkalmazott módszer lehet a *Boussinesq* képlet alkalmazása, a maradó alakváltozás kiszűrése után kapott *tisztán rugalmas* alakváltozásból. Az alkalmazott képlet az E_d számításakor a 4-5-6 ejtésből meghatározott *alakváltozás átlagával* számol:

$$E_d = \frac{(1 - \mu^2) \cdot c \cdot p_{din} \cdot r}{s_r} \quad (8)$$

Szabványos fogalom továbbá $E_{dvég}$ végmodulus, melyet ugyanezzel a képlettel, de 16-17-18. ejtés-

ből (BC-FULL), azaz a már tömörített anyagrétegre meghatározott süllyedési amplitúdókból számítjuk (CWA15846 és MSZ15846). Ezzel analóg lehet, hogy még ennél is több ejtéssel, vagy az utolsó ejtések előre-számítással meghatározott „**virtuális amplitúdókból**” határozzuk meg a M_r reziliens modulust. A tömörségi fok mérésének végén ugyanis, a tömörítő ejtések hatására a maradó alakváltozás folyamatosan csökken, a süllyedési amplitúdó pedig mindig a tisztán rugalmas alakváltozáshoz közelít.

Alternatíva-5 Lehetséges a 18 ejtéses teljes sorozatú dinamikus tömörségmérés (BC-FULL) megismétlése a tárcsa elmozdítása nélkül, újabb 18 ejtéssel. Ennek eltűrését segíti, hogy a mostani szabályozás is tartalmazza a CWC munkavégzési korrekció számításához az ismételt mérést a tárcsa elmozdítása nélkül. [Meg kell jegyezni, hogy a túltömörítés egy idő után hullámzó alakváltozást mutat (fellazulás – tömörödés) ami pont az átlaggal szűrhető ki jól. Ha több mint 3 plusz ejtéssel, vagy akár (és ez a mérés szempontjából a külső helyszínen még a megtűrhető maximum) 18 db újabb ejtéssel kívánunk operálni – azt is megtehetjük a mérési eredmény fontosságára való tekintettel.]

Egyéb feltételek és megfontolások, próbaszámítások

Ha *Boussinesq* által leírt feltételeket, a feszültség-alakváltozás általános összefüggését elfogadjuk érvényesnek az *összenyomódás utáni kitágulási szakaszra* is (2. ábra) akkor megállapíthatjuk, hogy

- az alakváltozás terepen a terhelési idő alatt kizárólag elektronikával, csak gyorsulásmérővel mérhető, azaz kézi mérőórával, vagy induktív jeladóval nem. A bélyeges mérési mód szemcsés anyagoknál nyilvánvalóan nem lehetséges
- A tárcsa alatti terhelés nagysága megfelelő tartomány, a reziliens modulusnál alkalmazott Poisson-tényező beállíthatósága fontos, merev Boussinesq-féle tárcsaszorító alkalmazása nem nélkülözhető ($c = \pi/2$) a méréskor.
- A dinamikus tömörség- és teherbírás mérési eljárás szabványosított, de nyilvánvalóan továbbfejleszhető az M_r mérésére is
- M_r mérésének szabványosítása tehát egyszerű lenne, mert a mérőeszköz és paraméterei egyértelműen adottak, a mérési mód kiválasztása után annak rögzítése a már meglévő szabvány módosításával (referenciával alátámasztottan) lehetséges lehet.

A megoldás finomítható és pontosítható megfelelő statisztikai megbízhatóságú és mintaszámú hely-

színi és laboratóriumi vizsgálatokkal, anyag típusokra külön, vagy egyezés esetén általánosíthatóan. Kérdés lehet a további kutatáshoz, hogy az alternatív pályaszerkezet tervezési paramétereinek megválasztásában kiindulásként jelenleg feltételezett statikus – dinamikus teherbírás értékek lineáris összefüggése tartható-e, vagy más, pl. hatványkitevős formája közelíti-e jobban a valóságot.

A dinamikus tömörség és teherbírás *legújabb típusa a SMART-BC applikáció már az okostelefont használja fel műszernek*. Ez az oka, hogy a jelenlegi elméleti fejlesztés kizárólag szoftver fejlesztéssel járna csak és persze a szükséges számú mérésekkel és kiértékeléssel. Eredménye:

- meglévő gyors, pontos mérőeszköz,
- igen sok adat, gyorsan és olcsón,
- a mérési módszer eredményeinek felhasználása a méretezéshez szükséges, adódik, hogy lehetséges a szakaszolás, lehetséges a gyakori mérés, akár 10–20 méterenként, akár oldalonként, akár sávonként, akár keréknyomonkénti keresztmetszetben.
- A digitalizáció, az ITC iparág rohamos fejlődése, az azonnali elérhetőség, azonnali adattovábbítás, a drive-alkalmazás terjedésével, térinformatikai alkalmazással a várt eredmény hasznossága lényegesen növekszik és forradalmi előrelépést jelentene.

A **próbaszámításokat** BC-FULL 18 ejtéses adat sorokon teszteltük, melyet az Andreas Kft 2006-ban Portugáliában mért. A Portugáliai Műszaki Egyetem Geotechnikai Tanszéke, Prof Correia meghívására Evola mellett egy épülő gyorsvasút földmű koronaszintjén szervezett kísérleti szakaszt, ahol – sok más műszer és módszer mellett – a magyar dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés is tesztelésre kerülhetett (6. és 7. ábra).



6. ábra. Portugália, elkészült pályaszakasz



7. ábra. Portugália, próbabeépítés helyszíne

A jelenlegi feldolgozást az itt mért adatokból készítettük. A 4-es alternatíva részeként 4-5-7-10 virtuális

lis pontokat vettük fel a hármas és ötös átlag különbségéből számított Δ értékből számítva, melyet az 5-ös ejtési sorozat 3-as mozgóátlaghoz tartozó pontból számítunk $n=21, 22, 24, 27$ ejtési pontokhoz (5. ábra), majd ezeket a alternatív pályaszerkezet méretezés tervezési útmutatójában alkalmazott (jelenlegi) Mr-E2 trendhez viszonyítottuk (8. ábra).

A számítás elve:

$$S5á = (s51+s52+s53)/3, \quad (9)$$

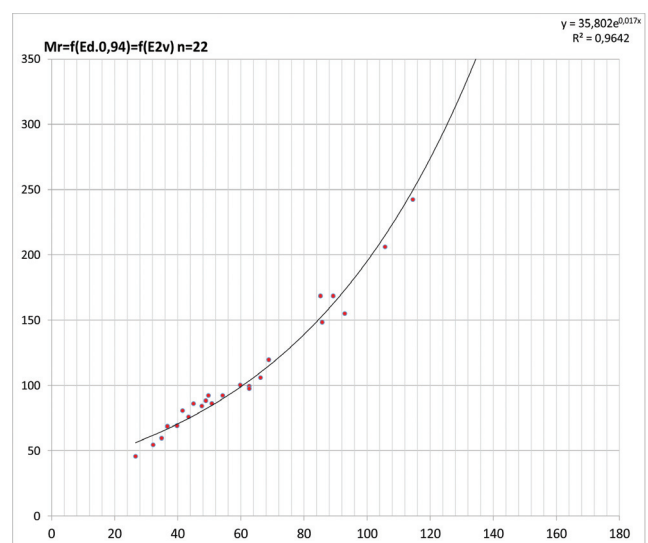
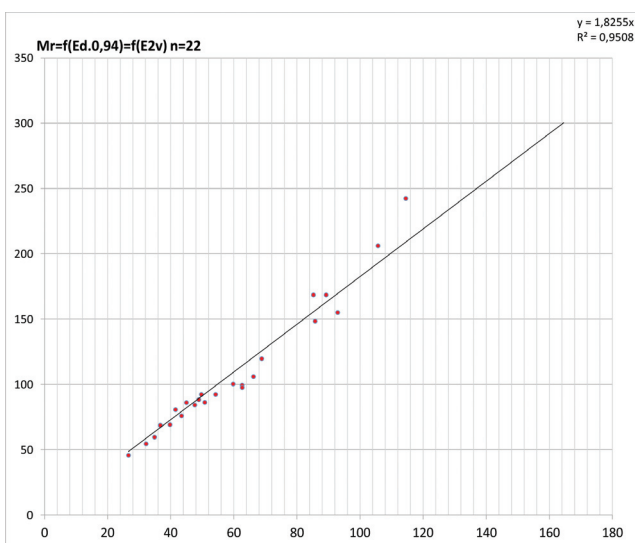
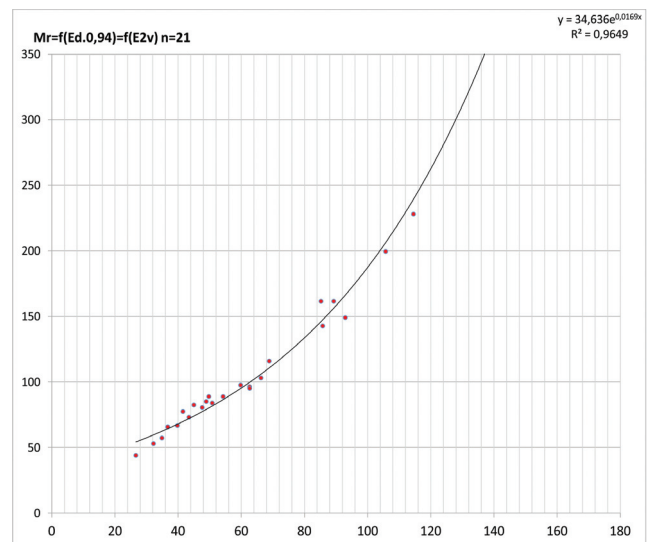
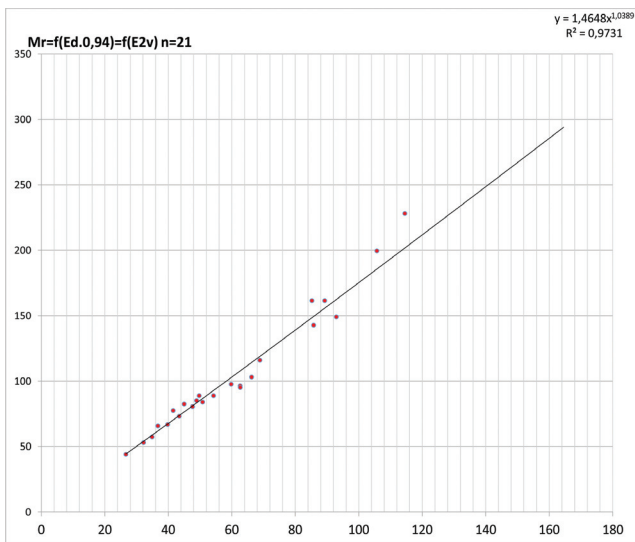
valamint

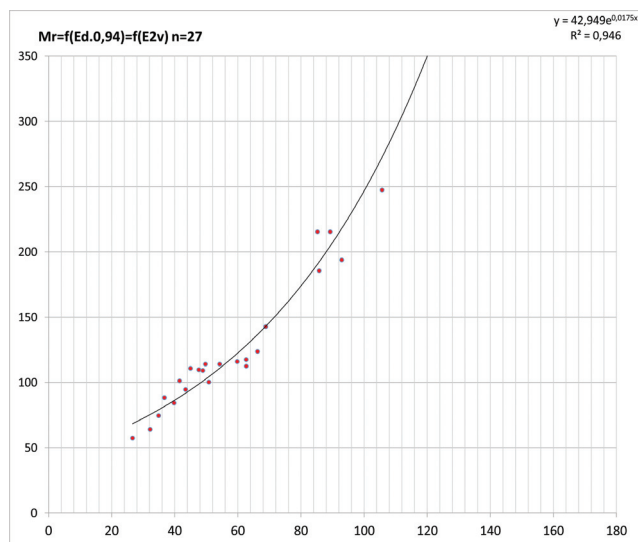
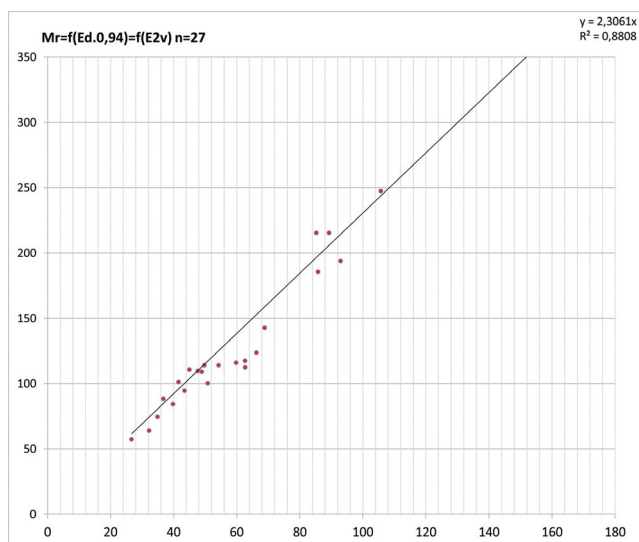
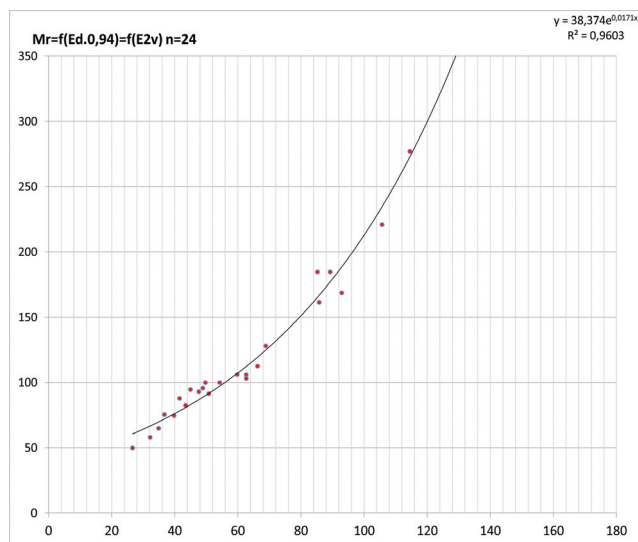
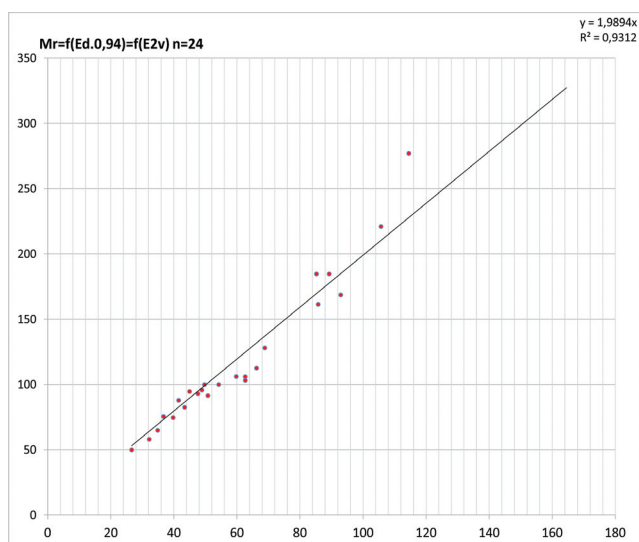
$$S45á = (s42+s43+s51+s52+s53)/5 \text{ utolsó öt süllyedés mm átlaga}$$

$$\Delta = (S45á - S5á) \text{ mm (és } \Delta < 0 \text{ esetén sr=s53-0,05 mm) (lásd 9. ábra),}$$

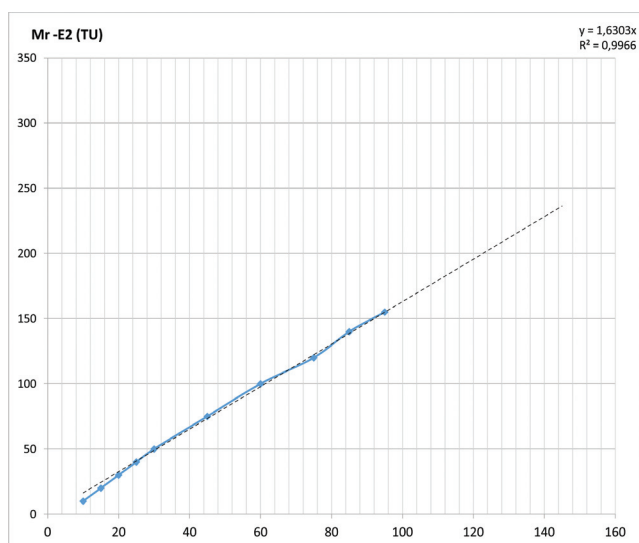
végül

$$Sr = S5á - 4 \cdot \Delta \text{ (mm) rugalmas alakváltozás az } M_r \text{ számításához (n=21 esetén)}$$





8. ábra. SMART BC előzetes érzékenység-vizsgálat n=21 /22 /24 /27



9. ábra. M_r -E2 Alternatív TU 2016 táblázatos értékei – kérdés, maradhat-e lineáris vagy sem

Konklúzió

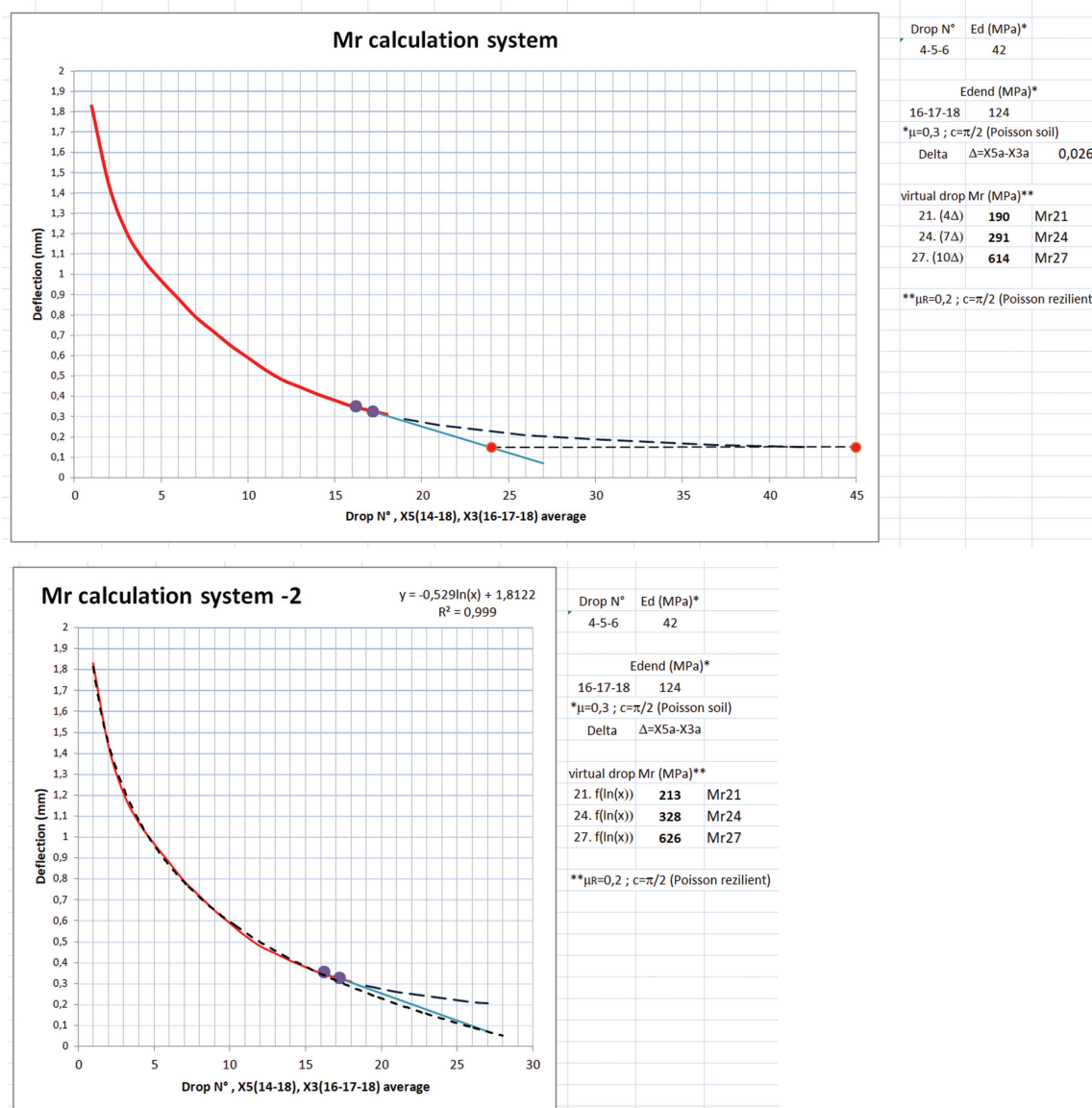
A reziliens modulus M_r előzetes mérésekkel igazolva számítható lehet a dinamikus tömörség- és teherbírás mérésből, ha a 2. és 3. ábra szerinti, tisztán rugalmas alakváltozás tartományát a terhelési ciklusokkal elértük. Ekkor az E_d számításánál alkalmazott E_d (MPa) képlettel számítható.

A dinamikus tömörség-teherbírás mérési elve és módszere alkalmas arra, hogy az alkalmazhatóságot elemezni lehessen.

Az M_r mérése igen gyors és pontos, nagy mintaszámban meghatározható (talaj)vizsgálati paraméter lehetne.

A javasolt meghatározási módszer egyszerűen mérhető, elve logikus, nagyságrendjét azonban az eddig alkalmazott feltételezett értékek tartományához kell illeszteni.

Rendkívüli fontosságú, hogy az M_r reziliens modulus helyszíni meghatározása a SMART-BC műszerrel

10. ábra. Virtuális módszer – M_r meghatározása a SMART-BC mérésből (maradó alakváltozás nulla)

rel lehetséges, mert lehetővé teszi a széleskörű alkalmazhatóságot

További kutatások dönthetik csak el, hogy a virtuális $n=21-22-24-27$ pontok megoldásai közül melyik lesz alkalmazható. A közelítő görbék (8. ábra) regressziós összefüggések, trendek jellegének megválasztásakor az lesz döntő, hogy a jelenlegi alkalmazások mely paraméterekkel lesz a leginkább egyező.

Összefoglalás

A terepen mért reziliens modulus óriási előrelépés lehet a táblázatból vett, általános értékek alkalmazása helyett, főleg azért, mert az alternatív pályaszerkezet méretezés pont az általánosítást kívánja

elkerülni és a valós körülményeket, tényleges teherbírást kihasználni a pályaszerkezeti rétegek pontos méretezésekor. A könnyűejtsúlyos, dinamikus mérések terjedésével lehetségessé vált a SP-LFWD kistárcsás mérés is, ami fontos, mert ennek tárcsa alatti terhelése az egyetlen, ami a statikus teherbírás mérésnél alkalmazottal egyező és a Poisson-tényező (statikusnál alkalmazott értékű) figyelembe vétele is szabványos mérési előírás.

A BC dinamikus tömörség- és teherbírásmérés korábbi kutatási adatai és összefüggései emiatt bevonhatók lesznek a további elemzésekbe.

Az alkalmazásra nyitott a magas- és mélyépítő iparág, repülőtereket, építési alapokat, vasutat, utakat, pályaszerkezeteket tervező mérnökirodák, tervezők, mérnökök, laborok – mindenki mérhetné a reziliens moduluszt okostelefonos SMART-BC-vel,

az igényes alternatív méretezéshez szükséges input adatok GPS adatokkal azonosítható pontos meghatározásához.

A mérés gyakorisága igen magas lehet a rövid mérési idő miatt (virtuális pontokkal számítható), ami lehetővé teszi a szakaszolást, valamint valószínűségi alapokon nyugvó precíz feldolgozást. A helyszíni mérés a valós általajviszonyokat várhatóan mindennél jobban képes reprezentálni.

A reziliens modulus helyszíni mérése, valamint az alternatív méretezés támogatja az élettartam-tudományt és jelentős környezetvédelmi szempontból. Minden lehetséges alkalmat fel kell használni arra, hogy az input adatok száma bővíthető legyen, mert ezzel a méretezés a valós környezethez jobban illeszthető.

Érdekelt lehet az innovációban a közúti adminisztráció a beruházások optimalizálása miatt, az országos úthálózat üzemeltetője az élettartam és fenntartási ciklusok pontos tervezése miatt. Hasznos segítsége lehet az önkormányzati és magánutak üzemeltetőinek, kutatók és egyetemek számára, akik a reziliens modulus kutatásán és alkalmazásán fáradoznak.

A K+F+I munkában ajánlott próbaszakasz építése, nagy mintaszámú kontroll vizsgálat és annak statisztikai kiértékelése – a választott végleges módszer kiválasztása, validálása a mérés véglegesítése és bevezetése előtt. Az LFWD 300 mm-es tárcsás mérési próbálkozásai után vélhetően egy gyors, olcsó és biztonságos új mérési módszer válna lehetővé a világon először, a reziliens modulus pontos és megbízható közvetlen meghatározására.

Mivel a mérési módszer eredményeinek felhasználása az alternatív pályaszerkezet méretezéshez szükséges; adódik, hogy lehetséges a szakaszolás, lehetséges a gyakori mérés, akár 10 m-ként, akár oldalanként, akár sávonként, akár keréknyomonkénti keresztmetszetben felvett GPS helyazonosítással felvett pontokon – bárhol a térben.

A mérés igen gyors és eredménye a helyszínen azonnal rendelkezésre áll, a mért adat azonnal továbbítható. Példátlanul pontos pályaszerkezet méretezést lehetne elvégezni szakaszolással, akár hossz és keresztirányban is – sőt akár 3D térinformatikai feldolgozás bevezetésével. A tervezés kibővítendő lehetne a lokális hibák tervezett javításával és ezen pontok lehelyettesítésével – már tervezéskor, mely önmagában több cm vastagságú megtakarítást eredményezne az aszfaltrétegek szükséges vastagságában.

A reziliens modulus mérése SMART-BC-vel hatalmas lehetőség lenne az önellenőrzésre és QC, QA biztosítására is, nemcsak tervezéskor. Fontos, hogy a SMART-BC 0,01 mm-es mérési pontossága magas, akár 3000 MPa reziliens modulus helyszíni mérése is képes.

A jelenlegi MSZ 15846 dinamikus tömörség- és terhebrás mérési szabvány könnyen kibővíthető az újabb Mr Reziliens Modulus, vagy annak közelítő terepi mérésével, mert a készülék, a mérési elv, karbantartás, kalibrálása ugyanaz, „mindösszesen” egy mért paraméterrel több a mérési lehetőség.

Különösen aktuális és különleges előny, hogy a SMART-BC projektbe ezek a paraméterek már bevitelők, tájékoztatásként alkalmazhatók az átszámítások – összefüggések menüpontban. A mérés lehetőségének megteremtésével pedig a további K+F munka alapjait biztosítja.

Irodalom

- [1] Back M, Szenfdefy J: Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke. <http://utugyilapok.hu/cikkek/reziliens-modulus-merese-es-talajstabilizacioknal-mert-erteke/> érvényes 2019-06-23
- [2] Primusz P, Tóth Cs. (2018): Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése. *Közlekedéstudományi szemle*, 2018; 68(5):17-33. ISSN 0023-4362, <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.5.2>
- [3] Shu-Rong Yang, Wei-Hsing Huang, and Yu-Tsung Tai: Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. Department of Civil Engineering, National Central University, Jungli, Taoyuan 32054, Taiwan. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1913, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 99–106., <https://doi.org/10.3141/1913-10>
- [4] MnRoad USA Minnesota Department of Transportation <http://www.dot.state.mn.us/materials/mr/> érvényes 2019-06-23
- [5] Achampong F, Usmen M, Kagawa T. Evaluation of resilient modulus for lime- and cement-stabilized synthetic cohesive soils. 1997. <https://doi.org/10.3141/1589-12>
- [6] Berg RL, Bigl SR, Stark J, Durell G. Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD Phase1, Technical Report Minnesota Department of Transportation. 1996. <https://doi.org/10.21949/1404573>
- [7, 8] Durham G, DeGroff W, Marr W, eds., Resilient Modulus Testing for Pavement Components. (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003) <https://doi.org/10.1520/STP1437-EB>
- [9] George KP. „Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli”, Final Report, FHWA/MS-DOT-RD-03-153, Mississippi Department of Transportation, Jackson, MS, 2003 October. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2003\)129:1\(100\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2003)129:1(100))
- [10] National Cooperative Highway Research Program, 1-28A Project, “Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Annex A-1”, Transportation Research Board, Washington, DC, 2003. <https://doi.org/10.17226/21960>

- [11] Jin MS, Lee KW, Kovacs WD. „Seasonal Variation of Resilient Modulus of Subgrade Soils”. ASCE Journal of Transportation Engineering, 1994 July/August; 120(4): 603-616.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:4\(603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:4(603))
- [12] National Cooperative Research Program, “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structure, Appendix DD-2”, Transportation Research Board, Washington, DC, 2000.
- [13] Houston WN, Mamlouk MS, Perera RWS. „Laboratory versus Nondestructive Testing for Pavement Design”, ASCE Journal of Transportation Engineering, 1992; 118(2):207-222.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(1992\)118:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(1992)118:2(207))
- [14] 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 2014; 579-580:873-876.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.579-580.873>
- [15] SAS W, Gluchowski A, Szymanski A. Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilizated clay obtained from the repeated loading CBR test, Annals of Warsaw University of Life Sciences Land Reclamatoin, 2012; No44.
<https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- [16] Karoliny Márton: Közlekedési pályák teherbíróképessége. A földmű hatásai. Útügyi Lapok; 2013.
- [17] Subert I, Imre E, Garai J, Tompai Z: Test and Method is Proposed for Measuring the Dynamic Compaction-rate and Dynamic Modulus in Earthworks. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017; p:4, f:4, R:20, LP,CA
- [18] Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere.
<http://utugyilapok.hu/wp-content/uploads/2015/11/Tervez%C3%A9si-%C3%BA%20mutat%C3%B3.pdf>
érvényes 2019-06-23
- [19] ÚT2-1.503 (eUt06.03.12) Kisforgalmú utak pályaszerkezetének méretezése.
<https://ume.kozut.hu/dokumentum/116>
érvényes 2019-06-23
- [20] ÚT2-1.202 (eUt06.03.13) Aszfaltburkolatú utak pályaszerkezetének méretezése és megerősítése.
<https://ume.kozut.hu/dokumentum/117>
érvényes 2019-06-23
- [21] Pethő L, Szentpéteri I. Hajlékony és félmerev pályaszerkezetek méretezése Ausztráliában.
<http://utugyilapok.hu/cikkek/hajlekony-es-felmerev-palyaszerkezetek-meretezese-ausztraliaban/>
érvényes 2019-06-23
- [22] Szendefy J. A hazai talajok szerkezetének és teherbírásának változása meszes talajstabilizáció hatására, PhD dolgozat, Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar. 2009.
- [23] Szendefy J. Viacalcoval kezelt talajok laboratóriumi vizsgálata, Geotechnika Konferencia, Ráckeve, 2014.
- [24] Szendefy J. Kutatási jelentés aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere című tervezői utasítás geotechnikai paramétereinek pontosítására. 2017.
- [25] 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.
- [26] Primusz P, Péterfalvi J, Markó G, Tóth C. Effect of Pavement Stiffness on the Shape of Deflection Bowl/ A pályaszerkezet merevségének hatása a behajlási teknő alakjára, Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 2015; 11(1): 39-54. doi: <https://doi.org/10.1515/aslh-2015-0003>
- [27] Subert I. Application of Density Correction in Use of Dynamic Falling Weight Devices / Sűrűségkorrekció alkalmazása dinamikus ejtősúlyos berendezéseknél Road-issues Journal/ Útügyi Lapok 16-jan-2016 LP
- [28] Subert I. CWA15846 Theory of Dynamic-compactness and Modification Background / CWA15846 Dinamikus tömörségi-fok elmélete és módosításának háttere. Road-issues Journal/ Útügyi Lapok 15-dec-2015 LP
- [29] Subert I. Dynamic compactness and bearing capacity measurement – success of a Hungarian measurement method / Dinamikus tömörség és teherbírás mérés – egy magyar mérési módszer sikere. Civil Engineering Science Bulletin / Mélyépítéstudományi szemle dec-2015 LP
- [30] Subert I. Compactness and bearing capacity measurement methods used in Europe – Portugal report / Európában használatos tömörség- és teherbírás módszerek – Portugália beszámoló. Roads Sheets dec 2015 / Útügyi Lapok 2015 dec LP
- [31] Subert I. The potential impact of inhomogeneity of Road Earthwork Compactness on achievable IRI roughness requirements / Földmű tömörségi inhomogenitás lehetséges hatása az utak új IRI egyenetlenségi követelményének teljesíthetőségére. Lecture and article / Előadás és cikk. 25th Geotechnical Jubilee Conference Ráckeve, 12-14. oct. 2015/25 Jubileumi Geotechnikai Konferencia Ráckeve 2015. 10.12-14.
- [32] Subert I. Self-Control Compaction rate & Bearing Capacity on Stabilization / Önellenzés – Stabilizációk tömörség- és teherbírás mérése. International Conference of Dr Arpad Kezdi 21-05-2015 / Dr Kézdi Árpád Konferencia 2015-05-21 Budapest, Hungary CA
- [33] Subert I. CWA15846:2008 Modification Draft and Main Background Studies. CWA15846:2008 módosítási javaslat és főbb háttér tanulmányai. Engineering Geology – Rock Mechanics 2015 Congress. BMGE Hungary. p.379-394 CA
- [34] Subert I. „Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006. CA
- [35] GINOP-2.1.7-15-2016-00179 projekt “SMART-BC – Okostelefonra fejlesztett dinamikus tömörség- és teherbírás mérés kutatása és prototípus kifejlesztése”
- [36-43] Patent N°43917 Thailand, Patent 200980107701.2-CHINA, Patent US008448492B2-USA, Patent MA 32569 Marocco, P08 00441-HU, Patent P 03 01895-HU, Patent EP.1.338.704-EU, Patent P02 00715-HU.