

Európában használatos tömörség- és teherbírás mérési módszerek

Examples of BC theory's applications – Part3

Subert István okl.építőmérnök, okl.közlekedésgazdasági mérnök

Bevezető, előzmények

A földművek, közúti- a vasúti- és vízépítési műtárgyak építésének egyik legfontosabb minősítő paramétere a tömörség. Az után-tömörödés megelőzéséhez, a vízbehatolás mérsékléséhez szükséges határértékeket valamennyi európai szabályozás fontos paraméterként kezeli.

A tömörségi fok – hagyományosan - a beépítés során elért sűrűség és a viszonyítási sűrűség hányadosa, százalékban kifejezve. A tömöríthetőségi vizsgálat fő jellemzője ezért a legnagyobb száraz sűrűség - mint viszonyítási sűrűség –egy lehetséges és elterjedten alkalmazott, laboratóriumban meghatározott érték.

A viszonyítási sűrűséget a laboratóriumban hazánkban - mértékadóan - a módosított Proctor-vizsgálatokkal végezzük, Proctor-edényben, ejtő súlyos tömörítő géppel. A német területeken jellemző az egyszerűsített Proctor vizsgálat, mely kisebb tömörítő munkával, vastagabb rétegvastagsággal és kevesebb réteggel dolgozik, ezért a 100% feletti tömörségi fok is lehet követelmény. Az európai szabvány újabb típusú tömöríthetőségi vizsgálati módszereket is megenged a viszonyítási sűrűség meghatározására, mint a vibrátoros vizsgálatok:

EN 13286-3 viszonyítási sűrűség meghatározása vibro-sajtolásos módszerrel

EN 13286-4 viszonyítási sűrűség meghatározása vibro-kalapácsos módszerrel

EN 13286-5 viszonyítási sűrűség meghatározása vibro-asztalos módszerrel

Ezek alkalmazása, kipróbálása még nem történt meg. Egymással való egyenértékűségük e vizsgálatoknak egyelőre nem ismeretes, átszámításuk nincs. Várhatóan azonban ezek aligha fognak egyezni a különböző modellhatás miatt. Az alapvető feltétel azonban ezek összehasonlításánál, hogy a *tömörítési munka* megegyező legyen.

A tömörségi fok mellé újabb követelmények, ajánlások is terjednek. Ilyen például a telítettség, vagy levegőtartalom ajánlott értékeinek előírása. Már az FGSV 516, de az ÚT 2-1.222 ÚME is, egyes esetekben $\leq 12\%$ levegőtartalom biztosítását kéri az előírt tömörségi fok elérése mellett. A megengedett telítettségre nincs közvetlen előírás, bár az említett levegőtartalom ilyen előírásnak is értelmezhető. Nagyfelületű földmunkákra dolgozott ki minősítési lehetőséget a tömörség és teherbírás kontrolljára az osztrák Prof D.Adam és Prof Kopf, a hengerre szerelt gyorsulásmérővel határozva meg a tömörítés állapotát (Evib és Omega).

Teljesen új iránynak tekinthető a magyar dinamikus tömörségvizsgálat is, mely a terjedőben lévő LFWD (Light Falling Weight Deflectometer) berendezés egy módosított változatával mérhető, az ejtések során kialakuló tömörödési görbe elemzésével.

Cégünk a portugál Correia professzor úr meghívására részt vett egy összehasonlító vizsgálat sorozatban, így beszámolhatunk az ott tapasztalt új vizsgálati módszerekről is.

Tömörésmérés a portugáliai EVORA-ban

A Portugáliai Műszaki Egyetem Geotechnikai Tanszéke és Prof Correia meghívására, egy kísérleti szakaszon - sok más műszer és módszer mellett - a magyar B&C dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés is tesztelésre kerülhetett. Az európai szabadalmat kapott magyar módszert az Andreas Kft fejlesztette ki. A hazánkban jól ismert vizsgálati módszer megmérettetésére számos új és hagyományos mérés mellett valósulhatott meg.

A kísérleti próbabeépítés Evora város mellett volt, ahol K-Ny-i irányban az országot átszelő új, nagysebességű vasútvonal épül. Az elvégzett hagyományos és kísérleti mérések a földmű tömörségének, valamint teherbírásának minősítésére szolgáltak.



1. kép, Portugália, elkészült pályaszakasz



2. kép, Portugália, próbabeépítés helyszíne

Tömörsgmérés radioizotópos műszerrel

Az egyik legelterjedtebb mérési eljárás (ASTM D6938), mely során a talajba bocsátott, majd a talajon áthaladó gamma-sugárzást detektor észleli; és a mérési idő alatt összeszámlált impulzusok száma a talaj nedves sűrűségével arányos. Lapszondás és tűszondás mérések is történtek. A tömörségi fok meghatározásához kell még a víztartalom értéke és a viszonyítási sűrűség, amihez a terepi száraz sűrűséget hasonlítják. Európában jellemzően az EN 13286-2 szerinti „módosított-”, német területen még az „egyszerűsített” Proctor, legnagyobb száraz sűrűség alkalmazása használatos. A vizsgálat időigénye 15-25 perc és három párhuzamos vizsgálatot kell végezni, azt átlagolni. Két laboráns mérőszemélyzet az előírás.



3. kép, Izotópos tömörségmérés



4. kép, Homok-kitöltéses módszer

Homok-kitöltéses módszer

A mérés (ASTMD4914) elve, hogy a vésővel, kanállal kiszedett talajmintát homokkal helyettesítik, hogy a térfogatát meghatározzák. A felületre körlemez nyílású sablont felhelyezik, majd a nyílásán át gondosan kiszedik, mérik a tömegét és a víztartalmát. Ezután száraz homokkal feltöltik a mélyedést, a térfogatot számítva. Kifejezetten idő- és energiaigényes, sőt „négykézlábos” módszernek tartják. A módszer másik változata, amikor az üregbe gumimembrán, abba pedig mért térfogatú víz kerül. A kapott terepi sűrűségéből számítják - a viszonyítási sűrűséget figyelembe véve - a tömörségi fokot.

A Bangkoki Ramkhamhaeng Egyetemen a CWA15846 dinamikus tömörségmérés összehasonlító vizsgálataként harminc darabos összehasonlító tömörségmérésre került sor, melynek értékelése szerint a homokkitöltéses módszerrel számított tömörségi fok és a B&C dinamikus tömörségi fok egy tizedre egyező értéket mutatott.

A homokkitöltéses módszer vizsgálatának időigénye 25-35 perc a helyszínen, egy laboráns elegendő. Párhuzamos vizsgálatot nem alkalmaznak.



5-6. kép, ASTM Sand-filling homok-kitöltés vizsgálat

B&C dinamikus tömörségmérés

Sikeres magyar vizsgálat, mely a Light Falling Weight terhelési módszert alkalmazza, kistárcsás mérőeszközre történő átalakításával egy tömörödési görbét állít elő az ejtések sorozatát képezve úgy, hogy adott magasságból, 10kg tömegű testet csillapítórugó közvetítésével 163mm átmérőjű merev tárcsára ejti 10-18 alkalommal az ejtő súlyt. Ez $p_{din}=0,35$ MPa tárcsa alatti dinamikus terheléssel tömöríti a réteget (CWA 15846, illetve ÚT2-2.124). A süllyedési amplitúdók sorozatából határozható meg a relatív helyszíni tömörségi fok (és a dinamikus modulus is), mely az adott víztartalom mellett elért helyszíni relatív tömörítést jellemzi. A dinamikus tömörségi fok a relatív tömörségi fok és a nedvességkorrekciós tényező szorzata. A nedvesség hatását figyelembe vevő tényező a talaj víztartalomtól függő tömörödését jellemzi. ($Trw \leq 1,00$).



7-8. kép, ANDREAS új dinamikus tömörség- és teherbírás mérő műszere

A dinamikus tömörségmérés 2%-os mérési pontossága lehetővé teszi a minőség-ellenőrzés hatékonyságának javítását, a korrekt minőség-tanúsítást. A mérés igen gyors a többi mérési módszerhez képest, egy laboráns és 2-3 percet vesz igénybe, valamint párhuzamos méréssel képez átlagot. A B&C dinamikus tömörségmérés módszer független a sűrűségtől, ezért alkalmas bármilyen anyagok, még az igen alacsony sűrűségű pernye, vagy az inhomogén sűrűségű kohósalak töltések, rétegek mérésére, de az izotópos készülékeket megbolondító meszes stabilizációk vizsgálatára is.

A B&C a dinamikus tömörségi fok mérésével egyidejűleg meghatározza a talaj E_d (MPa) teherbírasi modulusát is. Párhuzamos mérést alkalmaz, melyből átlagot számít. Egy laboráns a méréshez elegendő.

Nagytárcsás könnyű-ajtósúlyos berendezés

Mint ismeretes, a 300mm-es tárcsaátmérőjű BP-LFWD (más nevén német-LFWD) a dinamikus modulus mérési eredményéből számítja a s/v (alakváltozás/tárcsasebesség) hányadost, ami a tömöríthetőséget, az elért tömörséget is jellemezheti. A *teherbírás meghatározására* Európában nagyon terjed a Light Falling Weight Deflectometer típusú berendezések alkalmazása, melynél adott magasságból, 10kg tömegű testet ejtenek. Ez a 300mm átmérőjű merev tárcsa alatt $p_{din}=0,1$ MPa dinamikus terhelést hoz létre (TPBF-StB8.3, RVS08.03.04), $c=2$ hajlékony Boussinesq tárcsaszorzót, valamint 0,5 fix Poisson tényezőt alkalmaz. Az LFWD-típusú teherbírás mérő készülékek előnye, hogy ellensúlyt, terhelő gépkocsit nem igényelnek. Az alakváltozást jellemző átlagos süllyedési amplitúdó a második mérési sorozatából határozható meg. Számítása $E_{vd}=22,5/s$ (N/mm^2). A vizsgálat időigénye 10-15 perc a helyszínen, egy laboráns a méréshez elegendő. Párhuzamos vizsgálatot nem alkalmaznak.



9.kép, Kistárcsás és nagyárcsás LFWD könnyűajtósúlyos berendezések

PORTANCEMETRE-módszer

A földmű *teherbírásának folyamatos* mérésére használatos Francia műszer, melyet gépjárművel vontatnak. A teljes mérés a vezetőfülkéből vezényelhető, ahol az adatgyűjtő és feldolgozó rendszer is helyet kap. A vibrációs terhelésű kerék, ennek érzékelő kerete a tréler vázára vannak függesztve. A mérés 1m/sec sebességű. A vizsgálat nagy előnye, hogy folyamatos menetben 30 perc alatt 1800 méter hosszú réteg mérhető a helyszínen. Egy laboráns (informatikus) és egy vezető szükséges a mérés elvégzéséhez. Párhuzamos vizsgálatként oda-vissza mérnek egymás melletti nyomon.

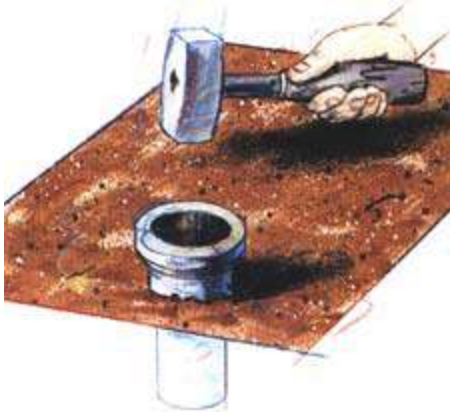


10-11. kép, Portancemetre folyamatos teherbírás mérési módszer

Kiszúróhengeres tömörség-mérési módszer

A Portugáliai összehasonlításban nem alkalmazták ezt a mérési módszert. A kiszúróhengeres módszer hazánkban jól ismert, igen régóta alkalmazott eljárás, pontossága azonban egyes becslések, vélemények szerint rosszabb az izotópos mérésnél. A terepi sűrűség meghatározásához kell a hengerben maradó anyag tömege, a víztartalom értéke, majd az így számított száraz terepi sűrűség és a viszonyítási sűrűség aránya a tömörségi fok. Európában jellemzően az EN 13286-2 szerinti „módosított-”, német területen még az „egyszerűsített” Proctor, legnagyobb száraz sűrűség alkalmazása használatos. A vizsgálat időigénye 10-15 perc és három párhuzamos vizsgálatot kell végezni, azt átlagolni. Egy laboráns elegendő a méréshez.

Az M35-ös autópályán tudunk pernye-töltésen történt összehasonlító mérésről. A B&C mérés (CWA módosítás előtti) értékei néhány százalékkal *alacsonyabbak* voltak, mint a kiszúró-hengeres eredmények.



12. kép, Kiszúróhengeres módszer

13. kép, Durham MDI

Durham MDI (Moister Density Indicator) sűrűség- és víztartalommérő

Dielektromos állandó elvén működő amerikai műszer. Nem csak a víztartalmat, hanem a sűrűséget is e módszerrel méri, megfelelő kalibrálás után. Hibája kisebb, mint az izotópos műszereké, de a viszonyítási sűrűség alkalmazását nem nélkülözheti. A terepi sűrűség meghatározásához kell a mért víztartalom értéke, majd az így számított száraz terepi sűrűség és a készülékbe a kezelő által beütött viszonyítási sűrűség aránya adja a tömörségi fokot. Az EN 13286-2 szerinti „módosított-”, illetve az „egyszerűsített” Proctor, legnagyobb száraz sűrűség alkalmazása is lehetséges, ugyanúgy, mint a többi viszonyítási sűrűséget alkalmazó mérésnél. A vizsgálat időigénye 10-15 perc. Amerikai mérési előírás tudomásunk szerint elkészült, de európai változatáról nincs tudomásunk. Vélhetően egy laboráns is elegendő a méréshez.

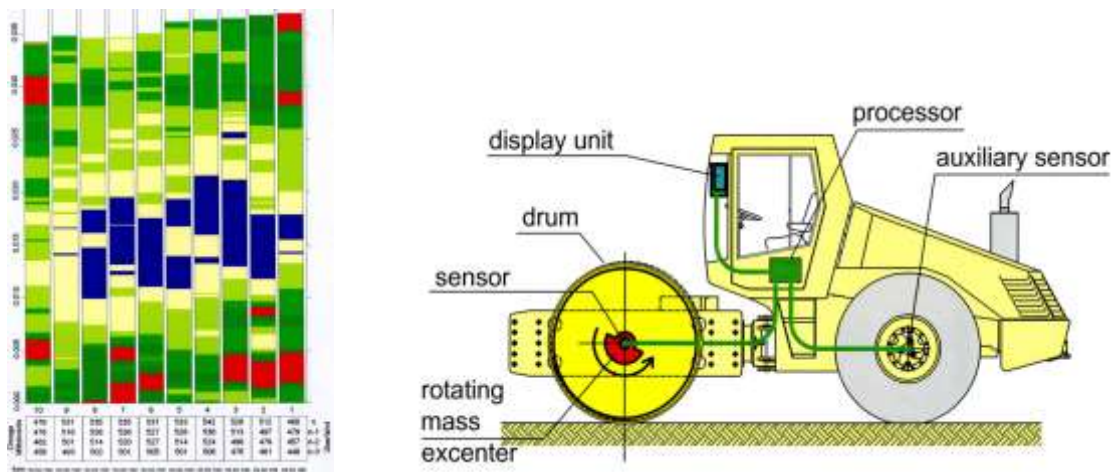
Continouos Compaction Control – Nagyfelületű tömörségmérés

Nagyfelületű tömörítések tömörség- és teherbírás mérésére, melyet Professzor H. Brandl vezetésével prof Kopf és prof Adam fejlesztettek ki. Ez a módszer nagy felületű földmunkák minősítésére alkalmazható.

A tömörítő BOMAG hengerre szerelt gyorsulásmérővel határozzák meg a mért amplitúdók változásaiból a E_{vib} modulust és az Omega mérőszámot. A fejlesztő a Terrameter, és az Omega-értékének kidolgozását Dipl.-Ing. Uwe Blancke végezte, a Bomag GmbH keretében).

A mérési eredmények egy 3 dimenziós képen ábrázolhatók, szinkódokkal. A tömörségi fokkal a próbabeépítésen tapasztalati úton hozzák összhangba, majd a végső 3D-s mérési eredményt nagyfelületű minősítésként is elfogadják.

Szlovéniában a Szlovén Műszaki Egyetem Geotechnika Tanszéke szakvéleményében a B&C dinamikus tömörségi fok és a CCC E_{vib} értéke között kiemelkedően jó korrelációt mutatott ki.



14-15. kép, CCC nagyfelületű tömörség és teherbírás vizsgálata

Statikus teherbírás modulusból meghatározott tömörségi tényező

A teherbírás Evorában a statikus tárcsás vizsgálattal hagyományosan (házánkban is használt) 300mm-es (ASTM D1194) és a d=600mm-es Francia szabvány (NF P 94-117-1) szerint is vizsgálták. A második felterhelésből származó E_{v2} teherbírás modulusa és az első terhelésből adódó E_{v1} modulusok aránya a hazánkban is ismert tömörségi tényező (T_t), melynek a tömörséget közelítően jellemző hatást tulajdonítunk (lásd ÚT2-3.206). A mérési módszerek felterhelési szakaszai és értékelése néhány ponton eltér a hazánkban megszokottól.

A vizsgálat időigénye 25-35 perc a helyszínen, egy laboráns a méréshez elegendő. A terheléshez ellensúly szükséges. Párhuzamos vizsgálatot nem alkalmaznak.



16-17. kép, Statikus teherbírás vizsgálat d=600 mm tárcsával

Young-féle modulus

A megfelelő teherbírási jellemző meghatározására alkalmas a GeoGauge elektromechanikus módszert (D 6758 –02) is alkalmazták. Ezt a gyártó a tömörségmérés mellé, a réteg teherbírasi homogenitásának ellenőrzésére javasolja alkalmazni. A műszert a szemcsés, kohézió nélküli anyagok mérésére ajánlják, valamint kissé iszapos és agyagos anyagok elemzésére, amelyek nincsenek kitéve a nedvességtartalom változásának.

A módszer hátránya, hogy a mérési eredményt könnyen megzavarja a környezet vibrációs terhelése. Tudomásunk szerint a tömörség nem jellemezhető, a teherbírásból viszont következtetni lehet a próbatömörítés alapján várható megfelelésre.

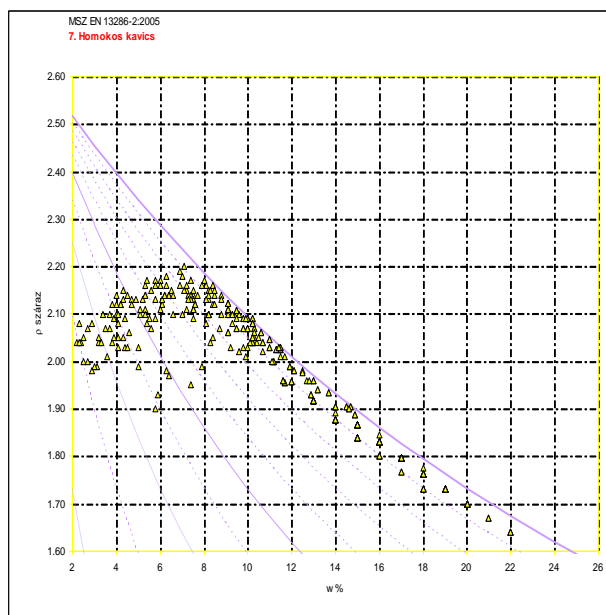
A vizsgálat időigénye 10-15 perc a helyszínen, egy laboráns a méréshez elegendő. Párhuzamos vizsgálatot nem alkalmaznak.



18-19. kép, Geogauge műszer

Viszonyítási sűrűség kérdései

A módosított Proctor-vizsgálatra vonatkozó előírás Magyarországon az MSZ 14043/7 volt, az uniós csatlakozás óta az MSZ EN 13286-2 szabvány (illetve ennek 7.4 pontja ajánlott, mint a módosított Proctor-vizsgálat), jelentősebb eltérés nélkül. Magyarországon 2005 óta az európai előírásokat tükröző EN 13286-2 szabvány is érvényben van.



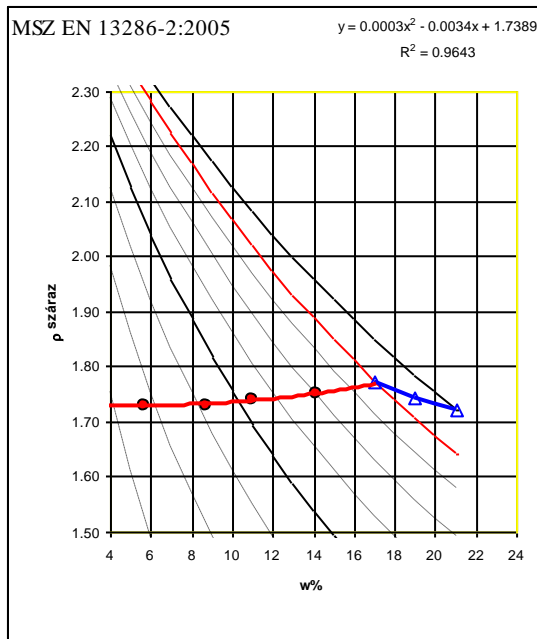
1. ábra Proctor körvizsgálat: Homokos kavics

Nem eléggé közismert, hogy a viszonyítási sűrűséggel számított tömörségi fok hibája egyes méréseknél elérheti akár a 4-6 Trg%-ot is. A tömöríthetőségi vizsgálat olyan hosszadalmas és körülményes, hogy nagy mintaszámú mérési sorozat a vizsgálati szórás meghatározására igen ritkán készül. Elemzést végeztünk egy nagyszámú körvizsgálatból (KTI 2005. évi Proctor körvizsgálat), mely a problémát jól bemutatja.

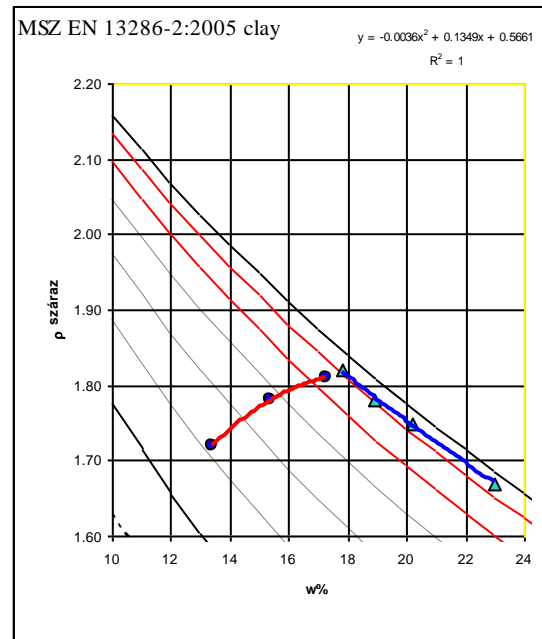
A tendencia jellemzésére az ábrán feltüntettük a nagy víztartalmak tartományában néhány számított értékeket is annak jellemzésére, hogy a jellegzetes Proctor-görbe alakjánál igazoljuk, hogy az a telítési vonalak közé simul a nedves ágba (lásd 1-2-3 ábra)

Nem részletezzük, csak utalunk korábbi publikációinkra, melyben javasoltuk a w_{opt} -hoz tartozó telítési vonal (például $S=0,88$ és $S=0,95$) és a száraz ági Proctor-görbe metszéspontjától balra, illetve jobbra eső szakasz szétválasztását.

Ennek oka az, hogy az anyag viselkedése döntően megváltozik a nedves ágba és ezért matematikailag nem azonos feltételekkel kell kezelni. A közös pont a két típusú görbe között nem ad felhatalmazást arra, hogy azokat azonos matematikai modellként, egy görbeként kezelhessük.



homok



agyag

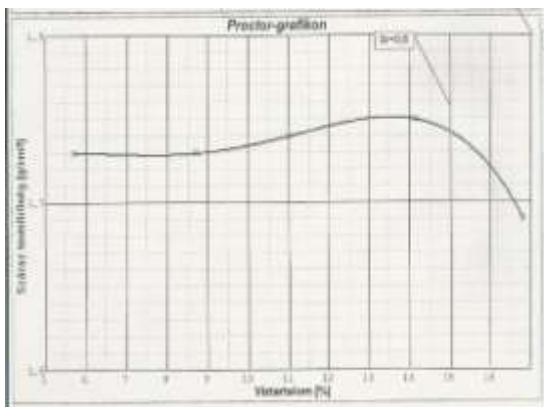
2-3. ábra Proctor görbék az „összetett-görbe” feldolozási módszerrel

A „két szakasz egy görbe” Proctor-görbét értékelő elméletet (2006 Phong - Subert) szerint vizsgálva megállapítható, hogy más-más optimális víztartalmat mutatnak a feldolgozások. Kimutattuk, hogy a száraz ág görbéje többnyire domború, de néha egy egyenes, vagy akár kissé homorú görbe.

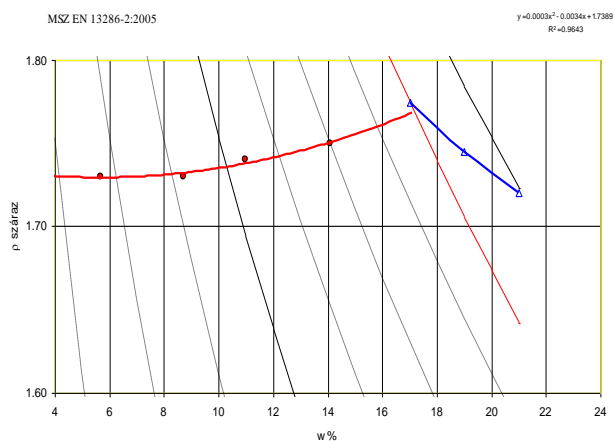
A nedves viselkedési görbeszakasz mindig jellegzetesen belesimul a telítési vonalak közé és végül közelít $S=1$ telítettséghez (2-3 ábra). Mivel magas telítettségénél a helyszíni tömörítés sem lehetséges, ezért nincs értelme a görbe bevonásának a matematikai modellbe.

A Proctor-görbe a mért pontokból regressziós analízissel számítható és egyben megadja a dinamikus tömörségméréshez szükséges nedvességkorrekciós görbét is ($Trw = \rho_{di} / \rho_{dmax}$).

Példaként bemutatunk egy jellemző esetet, amikor az optimális víztartalom eltér. Az új feldolgozásban egyértelmű a töréspont. (lásd 4-5. ábra).



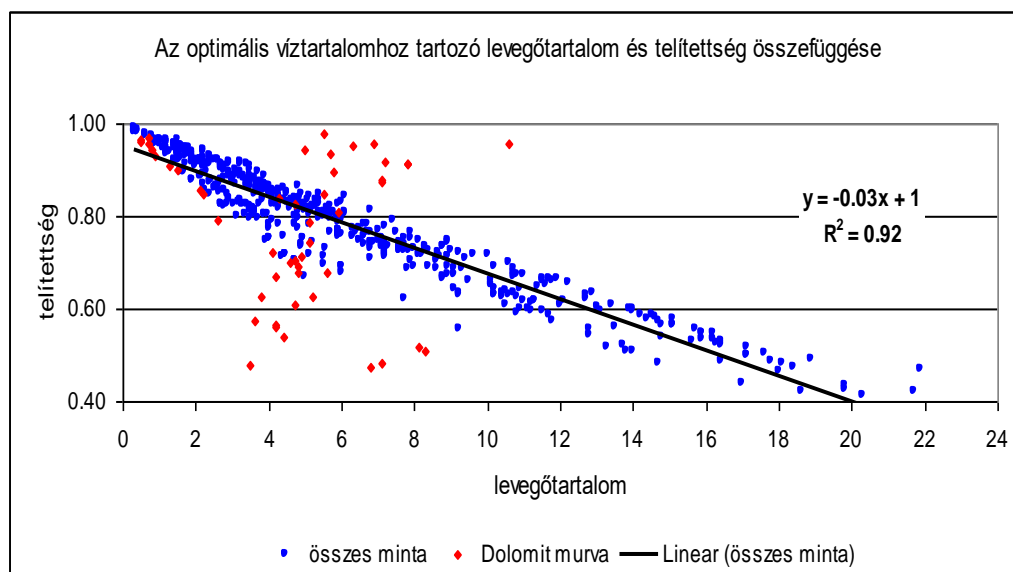
4. ábra Hagyományos feldolgozású Proctor-görbe, felül a $S=0,8$ telítettségi görbe



5. ábra Új módszerrel feldolgozott, összetett

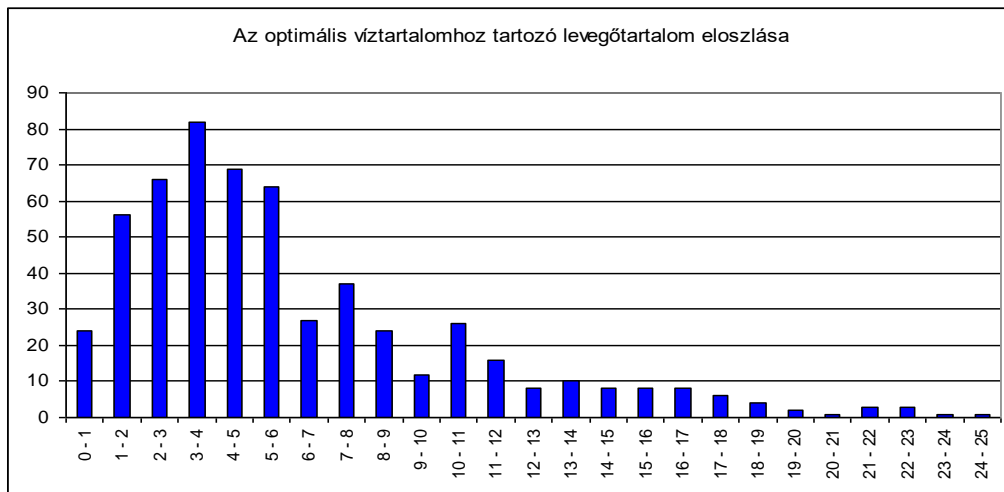
Telítettség és levegőtartalom összefüggése a tömörséggel

Egy kutatás keretében 566 db Proctor-eredmény feldolgozásával, nyolc különböző anyagra megállapítottuk az optimális víztartalomhoz tartozó levegőtartalom és telítettség összefüggését. Jellemző, hogy 12 tf%-nál jóval alacsonyabb levegőtartalom adódott általában, az optimálisnak bizonyuló víztartalomnál. Ez az elérhető legnagyobb száraz sűrűségnél helyezkedik el, ami a 100% tömörségi foknak felel meg.



6. ábra A w_{opt} -hoz tartozó levegőtartalom és telítettség általános összefüggése

A regresszió-analízisből összefüggést felállítva a 100% tömörséghez tartozó, optimális telítettség $S=88-94$ közöttinek mutatkozott. Ez a dinamikus tömörségmérés szempontjából döntő fontosságú, mert dinamikus módszerek csak háromfázisú rendszerekben alkalmazhatók (nagytárcsás LFWD, valamint KUAB sem), mert a víz az ütések hatására nem nyomódik össze. Az 7. ábra szerint a telítettség javasolt alsó értékét $S=0,88$ -ban jelölhetjük meg, mint ebből a statisztikai vizsgálatból adódó következtetést. E szerint az optimális víztartalomhoz tartozó telítettség közelítően a levegőtartalom háromszoros súllyal levonva egyből.



7. ábra Az optimális víztartalomhoz tartozó levegőtartalom gyakorisági eloszlása

Irodalomjegyzék

- Brandl H., Kopf F., Adam D.: Continuous Compaction Control (CCC) with differently excited dynamic rollers. Federal Ministry of Traffic, Innovation and Technology, Road Research Volume 553, Vienna 2005
- Correia A. Gomes, Brandl H. (2001) Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. A.A. Balkema Publishers, Lisse, NL ISBN [90 2651 844 7](#)
- FGSV 516:2003 Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes mit Unterbaues im Straßenbau.
- "Measuring Method for Dynamic Compactness & Load bearing capacity with SP-LFWD" CWA 15846
- MSZ EN 13286 – 2 "Unbound and hydraulically bound mixtures 2.Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content. Proctor compaction"
- MSZ EN 13286 – 3 "Unbound and hydraulically bound mixtures 3.Test methods for laboratory reference density and water content. Vibro-compression with controlled parameters"
- EN 13286 – 4 "Unbound and hydraulically bound mixtures 4.Test methods for laboratory reference density and water content. Vibrating hammer"
- Report on usage of Andreas dynamic load bearing capacity and compactness deflectometer / University of Ljubljana Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.
- D. Adam & F. Kopf "Operational devices for compaction optimization and quality control"
- Ms. Panarat "Comparison of B&C LFWD and sand filling method" Ramkhamhaeng University, Thailand
- ÚT2-2.124 "Measuring of dynamic compactness and dynamic load bearing capacity with small plate light falling weight deflectometer"
- Dr J.Pusztai– Dr E.Imre– Dr J.Lőrincz– I.Subert – T.Q.Phong: "Development of large surface dynamic compactibility measurements with location identification and the continuous on site measuring of the sinking of the compacting cylinders" Report of COLAS K+F year 2007.
- Subert I. - Phong T.Q.: "New intendments of Proctor tests" Mélyépítéstudományi Szemle 2007
- Király Á. - Morvay Z.: The questions of efficiency of the quality tests of earth works in Hungary
- Subert: Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006
- Subert I.: „Dynamic compactibility measurements on Hungarian highways and reconstruction in cities" Geotechnical Conference 2006 in Ráckeve, Hungary (17-18. October 2006.)

- Fáy M. - Király Á. - Subert I.: "Modelling of the use of city traffic with new measurement of dynamic compactness and dynamic bearing capacity" Városi Közlekedés, 2006
- Fáy M. - Király Á.: - Subert I.: "Recovering and solution of an earth work-compactness anomaly" Mélyépítéstudományi Szemle. 2006
- Subert I.: „Actual questions of dynamic compactibility measurement. New experiences of dynamic compactibility measurement.” Geotechnical Conference 2005 Ráckeve, Hungary.
- Subert I.: „New, environmental friendly, economical measuring gauges in traffic constructions” Geotechnical Conference 2004 Ráckeve, Hungary.
- Subert I.: „New parameters of dynamic compactness and load bearing capacity measurements and the questions of conversion of the modulus.”
Közúti és Mélyépítési szemle 55. évf. 2005. 1. sz.
- Subert I.: „B&C dynamic compactness measurement”
Mélyépítés Október-December 2004 (p.:38-39).
- Subert I.: „B&C – a useful partner” Magyar Építő Fórum 2004/25 (p.:36).