

Sűrűségi korrekció alkalmazása dinamikus ejtősúlyos berendezéseknél

Subert I. – T.Q. Phong
Andreas Kft.

1 Bevezető, előzmények

A dinamikus mérési módszerek alkalmazása gyorsan terjed a világon. A módszer nem igényel ellensúlyt és a mérés a korábbi statikus vizsgálathoz képest igen gyors. Lehetővé teszi a tényleges dinamikus forgalmi terheléssel azonos modellhatású mérést, egyben egy pontosabb és megbízhatóbb (azaz igazságosabb és gazdaságosabb) minősítési mód alkalmazását, megnöveli a földművek és más szemcsés anyagrétegek minőségellenőrzésének hatékonyságát, megbízhatóságát.

Magyarországon 2003-ban egy új, dinamikus módszerrel mérő berendezés kifejlesztése kezdődött, mely a két legfontosabb jellemző egyidejű mérésére alkalmas. A B&C SP-LFWD kistárcsás könnyű-ejtősúlyos berendezés egyrészt méri a dinamikus moduluszt, mint *teherbírást*, másrészt az ejtések hatására létrejött tömörödési görbéből a *tömörégi fokot*. A dinamikus tömörégi fok elméletét és mérésének módját az Andreas Kft dolgozta ki. Az új módszer európai szabadalom lett és több díjat, elismerést kapott. 2008-ban elkészült a CEN-WA 15846 európai szabvány, mellyel a B&C dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés alkalmazása megnyílt Európa és a világ más országai előtt.

A B&C alkalmazása során nyert mérési tapasztalatok rávilágítottak olyan a problémákra is, melyek eddig nem merültek fel, vagy nem voltak eléggé ismertek. A dinamikus tömörségmérési módszert Magyarországon már 28 akkreditált laboratórium alkalmazza közel negyven mérőeszközzel. A mérőeszközöket a Közlekedéstudományi Intézet hitelesíti a NAT-nál jóváhagyott kalibráló laboratóriumában. A tapasztalatok külföldön is kedvezőek, az érdeklődés kiemelkedő. A B&C módosított könnyű-ejtősúlyos berendezés a statikus teherbírás méréshez hasonlóan $p=0,35$ MPa tárcsa alatti terhelést alkalmaz, szemben német-típusú nagytárcsás LFWD (Zorn, HMP) berendezésekkel, melyek a dinamikus modulus mérésére $p=0,1$ MPa tárcsa alatti terhelést használ.

Az új dinamikus tömörségmérési módszer alkalmazásáról, elemzéséről több tudományos munka és tanulmány készült. Szükségesnek, időszerűnek láttuk annak elemzését, hogy a különböző sűrűségű anyagok illetve a víztartalom, a réteg tömörége milyen hatással van a mért tömörégi és teherbírási eredményekre.

Különösen fontos a vizsgálat elvégzése a szélsőséges sűrűségű anyagok, így a kohósalak, salakkő, pernye esetében, melyek mint másodnyersanyagok alkalmazásra kell kerüljenek, ugyanakkor minősítésük (mérésük) nem megoldott. Ezek az anyagok közismerten nehezen, vagy egyáltalán nem minősíthetők a hagyományos tömörségmérési módszerekkel, különösen nem az izotópos tömörségmérési eljárással.

2 A dinamikus könnyű-ejtősúlyos mérés alapelve

Az LFWD (Light Falling Weight Deflectometer) mérés elvét számos európai szakirodalom részletezi. Lényeges, hogy az ejtősúly $7070 \text{ N} \pm 2\%$ terhelőerőt hoz létre a tárcsa erőátadó golyón. Típustól függően a tárcsa mérete $D=300$ mm, vagy a B&C esetében $D=163$ mm, melyből adódóan a nagytárcsás készülékeknél $0,1$ MPa, míg a kistárcsás B&C készüléknél $0,35$ MPa tárcsa alatti terhelést jön létre a mért réteg felületén. (A nagytárcsás készüléket a továbbiakban BP-LFWD-nek, a kistárcsásat SP-LFWD-nek nevezzük.) A tárcsa alatt mért alakváltozásból, süllyedésből számítjuk

a Boussinesq-képlettel a *dinamikus modulus*. Ehhez a *nagytárcsás (Német) BP-LFWD* fix Poisson-tényezőt és hajlékony tárcsa szorzót alkalmaz egy constans érték megadásával:

$$C_{\mu}=22,5 \quad E_{vd}=22,5/s_{1a}$$

Az így kapott E_{vd} értékeket E_2 -re át szokták számítani, melyre különböző képletek ismeretesek, de ezek regressziós szorossága ismeretlen.

A magyar megoldás a B&C módosított SP-LFWD, mely a mért anyagtípushoz közelebb álló, választható Poisson-tényezővel ($\mu=0,3-0,4-0,5$) és választható tárcsaszorzóval ($c=2$, vagy $\pi/2$) dolgozik (emiat C_{μ} = változó).

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

Az így kapott E_d dinamikus modulus értékek hasonló mérési tartományt mutat, mint az E_2 statikus teherbírás mérés, melyben lényeges szerepe van annak, hogy a statikus tárcsás mérésnél is $p=0,3\text{MPa}$ tárcsa alatti végterheléssel mérünk. A gyakorlatban az E_d határértéket a biztonság javára (azonosságuk ellenére) 1,2-es szorzóval megnöveljük az E_2 -höz képest.

Minden dinamikus mérés az impulzus-törvényt használja fel arra, hogy a fölmű felszínén terhelést hozzon létre. Ennek kapcsolatai, tömegei ismertek. Jelen tanulmány azt tűzte ki célul, hogy ezen kapcsolatok végigtekintésével, elemzésével tegyen megállapításokat a talaj sűrűségeltéréseinek lehetséges következményeire, esetleges összefüggéseit feltárva.

Az ejtősúly működése az impulzus-törvény alapján

Az „ejtősúly” kifejezés pontosítása érdekében előjáróban szükséges hangsúlyozni, hogy milyen részéről is beszélünk a készüléknek. A szemcsés rétegre helyezett tárcsára ejtjük le a súlyt, de oly módon, hogy azt az ejtőrúd megvezeti. A központosító golyóra ható impulzus tehát már a *vezetőrúd és az ejtősúly együttes tömegéből* származik, azaz más sebességgel mozog már, mint az ejtősúly maga a szabadesésben. A erő felépülése és lecsengése a teherátadó-központosító golyó előtt egy közbenső rugóval van szabályozva, melynek időszükséglete 18msec-ban szabályozott mind a nagy tárcsás BP-LFWD, mind a kistárcsás SP-LFWD típusú készülékeknél.

A terhelőtárcsában elhelyezett gyorsulásmérő és a 0,001 sec pontosságú kvarcóra segítségével a tárcsa mért gyorsulásából és az mért időből számítható a megtett út, a süllyedési amplitúdó. Ez mind a rugalmas, mind a maradó alakváltozást tartalmazza. Tárcsasebesség és benyomódás összefüggése nyilvánvaló, mivel az LFWD berendezéseknél az alakváltozást a tárcsa sebességéből és constans (18ms) időből állapítjuk meg. Ha a tárcsa sebességét ismerjük, akkor a tömeg és sebesség szorzatából az impulzus számítható.

A kioldókar meghúzása után a leeső súly tömege (kalibrálástól függően) 65-75cm távolságú szabadesés után ütődik a csillapító rugó erőátadó szerkezetének. A központosító golyóra átadódó impulzus a tömegből, valamint a csökkent sebesség figyelembevételével számítható. Bár ejtősúly alatt a jelenlegi szabványok jellemzően a leeső súly tömegét értik (feltehetően ez egyértelmű), mégis a súly és a rúd + rugó együttes tömege képezi az impulzust a teherátadó golyón együttesen (Zorn, HMP és B&C), tehát a 7070N nagyságú terhelés így alakul ki.

Az impulzustörvény alapján a tömeg és sebesség szorzata állandó ($I=m \cdot v$), melyből az LFWD készülék részein ébredő erők számíthatók. Ha a kismértékű rúdsúrlódástól eltekintünk, akkor az impulzus sorozat egyszerű és könnyen áttekinthető.

1. sz táblázat LFWD készülékek fő alkatrészeinek tömege

Tömeg [kg] \ Készülék	Zorn (BP-LFWD)	BC (SP-LFWD)
Ejtősúly	11,0	10,4
Ejtősúly + vezetőrúd	15,4	15,4
Terhelő tárcsa	15,2	14,8

Ha az erőátadó golyóra jutó ejtősúly + vezetőrúd és a terhelőtárcsa tömege egyenlő, akkor a tárcsa sebessége azonos, ha eltérő, akkor a tömeggel fordítottan arányosan változik meg a sebesség. A tárcsa süllyedési sebességét a B&C dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés gyorsulásmérővel méri és rögzíti. A készülék adattárolójában ezek a tárcsasebesség adatok tárolódnak és utólag is rendelkezésre állnak. Innen származó sebességadatokból és a tárcsatömegből tehát mindenkor *pontosan számítható* az alkalmazott (tényleges) impulzus nagysága.

Talajra, szemcsés rétegre átadódó impulzus

Az impulzus végső oldala a talajréteg, mely a tárcsa által átadott impulzus miatt tömörödik, lefelé mozdul. A talaj rugalmasságától függően, de a deformációra fordított energiával lecsökkentve, egy visszapatannást indít el a tárcsa felé. Az energia egy részét a maradó alakváltozás felemészti, ez az oka annak, hogy a visszapatannás sohasem éri el a végtelen merev modulusra jellemző $h=v^2/2g$ értékét. Ehhez képest mért magasság-különbség azonban arányos az elnyelt energiával, az pedig a tárcsa alatti süllyedéssel.

A tárcsa alatti deformáció térfogatcsökkenést, sűrűség növekedést okoz. A tárcsa alatti terület és a hatásmélysége konstans, mely által meghatározott térfogatot tekinthetjük mértékadónak. Ennek tömege az, amit az impulzustörvény figyelembe vehet.

Az impulzustörvényben figyelembe vehető talajsűrűség a B&C mérési elméletéből könnyen számítható. A sűrűség egyenesen arányos a tömörséggel (minél kisebb a tömörség annál kisebb a sűrűség) és egyenesen arányos a víztartalommal (minél magasabb a nedvesség, annál nagyobb a sűrűség). Általánosságban tehát a mérés időpontjában a talaj sűrűsége a tárcsa alatt

$$\rho_n = \rho_{Pr} \cdot \frac{T_{rE} \%}{100} \cdot \left(1 + \frac{w\%}{100} \right) \quad (2)$$

ahol: $w\%$ a víztartalom a méréskor

ρ_{Pr} a Proctor-vizsgálat szerinti legnagyobb száraz sűrűség az EN 13282/2-7.4.pontja szerint

$T_{rE} \%$ a mért réteg helyszíni relatív tömörsége az adott víztartalom mellett

Mivel az altalaj különböző fajtájú és víztartalma is változó lehet, a visszapatannás (egyben a tárcsa alatt mért alakváltozás) értékei is ettől függőek. A mért süllyedési amplitúdó tehát tartalmazza ezek hatásait.

A fő kérdés, hogy a teherbírásra és a tömörségre vonatkozó minősítő határértéket ennek a mért értéknek kell-e teljesíteni, vagy a mért értéknek „anyagtól függetlenül” teljesülnie kell. Nyilvánvaló, hogy általános minősítő határértékeket kell megadni (jelenleg alkalmazott is általános)

és nem anyagfüggő módon kell kezelni, lebontani azokat (mint például az ÚT 2-1.202 ÚME eltakarás előtti teherbírási modulusokra adott anyagfüggő határértékei)

Ezt a gondolkodásmódot indokolja továbbá az is, miszerint a beépített talaj idővel az optimális víztartalma közelébe és 100%-os tömörség közelébe kerül. Ha az előírt határértékeket úgy tekintjük, mint ennek elérését, akkor az optimálistól eltérő víztartalom és a nem kellő tömörség miatt logikusan csak ennek megfelelő teherbírást kellene elérni.

Nyilvánvalóvá vált, hogy *amit mérünk, az egy tömörséget, víztartalmat tartalmazó érték, ezt korrigálni kell ahhoz, hogy kapjunk egy mértékadó eredményt, amit a határértékhez hasonlíthatunk.* Szükséges tehát annak elemzése, hogy a sűrűség hatása a dinamikus modulusra, illetve a dinamikus tömörségi fokra mekkora és milyen hatása van e tényezőnek, illetve, hogy a mért modulusot módon korrigálhatjuk ahhoz, hogy azt az előírt (általános) határértékkel összehasonlíthassuk.

Talajtömeg számítása a víztartalma és tömörsége figyelembevételével

A visszapattanás irányú impulzus nagysága attól függő, hogy a működésbe vont talajrész tömege mekkora. Ennek hatását legjobban, egy példában tudjuk bemutatni négy választott anyagon. Két jelentősen eltérő sűrűségű a pernye és a kohósalakkő, illetve két kissé eltérő sűrűségű anyagot is vizsgálunk, egy homokos iszapos homoklisztet (saSi) és egy finom homokot (Fsa), ez utóbbit egyben bázisnak, viszonyítási alapnak választottuk (2.sz. táblázat), mint jellemző hazai altalajt.

Viszonyítási alapnak, *bázisnak választott finom homok* módosított Proctor vizsgálati sűrűsége $\rho_{Pr} = 1,65 \text{ g/cm}^3$, melyet földmű építésben még *elfogadható töltésépítő anyagnak tekintünk.* Az optimális víztartalom ennél az anyagnál $w_{opt}=7\%$, $\pm 3\%$ a beépítésre előírt intervallum. Nedves sűrűsége az optimális víztartalomnál $1,65 \cdot 1,07 = 1,77 \text{ g/cm}^3$, illetve az anyag sűrűsége 95% tömörségi állapotban $0,95 \cdot 1,65 \cdot 1,07 = 1,68 \text{ g/cm}^3$. Általánosságban a mérés időpontjában a mért talaj sűrűsége a (2) képlet szerint számítható.

2. sz táblázat. Vizsgált anyagok és jellemzőik

Anyagtípus	ρ_{dmax}	$w_{opt}\%$	$w_{opt}\% - 3\%$	$w_{opt}\% + 3\%$
Pernye (fly-ash)	1,00	26	23	29
bázis =finom homok (Fsa)	1,65	7	4	10
Iszapos homoklisztes homok(siSa)	1,72	11	8	14
Kohókő (slag)	1,92	6	3	9

Hasonlóan képeztük a sűrűségeket a 3.sz táblázatban valamennyi anyagra, a három víztartalom és négy tömörségi kategória esetén. Az anyagok kiindulásul választott adatait a 2. számú táblázatban összesítettük.

Mivel a hatásmélység sűrűségtől függetlenül azonosnak vehető, a példánkban 25cm-es hatásmélységnek megfelelő térfogatot választottunk ki. Kisebb tömörségnél ennek tömege kisebb, ezért a visszapattanás alacsonyabb, a mért süllyedési amplitúdó pedig nagyobb. Ha a bázisra vetített (mértékadó) értékre vagyunk kíváncsiak, akkor ennek hatását számítani és a mért értéket korrigálni szükséges. Ugyanez a logika vonatkozik a víztartalom hatásának számítására is.

Ha határértéket szabunk a dinamikus modulusnak, akkor nem arra gondoltunk, hogy a víztartalom hatásától az függő lehet, vagy a tömörségtől kellene függővé tegyük. Ezzel azt is kimondtuk, hogy a határérték bizony más-más talajon nem ugyanazt a jellemzőt (és viselkedést) takarja.

3. sz táblázat. Választott anyagok és jellemzőik, az anyag típusok sorrendjében

Trd (85-90-95) és w (opt, -3%, +3%) sűrűségek számítása											
TrE%=85			TrE%=90			TrE%=95			TrE%=100		
1,07	1,05	1,10	1,13	1,11	1,16	1,20	1,17	1,23	1,26	1,23	1,29
1,50	1,46	1,54	1,59	1,54	1,63	1,68	1,63	1,72	1,77	1,72	1,82
1,62	1,58	1,67	1,72	1,67	1,76	1,81	1,76	1,86	1,91	1,86	1,96
1,73	1,68	1,78	1,83	1,78	1,88	1,93	1,88	1,99	2,04	1,98	2,09
w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%
Sűrűségarányok											
TrE%=85			TrE%=90			TrE%=95			TrE%=100		
0,61	0,59	0,62	0,64	0,63	0,66	0,68	0,66	0,69	0,71	0,70	0,73
0,85	0,83	0,87	0,90	0,87	0,93	0,95	0,92	0,98	1,00	0,97	1,03
0,92	0,89	0,94	0,97	0,95	1,00	1,03	1,00	1,06	1,08	1,05	1,11
0,98	0,95	1,01	1,04	1,01	1,07	1,10	1,06	1,13	1,15	1,12	1,19
w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%
korrekciós tényező (Ed minősítő=Ed mért*korrekciós tényező)											
1,65	1,69	1,61	1,56	1,59	1,52	1,47	1,51	1,44	1,40	1,44	1,37
1,18	1,21	1,14	1,11	1,14	1,08	1,05	1,08	1,02	1,00	1,03	0,97
1,09	1,12	1,06	1,03	1,06	1,00	0,97	1,00	0,95	0,92	0,95	0,90
1,02	1,05	0,99	0,96	0,99	0,94	0,91	0,94	0,89	0,87	0,89	0,84
w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%	w _{opt} %	-3%	+3%

Egy bázisnak tekintett és ehhez képest más sűrűségű talaj tömegarányát elemezve megállapítható:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{V_1 \cdot \rho_1}{V_2 \cdot \rho_2}, \text{ mivel } V_1 = V_2 \text{ azonos ezért } \frac{G_1}{G_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \text{ azaz a hatásmélységtől független (!) lesz a}$$

megállapításunk. Ugyanez a logikája a víztartalom változásának is:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{V_1 \cdot \rho_1 \cdot (1 + w_1)}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot (1 + w_2)}, \text{ azaz } \frac{G_1}{G_2} = \frac{\rho_1 \cdot (1 + w_1)}{\rho_2 \cdot (1 + w_2)}, \text{ azaz a térfogat kiesik az arányárból.}$$

$$\text{A sűrűségi és víztartalmi korrekció fentiekből: } \zeta_{Ed} = \frac{\rho_1 \cdot (1 + w_1)}{\rho_2 \cdot (1 + w_2)} \cdot \frac{T_{rd}}{100} \quad (3)$$

3 Dinamikus modulus korrekciója, minősítő dinamikus modulus

A dinamikus modulus számítása (1 képlet) az (s) süllyedési amplitúdó mérése alapján történik. Ha a mért anyag sűrűsége változik, akkor a süllyedési amplitúdó is, azaz a dinamikus modulus is. A dinamikus modulus tehát a sűrűséggel arányos, ami azonban függ a talaj tömörségétől és a víztartalmától.

Az alkalmassági vizsgálatból ismerjük a talaj legnagyobb száraz Proctor sűrűségét és az optimális víztartalmát. Tudjuk továbbá a beépítésre, a víztartalomra előírt tűrést. A víztartalmat a helyszínen minden tömörségmérésnél mérni kell, így ezek az adatok rendelkezésre állnak. Ahol a CWA15846 szerinti SP-LFWD műszerrel mérjük a dinamikus teherbírást, ott mindig rendelkezésre állhat tömörségi adat is. A B&C berendezésnél minden dinamikus tömörségméréskor van mért adat a dinamikus teherbíráshoz is, mivel egy mérősorozatban mérjük a tömörséggel. Az 1-10 (max18) ejtésből számítjuk a tömörségi fokot, a 4-5-6 süllyedési amplitúdó átlagából a dinamikus modulus.

A 3. számú táblázatban számított korrekciós tényezőket alkalmazva bemutatjuk, hogy $E_d=40\text{MPa}$ mérési eredmény a tömörség miatti, víztartalom miatti korrekciók után a következőképpen néz ki (4.sz.táblázat), a vizsgálat tárgyát képező anyagokra (a sorok sorrendben pernye, finom homok, iszapos-homoklisztes homok és salakkő).

4. sz táblázat. Vizsgált anyagok mértékadó minősítő modulusa $E_d=40\text{MPa}$ bázis esetén

Edmin minősítő, mértékadó érték: Ed mért = 40MPa* korrekciós tényező											Anyag	
65.9	67.5	64.4	62.3	63.8	60.8	59.0	60.4	57.6	56.0	57.4	54.7	P
47.1	48.4	45.8	44.4	45.7	43.2	42.1	43.3	41.0	40.0	41.2	38.9	H.Bázis
43.5	44.7	42.4	41.1	42.2	40.0	38.9	40.0	37.9	37.0	38.0	36.0	I-HL-H
40.8	42.0	39.7	38.6	39.7	37.5	36.5	37.6	35.5	34.7	35.7	33.7	K
w_o	-3%	+3%	$w_{opt}\%$	-3%	+3%	$w_{opt}\%$	-3%	+3%	$w_{opt}\%$	-3%	+3%	w%
TrE%=85			TrE%=90			TrE%=95			TrE%=100			TrE%

Az a mért értékből számítottuk a százalékos arányokat. Ezt adjuk meg, mint jellemző terjedelmet a jelenleg vizsgált esetekre (mely a szélsőséges és a nem szélsőséges sűrűségi eltérésű anyagokra egyformán érvényes), az 5.sz táblázatban.

5. számú táblázat A vizsgált anyagok szélső értékeinek jellemző, százalékos eltérése

Mind a négy vizsgált anyagra	Átlag	100%
	Min	74%
	Max	148%
	Szórás	21%
Bázis és iszapos-hl homokra	Átlag	100%
	Min	86%
	Max	116%
	Szórás	8%

A dinamikus modulusra vonatkozó elemzés összefoglalásaként rögzíthető, hogy a vizsgált szélsőséges sűrűségű (de az építési gyakorlatban előforduló) anyagokat vizsgálva a dinamikus modulus korrekciós tényezője jelentősen megváltoztatja a modulus értékét, a korrekciós tényező 1,69 és 0,84 közötti(!). Még kisebb sűrűségi eltérés és megengedett víztartalom tartomány mellett sem hanyagolható el a korrekció, mely -14%, +16% százalékos eltérést mutat a 85-100% tömörségi tartományban, tehát a teljes mérési gyakorlatban. *Fentiek alapján minden mért dinamikus modulus minden esetben korrigálni kellene ahhoz, hogy azt a határértékhez viszonyítsuk, mert az eltérés jelentős lehet. Korrekciója általánosan*

$$\zeta_E = \frac{\rho_1 \cdot (1 + w_1)}{\rho_2 \cdot (1 + w_2)} \cdot \frac{100}{T_{rE}} \% \quad (4)$$

Ha a dinamikus teherbírást pontosan kívánjuk meghatározni (pláne összefüggését vizsgálni a statikus teherbírást E_2 értékével), akkor korrekció nélkül a következtetések, összefüggések nem tekinthetők elfogadhatónak. Megállapításaink értelemeszerűen adaptálhatók valamennyi dinamikus mérőeszközre, mint a nagytarcsás LFWD és FWD típusú (KUAB, Dynatest) mérőeszközökre. Ezek korrekciójával (a minősítő dinamikus modulus fogalmának bevezetésével) jelentős előrelépés tehető az összefüggések újvizsgálásával.

Kijelenthető tehát, hogy a dinamikus modulus pontos értéke csak a sűrűség (tömörségi fok, a víztartalom és a Proctor-sűrűség) ismeretében határozható meg.

4 A dinamikus tömörségi fok korrekciója

Az előző gondolatmenet alapján a mért süllyedési amplitúdót is lehetne korrigálni, a víztartalom és sűrűség értékeinek változása miatt. Mivel azonban a tömörségi fok számítása során a süllyedési amplitúdók *különbségét* (a maradó alakváltozást) vesszük figyelembe, a hatása is más. A víztartalom eltérése miatti korrekció tekintetében is más a helyzet, mivel a w_{opt} környezetében a T_{rw} értéke alig változik.

A jelen vizsgálatban választott anyagokra elvégeztük a dinamikus tömörségi fokra vonatkozó elemzést, melyet a 6. táblázatban mutatunk be. Megállapítható, hogy a korrekciós szorzó kiemelhető a deformációs együttható képletből a D_m elé.

$$T_{rE} \% = 100 - \varphi \cdot \zeta \cdot D_m \quad \text{és} \quad T_{rd} \% = T_{rE} \% \cdot T_{rw} \quad (5)$$

A választott anyagokból egy-egy adatsort választottunk a vizsgálat tárgyául, melynél megvizsgáltuk, hogy a víztartalom és sűrűség hatásait figyelembe vevő korrekciós együttható (3-as képlet) egy választott $\zeta=0,85-0,9-0,95-1,0-1,05-1,1-1,15$ aránysoránál a számított helyszíni relatív tömörségi fok ($T_{rE}\%$) hogyan változik.

6. sz. táblázat $T_{rE}\%$ érzékenysége a sűrűségi korrekciókra

$\zeta=$	$T_{rE}\%$	56.mérés	62.mérés
0.85	95.8	92.0	90.3
0.90	95.6	91.6	89.7
0.95	95.3	91.1	89.2
1.00	95.1	90.6	88.6
1.05	94.8	90.2	88.0
1.10	94.6	89.7	87.4
1.15	94.3	89.2	86.9

$\zeta=$	eltérés	56.mérés	62.mérés
-0.15	0.70	1.40	1.70
-0.10	0.50	1.00	1.10
-0.05	0.20	0.50	0.60
0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	-0.30	-0.40	-0.60
0.10	-0.50	-0.90	-1.20
0.15	-0.80	-1.40	-1.70

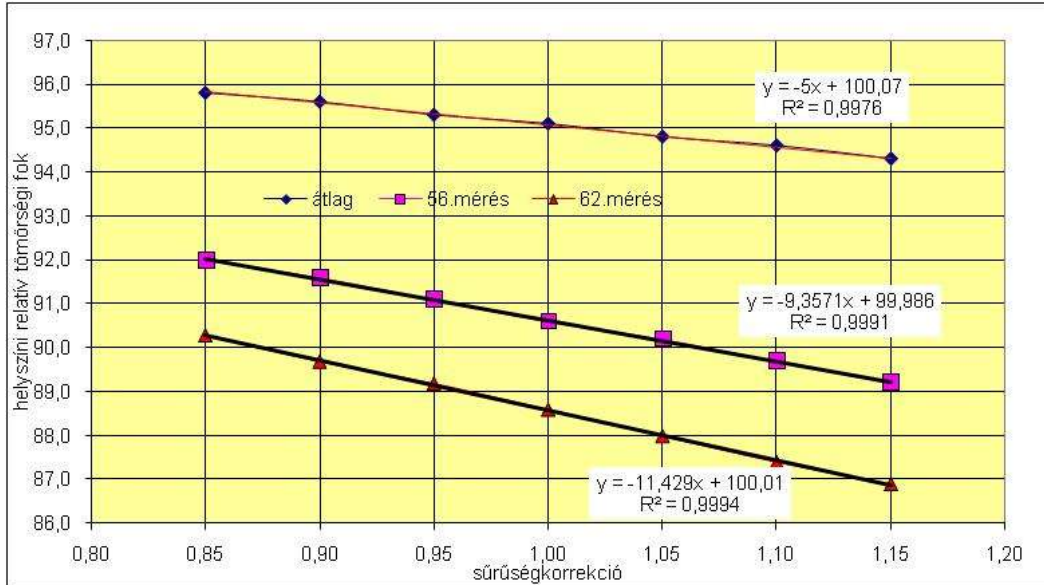
A 6. táblázat bemutatja a B&C berendezéssel 10-18 ejtéssel 25 mérési adatsor elaszticitás vizsgálatát. Az eredményeket úgy dolgoztuk fel, hogy a süllyedési amplitúdóknál a sűrűségkorrekciót is figyelembe vettük, a helyszíni relatív tömörségi fokot újra számítottuk, eltérését meghatároztuk. Minden korrekcióra számítottuk a 25 mérés helyszíni relatív tömörség fok értékeinek átlagát, illetve kiemeltük a 56.-os és 62.-es jelzésű mérést, melynél a helyszíni relatív tömörségi fok a legalacsonyabbra adódott, ezért a legérzékenyebb.

Például a 25 mérés $T_{rE}\%$ átlaga 95,1%-ról 95,8%-ra változik a 0,85 sűrűségkorrekciós tényezőre. Mivel a tömörségi fokot egész számra kell kerekíteni **megállapítható, hogy a dinamikus tömörségi foknál tapasztalt eltérés a hagyományos anyagoknál a sűrűségkorrekció miatt legföljebb 1% körüli, azaz nem jelentős.**

Az 1.sz ábra mutatja a sűrűségkorrekció hatását az átlagos, valamint 56. és 62. kiemelt mérések helyszíni relatív tömörségi fokára. Ezek lineárisak, meredekségük változó és az összefüggésük a következő:

- 25 mérés átlaga $T_{rE}\% = -5\zeta + 100$
- a kiemelt 56. mérésnél $T_{rE}\% = -9,4\zeta + 100$
- a kiemelt 62. mérésnél $T_{rE}\% = -11,4\zeta + 100$

1.sz. ábra A $T_{rE}\%$ relatív dinamikus tömörségi fok függése a sűrűségkorrekciótól

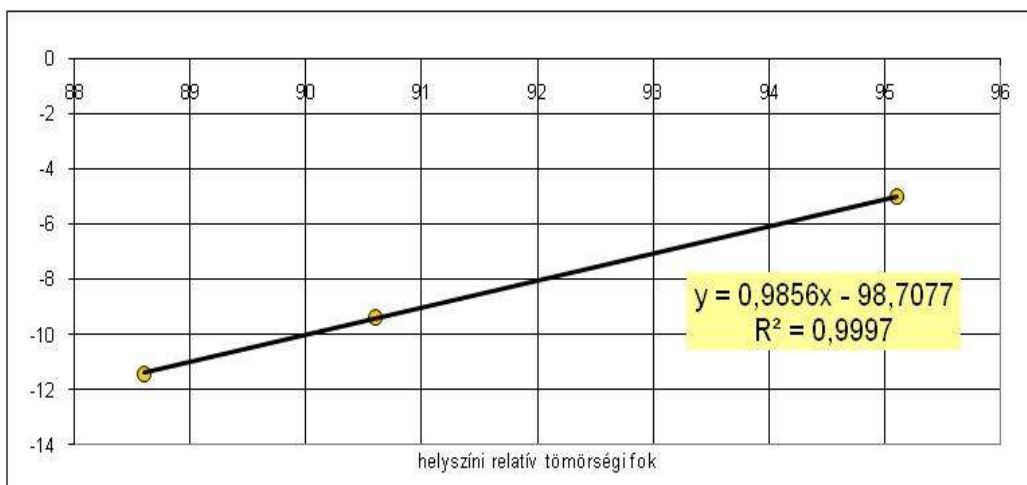


A helyszíni relatív tömörségi fok és a sűrűségkorrekció közötti összefüggés a meredeksége (m) tehát függ a relatív tömörségi foktól is (mely meghatározható). Az (m) meredekség és a helyszíni relatív tömörségi fok közötti összefüggést megvizsgálva (2. ábra) a következőt kaptuk:

$$m = 0,986T_{rE}\% - 98,7 \quad (R^2=1,0) \quad (6)$$

Fentiek szerint a sűrűség hatása hagyományos anyagoknál a relatív tömörségi fokra igen kis mértékű, de nagy pontossági igény esetén jól számítható. Jelentősége igazán a *pernye* anyagok építőipari alkalmazásánál van, mert ennek sűrűsége igen alacsony.

2.sz. ábra Az összefüggés meredekségének függése a $T_{rE}\%$ -tól



Példaként nézzünk meg a H-TPA laboratórium által mért dinamikus tömörség- és teherbírás mérési eredményt az M35 autópálya 21+875 kmsz pernyetöltésén. $E_d=18,9\text{MPa}$, $T_{rE}\%=91,7\%$, $w_t=38,3\%$ volt. A nedves sűrűség $1,26\text{g/cm}^3$, Proctor $\rho_{dmax}=0,91\text{g/cm}^3$ és $w_{opt}=26\%$, $T_{rw}=0,985$. Megjegyzés: statikus teherbírás $E_2=37\text{MPa}$, $T_t=1,6$ és kiszűrő hengeres tömörségi fok $T_{rp}=98,3\%$ volt.

Számítások

- sűrűségkorrekció 3-as képlettel $\zeta = (0,91 \times 1,26)/(1,65 \times 1,07) = 1,147/1,766 = 0,649$
- minősítő dinamikus tömörségi fok számítása:
 $m = (T_{rE}\% \times 0,986) - 98,7 = -8,3 \rightarrow T_{rE}\% \text{ minősítő} = -8,3 \times 0,649 + 100 = 94,6\%$
 $T_{rw}=0,985 \rightarrow T_{rd}\% \text{ minősítő} = T_{rw} \times T_{rE}\% = 0,985 \times 94,6 = 93,2\% > 90\%$
- minősítő dinamikus modulus
 $E_d \text{ minősítő} = E_d \times (1/\zeta) \times (100/T_{rd}\%)$
 $E_d \text{ minősítő} = 18,9 \times (1/0,649) \times (100/93,2) = 18,9 \times 1,54 \times 1,07 = 31,1\text{MPa} > 25\text{MPa}$

Mint látható, a dinamikus tömörségi fokra gyakorolt hatás az impulzus vizsgálat szerint kevésbé releváns. A sűrűségnek tehát az *általánosan használt anyagoknál nincs jelentős hatása a tömörségi fokra*. Ezt egyébként már tapasztaltuk a Proctor-vizsgálatok elemzésekor, amikor a Φ értékét vizsgáltuk, mind elméleti mind gyakorlati vonatkozásban. Pernye alkalmazása esetén a mért helyszíni relatív tömörségi fokot is korrigálni kell, de ennek hatása sem olyan jelentős, hogy a biztonság javára ne lenne elhanyagolható.

5 Összefoglalás

A német-típusú LFWD berendezéssel a mért dinamikus modulusokra jellemzően nincs előírás a párhozamos eredmények meghatározására, azaz átlagképzésre, az eredmény egyetlen vizsgálat, ettől pedig az eredmény különösen érzékeny. A BC SP-LFWD mérés ÚT2-2.124, illetve CWA 15846 a mértékadó dinamikus modulus képzésére előírja, hogy egy méteren belül két mérést kell végezni, illetve azt átlagolni, ezért kevésbé érzékeny.

Minden dinamikus mérés az impulzus-törvényt használja fel arra, hogy a fölmű felszínén terhelést hozzon létre. Ennek kapcsolatai, tömegei ismertek. Jelen tanulmány azt tűzte ki célul, hogy ezen kapcsolatok végigtekintésével, elemzésével tegyen megállapításokat a talaj sűrűségeltéréseinek következményeire, esetleges összefüggéseit feltárva. Szükségesnek láttuk annak elemzését, hogy a különböző sűrűségű anyagok illetve azonos anyagnál talajállapotok (víztartalom, tömörség) esetén, de különösen a szélsőséges esetekben mért dinamikus modulusnál milyen hatás, milyen kapcsolat mutatható ki, korrekció alkalmazása szükséges-e, illetve lehetséges-e. Különösen fontos megemlíteni e problémakörben a kohósalakot, salakkövet, pernyét, pernyés stabilizációt, meszes stabilizációt, melyek mint másodnyersanyagok, illetve mint stabilizálási technológiák vagy sűrűségük, vagy anyaguk miatt nehezen, vagy egyáltalán nem mérhetők izotópos berendezéssel, emiatt igen nehezen, vagy egyáltalán nem minősíthetők hagyományos tömörségmérési módszerekkel.

A tanulmány kimutatta, hogy *dinamikus modulus meghatározásánál a sűrűség, víztartalom és tömörségi fok pontos ismerete nélkül nem lehet mértékadó minősítő eredményt szolgáltatni*. Ha a dinamikus teherbírást pontosan kívánjuk meghatározni, netán összefüggését vizsgálni a statikus teherbírás E_2 értékével, akkor ezek nélkül a korrekciók nélkül a következtetések, összefüggések nem tekinthetők megbízhatónak. Ezek a korrekciók annál durvábbak, minél nagyobb a választott bázistól való eltérés. A dinamikus modulusok számításakor a korrekciót minden esetben figyelembe kellene venni. Csak emiatt a mért értékek akár 10-20%-kal is eltérhetnek a mértékadó

minősítő értéktől, nem beszélve arról, hogy egységes követelményünk van a teherbírási határértékre, nem pedig anyagonkénti.

Megállapításaink értelemszerűen adaptálhatók *valamennyi dinamikus mérőeszközre*, mint a nagytárcsás LFWD és az FWD (KUAB, Dynatest) mérőeszközökre. Ezek korrekciójával jelentős előrelépés tehető az összefüggések újravizsgálásával.

Azok a törekvések, melyek a minősítéseket a dinamikus teherbírás mérésével, a tömörség meghatározása nélkül kívánják megoldani, ezzel az elmélettel nem támaszthatók alá: szükség van a tömörségi fok ismeretére ahhoz, hogy a mért dinamikus modulust a mértékadó minősítő modulusra átszámítani lehessen.

A tanulmány igazolta, hogy valóban elegendő egy dinamikus teherbírási határérték megszabása az előírásokban, tenderekben, nem kellene anyag típusonként külön szabályozni ezeket, ha a mért értékeket mértékadó minősítő értékre korrigáljuk.

Kijelenthető, hogy a dinamikus teherbírás pontos értéke nem határozható meg a tömörségi fok, a víztartalom és a sűrűség pontos ismerete nélkül.

B&C berendezés alkalmazásánál igen egyszerű a tömörségi és a víztartalmi eltérések miatti korrekció, mert valamennyi ehhez szükséges adat inputként szerepel, számítható. Ismert anyag megnevezése, Proctor sűrűség, az optimális és mért víztartalom, valamint a tömörség. ***Egyértelműen előnyös és javasolt a jelenlegi vizsgálatok alapján a B&C berendezés szélesebb körű alkalmazása és használata, különösen frekventált, magas minőségi követelményű helyeken.***

A mért dinamikus modulus korrekcióját a D=300mm tárcsaméretű, úgynevezett nagytárcsás BP-LFWD berendezéseknél is alkalmazni szükséges. Korrekció nélkül ugyanis nem alkalmasak az egyedi eredmények megfelelő pontosságú mértékadó, minősítő eredmény előállítására. Több mérésből képzett mértékadó eredmény szabványosítása (mint a B&C esetén) sem oldja meg a korrekció problémáját, attól nagy valószínűséggel itt sem lehet eltekinteni.

Bebizonyosodott, hogy a B&C SP-LFWD berendezés alkalmazása előnyös akkor is, ha tömörséget nem kell meghatározni, csak teherbírást. A tanulmány felveti annak szükségességét, hogy minden esetben mérjünk a dinamikus modulus mellé tömörséget. Ez a B&C berendezéssel gyakorlatilag 6 helyett 10 ejtést jelent, azaz minden feltétel nélkül könnyen megoldható.

A tanulmány második részében kimutatta, hogy helyszíni relatív dinamikus tömörségi fok $T_{re}\%$ tekintetében általában (pernye kivételével) nem kell korrekció, mert a sűrűségi eltérések hatása a mérési eredményekre minimális. A hatás jelentéktelen amiatt, hogy a számítás csak a süllyedési amplitúdók különbségét, a maradó alakváltozást veszi figyelembe.

Az építőmérnöki geotechnika nem nélkülözheti sem a teherbírás, sem a tömörség ismeretét, egymásra való hatásuk ellenére. A teherbírásra vonatkozó határérték teljesülése ellenére történhet utántömörödés, süllyedés, illetve jelen tanulmánnyal igazoltan valóban megtörténhet, hogy a mérési eredmény látszólagosan kielégíti a teherbírási határértéket, valójában azonban nem megfelelő. Ehhez a szükséges korrekció elvégezhető jelen tanulmány alapján és a ***mértékadó minősítő eredmény*** megbízhatóan számítható. Ennek kell elérni az előírt teherbírási határértéket.

A minőség-ellenőrzés, minőségtanúsítás ma már nem nélkülözheti a kellően pontos méréseket. A mérési hiba feldolgozása miatt, hibásnak minősített munka (felesleges javítási költsége miatt) éppúgy kerülendő, mint a jónak minősített, de valójában nem megfelelő minőség. Az előírást nem kielégítő földmunka meghibásodáshoz vezet, mely mindig és jól láthatóan megbosszulja magát. A nem megfelelő alapok utólagos javítása igen nehéz, nyugodtan mondhatjuk, egy rémálom. Autópályáinkon sajnos gyakran látjuk viszont a deformációt, süllyedést, a minősítő mérések „megfelelősége” ellenére.

A B&C berendezés és elméletének folyamatos fejlesztése lehetővé teszi a korrekt minőségtanúsítást, megelőzve a viszonyítási sűrűségeen alapuló tömörségi fok körüli vitákat és tisztázza a lehetséges eltérések okát. Mivel a jelenlegi műszaki elemzés is kimondottan előnyös tulajdonságokat mutat a B&C berendezés javára, ezért széleskörű alkalmazását ajánljuk.

Irodalomjegyzék

MSZ 15320 Földművek tömörségének meghatározása radioizotópos módszerrel (Determination of the compactness of earthworks by radioisotopic method)

MSZ EN 13286-2 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú keverékek 2. Vizsgálati módszerek a laboratóriumi viszonyítási térfogatsűrűség és víztartalom meghatározására. Proctor-tömörítés. (Mixtures without binding material and with hydraulic binding material 2. Test methods for the determination of the laboratory reference volume density and water content. Proctor-compaction)

CWA 15846 Measuring Method for Dynamic Compactness & Bearing Capacity with SP-LFWD

ÚT 2-2.124 Dinamikus tömörség és teherbírás mérés kistárcsás könnyűejtősúlyos berendezéssel (Dynamic compactness and bearing capacity measurement with small-plate light falling deflectometer)

METRÓBER: ER-TRG01 Ellenőrzési rendszer próbatömörítések végrehajtására és értékelésére az M7 Zamárdi–Balatonszárszó szakszán. (Control system for the implementation and the evaluation of test compactions on the road section of M7 between Zamárdi and Balatonszárszó/ Mérnöki Eljárási Utasítás. p.10)

Report on usage of Andreas dynamic load bearing capacity and compactness deflectometer) University of Ljubljana Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Comparison of B&C LFWD and sand filling method – Ms. Panarat – Ramkhamhaeng University, Thailand

Pusztai József, Imre Emőke, Lőrincz János, Subert István, Trang Quoc Phong: Nagyfelületű, dinamikus tömörségmérés kifejlesztése helyazonosítással és a tömörítő hengerek süllyedésének folyamatos helyszíni mérésével. (Development of large-area, dynamic compactness measurement by site identification and the continuous on-site measurement of the depression of compacting rollers) COLAS jelentés 2007.

Subert I., Phong T.Q.: Az izotópos és dinamikus tömörségi fok szórás-analízise (Analysis of Standard deviation of the isotopic and the dynamic compactness rate)

Subert I., Phong T.Q.: Proctor-vizsgálatok új értelmezési lehetőségei. (Options for new interpretations of Proctor-tests) Mélyépítéstudományi Szemle, 2007.

Király Á.: Földmunkák minősítő vizsgálatainak hatékonysági kérdései Magyarországon (Efficiency issues of qualification tests used for earthworks, in Hungary)

Subert: Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006

Subert I.: „Dinamikus tömörségmérés a hazai autópályákon és városi helyreállításokon” (Dynamic compactness measurement on Hungarian highways and urban reconstructions) Geotechnika Konferencia 2006 Ráckeve. (2006. október 17-18.)

Subert I., Fáy M., Király Á.: Közúti forgalom igénybevételének modellezése új, dinamikus tömörség- és teherbírásméréssel. (Modelling of the straining of public road traffic by the new, dynamic compactness and bearing capacity measurement) Városi Közlekedés 2006

Subert I., Fáy M., Király Á.: Egy földmű-tömörségi anomália feltárása és megoldása. (Presentation and solution of an anomaly of earthwork density) Mélyépítéstudományi Szemle 2006

Subert I.: „Dinamikus tömörségmérés aktuális kérdései. A dinamikus tömörség mérés újabb tapasztalatai” (Recent issues of dynamic compactness measurement. New experiences of the dynamic compactness measurement) Geotechnika Konferencia 2005 Ráckeve. (2005. október 18–20.)

Subert I.: „Új, környezetkímélő, gazdaságos mérőeszközök a közlekedésépítésben” /'New, environmental-friendly, economical measuring instruments in traffic building'/ Geotechnika Konferencia 2004 Ráckeve. (2004. október 26–27.)

Subert I.: „A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paraméterei és a modulusok átszámíthatósági kérdései” (Recent parameters of dynamic compactness and bearing capacity measurement and recalculation issues of modulus) Közúti és Mélyépítési Szemle, 55. évf. 2005. 1. sz. (5 oldal)

Subert I.: „B&C dinamikus tömörségmérés” (B&C dynamic compactness measurement) Mélyépítés 2004 október–december (p. 38–39)

Subert I.: B&C – egy hasznos társ (B&C – a useful partner/ Magyar Építő Fórum, 2004/25. szám p. 36)