

Nepusz Adrienn¹

Cementált talajok jelenlétének előrejelzése helyszíni vizsgálatokkal

Observation of Cemented Soil Structures Based on In Situ Test Results

A cementált talajok viselkedése jelentősen eltér a megszokottól, így fontos azok jelenlétének minél pontosabb előrejelzése a leggyakrabban alkalmazott helyszíni vizsgálatok segítségével. Ez azonban nem egyszerű feladat, mivel a helyszíni vizsgálatok elvégzése során a talaj szerkezete, a cementációs kötések károsodnak. A szakirodalomban számos ajánlás található a statikus nyomószondázás (CPT) és lapdilatatóméteres (DMT) mérési eredmények felhasználására, a két vizsgálat fő paramétereinek közti korrelációkra, illetve hogy e paraméterek miként alkalmazhatóak a cementáltság előrejelzésére. Célom összefoglalni a szakirodalmi ajánlásokat, majd elvégzem néhány, a várttól eltérő eredményt adó cölöp-próbaterheléshez köthető CPT-eredmény feldolgozását, amelyeknél a cölöp környezetében meszes közepes/kövérgyagok jellemzőek.

Kulcsszavak: helyszíni vizsgálatok paramétereinek, CPT, cementáció

There is a significant difference in the behaviour of cemented and uncemented soils, so it is important to detect the cemented structures using the common in situ tests. But, as a result of the implementation of the in situ tests, the structure of the soil and the cementing bonds become damaged. There are a lot of recommendations for the interpretation of Cone Penetration Test (CPT) and Flat Plate Dilatometer Test (DMT), and how these are applicable to observe the cementation. The aims of this article are to give a review of these recommendations and to perform the analysis of some CPT tests related to pile load tests with unusual results. In these cases, calcareous medium/high plasticity clay was present in the soil profile.

Keywords: parameters of in situ tests, CPT, cementation

¹ Széchenyi István Egyetem, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, doktorandusz, e-mail: adrienn.nepusz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2636-9821>

1. Bevezetés

A talajok szerkezetének ismerete, egyes talajfajták azonosítása fontos feladat az építkezések megkezdése előtt, ugyanakkor katonai szempontból is jelentős kérdés.² Jelen cikk tartalmi követelményeit meghaladná az összes talajtípus részletes vizsgálata, ezért a következőkben csak a cementált meszes talajokkal foglalkozom. A cementált, meszes talajok számos geotechnikai probléma elé állítják a mérnököket. A cementáció a szemcsék közti hézagokban és a szemcsék érintkezési felületén kötelékként szolgál, ezáltal megakadályozva a szemcsék elmozdulását, többletszilárdságot biztosítva a talajnak. Ez a többletszilárdság azonban viszonylag kis elmozdulás hatására megszűnik, a talaj és a cementáció alkotta szerkezet tönkremegy, és ezután már csak egy kisebb nyírószilárdság jellemzi a talajt.

Épp ez a megszokottól eltérő viselkedés teszi fontossá, hogy az elterjedt helyszíni vizsgálatokkal minél pontosabban kimutathassuk a cementált talajok jelenlétét, és felhasználhassuk a modellezés során a helyszíni vizsgálatok paramétereit. Viszont sok nehézséget okoz a talajazonosításban és a paraméterek felvételében a természetesen cementált talajok inhomogén szerkezete és a cementáció ismeretlen mértéke is.

2. A CPT- és a DMT-vizsgálat, paramétereik és felhasználásuk a cementáltság megállapítására

Hazánkban a legelterjedtebb helyszíni közvetett vizsgálat a CPT-szondázás, amelyet az 1960-as években fejlesztettek ki Hollandiában. A vizsgálat során egy kúpos szondát nyomnak egyeneses sebességgel a talajba, és általában 2 cm-enként mérik a szonda csúcsán (q_c) és palástján (f_c) a talaj ellenállását. Lehetőség van továbbá pórúsvíznyomás (u_2) mérésére is. A CPT-szondázási eredményeket széles körben alkalmazzuk, lehetőséget adnak többek között talajazonosításra, talajparaméterek becslésére, cölöpök nyomási ellenállásának számítására.

Peter K. Robertson³ ⁴ ajánlása szerint a csúcshellenállás és a palástellenállás normalizált értékének viszonya tájékoztatást ad a talajfajtaról, (lásd normalizált csúcshellenállás [Q_c] – normalizált palástellenállás [F_c] diagram), amelyek határait a normalizált értékekből számítható talajviselkedési tényező (I_c) jellemez. Mindez az 1. ábrán látható.

² Beke Dóra – Földi Alexandra – Kuti Rajmund: Közúti balesetek során bekövetkező talajszennyezések és kárelhárítási eljárások vizsgálata. *Hadmérnök*, 14. (2019), 3. 13–20.

³ Peter K. Robertson: Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27. (1990), 1. 151–158.

⁴ Peter K. Robertson – C. E. Wride: Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35. (1998), 3. 442–459.

A CPT-eredményekből számítható paraméterek:

- normalizált csúcsellenállás:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (1)$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) * \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (2)$$

- normalizált súrlódási arányszám:

$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma_{v0})] 100\% \quad (3)$$

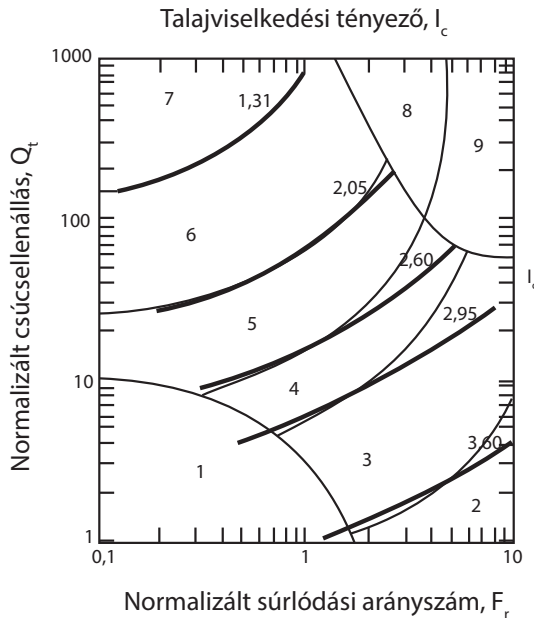
- pórusvíznyomási viszonyszám:

$$B_q = \Delta u / q_n \quad (4)$$

- talajviselkedési tényező:

$$I_c = [(3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5} \quad (5)$$

- agyagtalajok $I_c > 2,95$
- iszapos talajok $2,05 < I_c < 2,95$
- homoktalajok $I_c < 2,05$



1. ábra. A talajviselkedési tényező kontúrjai a Q_t - F_r diagramon

Forrás: Robertson–Wride i. m. (4. l.)

A lapdilatométeres (DMT-) vizsgálat során a dilatométert, vagyis egy acéllapot, a CPT-hez hasonlóan statikusan a talajba nyomnak, majd gáznnyomással az acéllapon lévő membránt nekifeszítik a talajnak. A DMT tehát magában foglalja a CPT- és a presszióméteres vizsgálat elvét. A vizsgálatot Marchetti dolgozta ki Olaszországban 1980-ban, azóta számos országban alkalmazzák, Magyarországon azonban kevésbé elterjedt. Az adatrögzítés 20 cm-enként történik, először leolvassák a kezdeti p_0 nyomást, majd a membrán megfeszítéséhez szükséges p_1 nyomást. Ezek felhasználásával három paraméter számítható:

ID index, amely a talajtípusról, a talaj mechanikai viselkedéséről ad tájékoztatást:

$$I_D = (p_1 - p_0)/(p_0 - u_0) \quad (6)$$

agyagok: $I_D < 0,6$

iszapok: $0,6 < I_D < 1,8$

homokok: $I_D > 1,8$

K_D vízszintes feszültségi index:

$$K_D = (p_0 - u_0)/\sigma'_{v0} \quad (7)$$

E_D dilatométeres modulus:

$$E_D = 34,7 * (p_1 - p_0) \quad (8)$$

Robertson⁵ vizsgálta a CPT–DMT-korrelációkat, a normalizált csúcscellenállás (Q_t) és az előterheltségi viszonyszám (OCR), a vízszintes feszültségi index (K_D), illetve a dilatométeres modulus (E_D) között az alábbi egyenleteket fogalmazta meg:

$$OCR = 0,24 * Q_t^{1,25} \quad (9)$$

$K_D = 0,8 * Q_t^{0,8}$, tovább pontosítva: $K_D = 0,3 * Q_t^{0,95} + 1,05$, ha $I_c > 2,60$ ha $I_c > 2,60$ (10)

$$E_D/\sigma'_{v0} = 5 * Q_t \quad (11)$$

⁵ Peter K. Robertson: CPT-DMT Correlations, Technical Note. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135. (2009), 11. 1762–1771.

Rabarijoely és Garbulewski⁶ egy varsói helyszínt vizsgálva módosították az első két összefüggést:

$$OCR = 0,28 * Q_t^{0,82} \quad (12)$$

$$K_D = 2,1 * Q_t^{0,4} \quad (13)$$

A leginkább cementációra érzékeny paraméter a vízszintes feszültségi index (K_D), amelynek normálisan konszolidált, nem strukturált agyagokra széles körben elfogadott értéke 2, azonban egyes ajánlások szerint 1,3–1,97 közötti értékek jellemzőek a mechanikai tulajdonságoktól függően.⁷ A cementált talajok esetén K_D értéke nagyobb 2-nél, jellemzően 5 és 15 közötti.⁸

A CPT-eredményeket felhasználó diagramok is lehetőséget adnak a cementáció kimutatására. A 2. ábra homokok esetén ad tájékoztatást a cementációról, a 3. ábra pedig alkalmazható cementált agyagok és iszapok esetén is.

Robertson ajánlása szerint a 3. ábrán látható diagram alkalmas a cementált talajok azonosítására, amelynek alapja a normalizált csúcscellenállás (Q_{tn}) és a kis alakváltozások tartományában érvényes merevségi index, amely:

$$I_G = G_0/q_n, \text{ ahol:} \quad (14)$$

G_0 a nyírási modulus, q_n a korrigált csúcscellenállás.

A diagramot először homoktalajok jellemzésére használták, majd kiterjesztették az érvényességét finomszemcsésű talajokra is. A normalizált, kis alakváltozási tartományban érvényes merevségi index:

$$K_G = I_G * Q_{tn}^{0,75}, \quad (15)$$

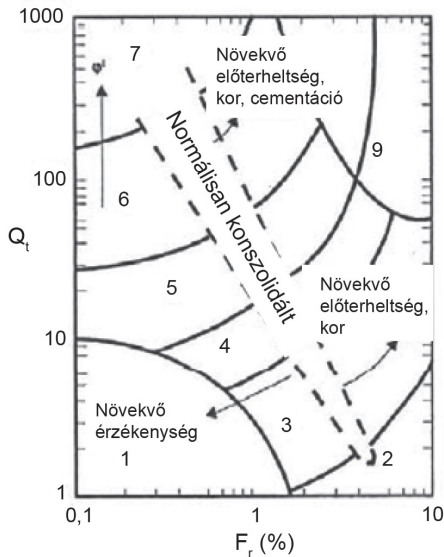
amelynek jellemző értéke a strukturált és nem strukturált talajok határán 330, normálisan konszolidált, nem vagy enyhén cementált talajoknál ennél kisebb értékek jellemzőek, míg 330 felett a cementáltság, mértékével arányosan nő K_G értéke.⁹

⁶ Simon Rabarijoely – K. Garbulewski: Simultaneous interpretation of CPT/DMT tests to ground characterisation. *Conference Paper, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013. 1337–1340. Elérhető: www.cfms-sols.org/sites/default/files/Actes/1337-1340.pdf (A letöltés dátuma: 2019. 11. 16.)

⁷ George P. Kouretzis et alii: Numerical evaluation of clay disturbance during blade penetration in the flat dilatometer test. *Geotechnique Letters*, 5. (2015) 3. 91–95.

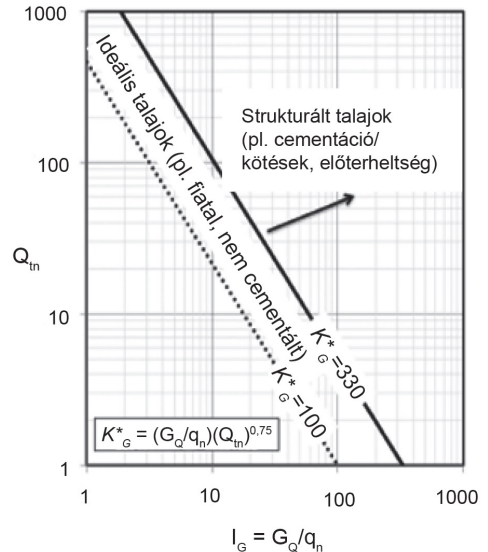
⁸ Nuno Cruz et alii: Detecting the presence of cementation structures in soils, based in DMT interpreted charts. In Roberto Quental Coutinho – Paul W. Mayne (szerk.): *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 4*. London, Taylor & Francis, 2013. 1723–1728. Elérhető: www.researchgate.net/publication/277347897_Detecting_the_presence_of_cementation_structures_in_soils_based_in_DMT_interpreted_charts (A letöltés dátuma: 2019. 11. 19.)

⁹ Peter K. Robertson: Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53. (2016), 12. 1910–1927.



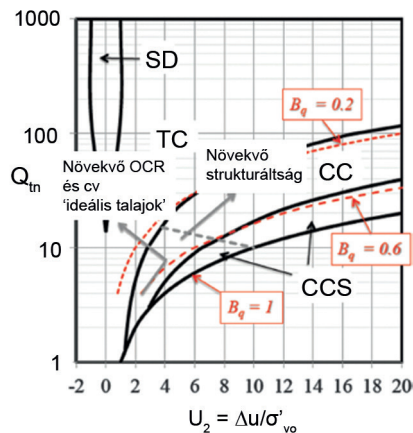
2. ábra. A $Q_t - F_r$ diagram a talajok azonosításához, egyéb jellemzőkkel (OCR, kor, cementáció, érzékenység)

Forrás: Robertson–Wride i. m. (4. l.)



3. ábra. $Q_{tn} - I_c$ diagram a strukturált talajok azonosításához

Forrás: Peter K. Robertson: Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53. (2016), 12. 1910–1927.



4. ábra. $Q_{tn} - U_2$ diagram

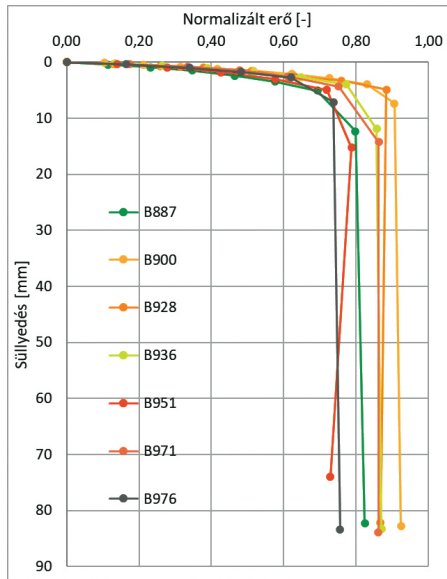
Forrás: Robertson i. m. (9. l.)

A 4. ábra alkalmas a finom szemcséjű, cementált talajok azonosítására a normalizált csúcstelenség (Q_{tn}) és a normalizált pórusvíznyomás (U_2) ábrázolásával. A legtöbb agyagtalajnál nincs érdemi különbség a Q_t és Q_{tn} értékek között. A $Q_{tn} - F_r$ diagram alapján az ideális finom szemcséjű talajok esetében $Q_{tn} > 12$ mellé negatív pórusvíznyomás-értékek párosulnának, azonban strukturált talajok esetén, a nagyobb szilárdságnak és merevségnek köszönhetően, egészen nagy,

pozitív U_2 értékek társulhatnak hozzá. Amennyiben tehát növekvő Q_{tn} -hez növekvő pozitív U_2 párosul, az a cementáltságra utal.¹⁰

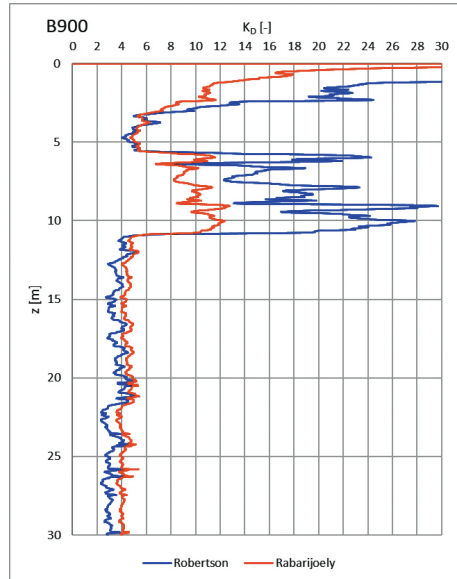
3. A választott CPT-eredmények elemzése

Az ország különböző területein végzett nagyszámú cölöp-próbaterhelés közül néhány esetben a cölöp viselkedése jelentősen eltért a megszokottól, ezen cölöpök környezetében meszes közepes/kövér agyagok voltak jellemzőek. A palástellenállás kb. 1 cm-es süllyedésnél kimerült, és ezután a cölöp nem tudott több erőt felvenni. Feltételezhető, hogy e mértékű deformációnál a cementált kötések megszüntek, és a palástellenállás lecsökkent. E próbaterhelések esetében a mért és Szepesházi¹¹ szerint a CPT-szondázási eredményekből számított teherbírás között is tapasztalhatunk különböző mértékű eltérést.



5. ábra. A vizsgált próbaterhelések eredményei

Forrás: a szerző szerkesztése



6. ábra. A vízszintes feszültségi index mélység szerinti változása

Forrás: a szerző szerkesztése

Ezen cikk keretein belül az M4 autópálya Csabacsúd–Kondoros közötti szakaszán végzett próbaterhelésekhez tartozó CPT-eredményeket vizsgálom, az e szakaszon végzett próbaterhelési görbéket szemlélteti az 5. ábra. A próbaterhelések során a tönkremenetel viszonylag gyorsan

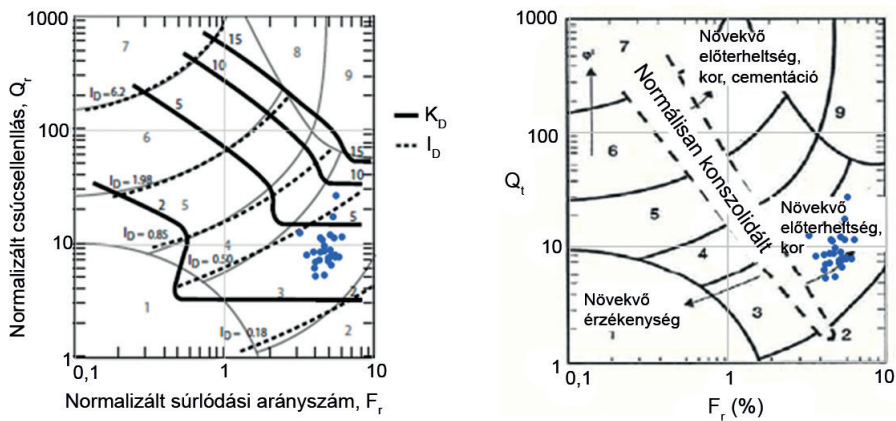
¹⁰ Robertson i. m. (9. l.)

¹¹ Szepesházi Róbert: *Cölöpalapok méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint*. Doktori (PhD-) értekezés. Miskolci Egyetem, 2011. Elérhető: www.sze.hu/~szepesr/anyagok/kutatas+fejlesztes/Szepeshazi%20Colomeretes%20PhD-ertekezés.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 02. 22.)

következett be, a süllyedési sebességek hirtelen nőttek. Ez a gyors viselkedésbeli változás és tönkremenetel jelentős különbséget eredményez(het) a várt és próbaterhelés során tapasztalt talaj–szerkezet kölcsönhatásban. A jelenséget szemléltetik a szokványostól eltérő, egyenesen letörő vagy akár „visszatörő” próbaterhelési görbék. A normalizált erőhöz a terhelő erőt a CPT alapján számított erővel normalizáltam, így az ábra azt is jól mutatja, hogy a számíthatóhoz képest kb. 20%-kal kisebb mért erő adódott.

Elsőként a CPT- és DMT-vizsgálatok közti korrelációk felhasználásával kiszámítottam a vízszintes feszültségi indexet (K_D), amely egyike a cementációra legérzékenyebb paramétereknek. A 6. ábrán K_D mélység szerinti változását láthatjuk az egyik vizsgált cölöp esetében, késsel Robertson, narancssárgával Rabarijoely et al. ajánlása szerint számítva. Körülbelül 11 méteren kezdődik a vizsgált meszesagyag-réteg, amely szakaszon a két számítási mód eredménye jó egyezést mutat, Robertson képletével 3-4 körüli, míg Rabarijoely ajánlását követve 4-5 körüli értékeket kapunk. Mindkét számítási mód nagyobb értékeket eredményez, mint a normálisan konszolidált, nem cementált agyagokra jellemző érték (kb. 2). A meszes agyag felett iszapos homok, homokréteg található, amelyben a magasabb Q_t értékek eredményezik a magasabb K_D értékeket.

A 7. ábrán az összes vizsgált helyszín meszesagyag-rétegeire jellemző átlagos CPT-eredmények láthatók a Q_t - F_r talajazonosításra szolgáló diagramon, az ábra bal oldalán a Robertson által ajánlott K_D -határvonalakkal, a jobb oldalon pedig a normálisan konszolidált (NC) talajok tartományával kiegészítve. A pontok minden esetben az NC tartományon kívülre, a 3. (kötött) talajosztályba esnek, és a vízszintes feszültségi index rendre $K_D \geq 4$.



7. ábra. K_D határvonalak és a normálisan konszolidált talajok tartománya a Q_t - F_r diagramon, a területre jellemző értékekkel

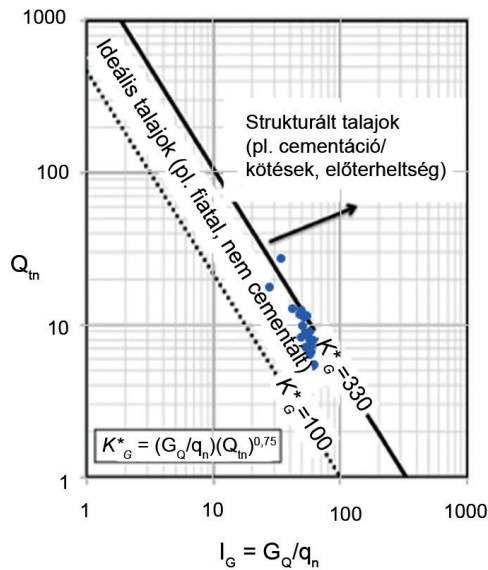
Forrás: a szerző szerkesztése

A 8. ábrán Robertson Q_{tn} - I_C diagramja látható a vizsgált meszesagyag-rétegekre jellemző értékekkel, amelyek a $K_C = 330$ -as határvonal mentén sorakoznak. Ez utalhat enyhe cementációra, amely összhangban van a 4 körüli K_D értékekkel, vagy arra, hogy normálisan konszolidált, nem cementált a talaj, ez viszont ellentmond a 7. ábrán látottaknak.

A 9. ábra bal oldalán a korábban bemutatott, finom szemcsésű talajok strukturáltságának megállapítására szolgáló diagram látható, a jobb oldalon pedig a szokásos talajazonosításra szolgáló diagram látható (szaggatott vonalak), kiegészítve a talaj viselkedését leíró tartományok határvonaláival.¹² Az egyes tartományokat az alábbi módon jelölik:

- CC – kontraktív agyag;
- CD – dilatív agyag;
- CCS – kontraktív, érzékeny agyag;
- TC – kontraktív átmeneti talaj;
- TD – dilatív átmeneti talaj;
- SC – kontraktív homok;
- SD – dilatív homok.

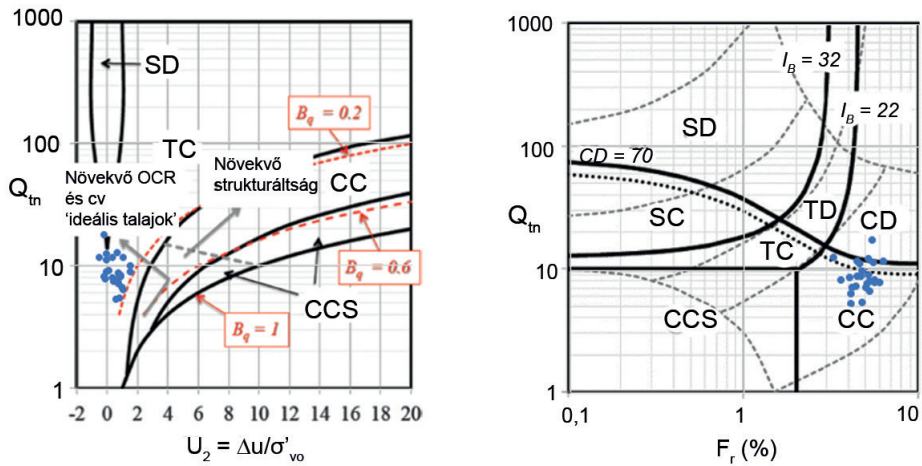
Látható, hogy a 9. ábra jobb és bal oldala nincs összhangban, a vizsgált ponthalmaz a jobb oldali diagramon a kontraktív (CC) – dilatív (CD) agyagok határvonala mentén helyezkedik el, a bal oldali diagramon viszont teljesen kívül esik a kontraktív agyagok tartományán –, amely így nem utal cementáció okozta strukturáltságra. A bal oldali diagramhoz kapcsolódóan szükséges megemlíteni, hogy a hazai CPT-gyakorlatban a pórusvíznyomás-mérést mindig bizonytalanság övezi, ezért elképzelhető, hogy ezen ellentmondás ezzel van összefüggésben.



8. ábra. A vizsgált területre jellemző értékek a Q_m – I_G diagramon

Forrás: a szerző szerkesztése

¹² Robertson i. m. (9. l.)



9. ábra. $Q_{tn} - U_2$ és $Q_{tn} - F_r$ diagram a jellemző értékekkel

Forrás: a szerző szerkesztése

4. Összegzés

A szakirodalom számos lehetőséget kínál a helyszíni vizsgálatok eredményeinek feldolgozására, és azok felhasználásával a cementált talajok jellemzésére, leírására. Azonban ezek alkalmazhatóságát, megbízhatóságát nehezíti a cementált talajok sokfélesége. Többek között az eltérő szerkezet, a cementáltságot adó kötések különbözősége, a cementáció mértéke, a talajban lejátszódó kémiai folyamatok mind eltérő eredményekhez és a mérési eredmények feldolgozásában ellentmondásokhoz vezethetnek.

Jelen cikkben bemutattam a leggyakoribb helyszíni vizsgálatokat és azok eredményeiből számítható paramétereket, majd összefoglaltam a szakirodalmi ajánlásokat, amelyek lehetővé teszik a cementált szerkezetek észlelését, jellemzését.

Kutatómunkám során elvégeztem hét CPT-szondázási eredmény elemzését, amelyek a szokásostól eltérő viselkedést mutató próbacölöpök környezetében készültek. A próbaterhelések során jelentős viselkedésbeli változást és viszonylag gyors tönkremenetelt tapasztaltunk, amelynek oka feltételezhetően a cementációs kötések tönkremenetele a meszes közepes/kövérgyagokban a cölöpök mentén (technológiai hibára utaló jelek nem voltak).

A CPT-szondázási eredmények feldolgozása során ellentmondásra jutottam, ez valószínűleg a cementált talajok eltérő jellemzőiből, esetleg a bizonytalan pórusznyomás-mérésből adódik. A vizsgált meszes közepes/kövérgyagok CPT-eredményeiből számított vízszintes feszültségi index (K_D) átlagos értéke és a 8. ábra enyhe cementációra utal, viszont a 9. ábra nem jelez cementált szerkezetet.

Összegzésként elmondható, hogy a feldolgozás során előforduló ellentmondások kiküszöbölése érdekében ajánlott a bemutatott diagramokat és paramétereket együtt értékelni, és ezekre egymástól nem független elemzési lehetőségként tekinteni.

A téma további kutatást igényel az eredményt befolyásoló tényezők sokfélesége okán, hogy a cementált talajok jelenlétét, viselkedését minél pontosabban leírassuk.

Felhasznált irodalom

- Beke Dóra – Földi Alexandra – Kuti Rajmund: Közúti balesetek során bekövetkező talajszennyezések és kárrelhárítási eljárások vizsgálata. *Hadmérnök*, 14. (2019), 3. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.3.2>
- Cruz, Nuno et al.: Detecting the presence of cementation structures in soils, based in DMT interpreted charts. In Roberto Quental Coutinho – Paul W. Mayne (szerk.): *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 4*. London, Taylor & Francis, 2013. 1723–1728. Elérhető: www.researchgate.net/publication/277347897_Detecting_the_presence_of_cementation_structures_in_soils_based_in_DMT_interpreted_charts (A letöltés dátuma: 2019. 11. 19.)
- Kouretzis, George – P. Y. Ansari – J. Pineda – R. Kelly – D. Sheng: Numerical evaluation of clay disturbance during blade penetration in the flat dilatometer test. *Geotechnique Letters*, 5. (2015), 3. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00026>
- Rabarijoely, Simon – K. Garbulewski: Simultaneous interpretation of CPT/DMT tests to ground characterisation. *Conference Paper, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, (2013), 1337–1340. Elérhető: www.cfms-sols.org/sites/default/files/Actes/1337-1340.pdf (A letöltés dátuma: 2019. 11. 16.)
- Robertson, Peter K.: Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53. (2016), 12. 1910–1927. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Robertson, Peter K.: CPT-DMT Correlations, Technical Note. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135. (2009), 11. 1762–1771. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000119](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000119)
- Robertson, Peter K.: Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27. (1990), 1. 151–158. DOI: <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- Robertson, Peter K. – C. E. Wride: Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35. (1998), 3. 442–459. DOI: <https://doi.org/10.1139/t98-017>
- Szepesházi Róbert: *Cölöpalapok méretezése az Eurocode 7 követelményei szerint*. Doktori (PhD-) értekezés. Miskolci Egyetem, 2011. Elérhető: www.sze.hu/~szepesr/anyagok/kutatas+fejlesztés/Szepeshazi%20Colopmeretezes%20PhD-ertekezés.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 02. 22.)