

A határmélység meghatározásának lehetőségei

Rémai Zsolt

BME, Geotechnika Tsz., remai@vnet.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: Jelen cikk a süllyedésszámításhoz használt határmélység témájával foglalkozik; rövid áttekintést ad a mindennapi gyakorlatban használt határmélység képletekről, és röviden bemutatja a véges elemes modellezéshez rendelkezésre álló talajmodelleket. Egy konkrét probléma felhasználásával, összehasonlítást ad a különböző képletekkel meghatározott, illetve a véges elemes számításokkal becsült határmélység értékekről. A véges elemes számítások a lineárisan rugalmas tökéletesen képlékeny Mohr-Coulomb, a felkeményedő, a Cam-clay és kis alakváltozások merevségét figyelembe vevő, felkeményedő (HSSmall) talajmodellekkel készültek. A határmélység-számításokhoz és a véges elemes analízishez egy végtelen vastagságú puha agyagra épített 10 m magas és 80 m széles töltést vizsgáltam, különös figyelmet fordítva a talajmodellek felhasználási lehetőségeire és korlátaira.

Kulcsszavak: határmélység, véges-elemes modellezés, talajmodell

1 BEVEZETÉS

Az elmúlt években lezajlott autópálya-építések felhívták a figyelmet a nagyméretű töltések süllyedés-meghatározásának kérdéseire. A megbízható süllyedésszámításhoz számos dolog szükséges, ezek közül a legfontosabbak a talaj feszültség-alakváltozás összefüggéseinek pontos megismerése, és a talajviselkedés megfelelő modellezése. Ez utóbbi, nemcsak a megfelelő, az adott talaj viselkedését legjobban közelítő modell és modellparaméterek kiválasztást jelenti; szükséges a terhelés hatására összenyomódó talajréteg vastagságának, azaz a határmélységnek az ismerete is. Az ez alatti talajzóna alakváltozásait a gyakorlatban elhanyagolhatóan kicsinek tekintjük. Az összenyomódó réteg vastagsága jelentősen befolyásolja a süllyedésszámítások eredményét: minél nagyobb összenyomódó réteget veszünk figyelembe, annál nagyobb süllyedést eredményez a számítás. Számos javaslat és eljárás ismert a határmélység meghatározására, azonban ezek jelentősen eltérő eredményeket adhatnak. Jelen cikk ezen módszereket, valamint a véges elemes számítások lehetőségeinek előnyeit és hátrányait foglalja össze.

2 A SÜLLYEDÉSSZÁMÍTÁS MÓDSZEREI

A süllyedésszámítási módszerek alapvetően két részre oszthatóak: egyszerűsített számítási módszerek és numerikus módszerek (pl. véges elemes modellezés). Az első csoportot, jellemzően egyszerűsített talajviselkedést feltételező, könnyen elvégezhető számítási módszerek alkotják. A számítógépek elterjedésével e módszerek használata manapság jellemzően már csak durva, előzetes becslésekre korlátozódik. A numerikus módszerek segítségével könnyen figyelembe vehetők az összetettebb talajtulajdonságok is, mint például a nemlineáris feszültség-alakváltozás összefüggés, vagy különböző talajtípusoknál eltérően alakuló feszültségészterjedés.

Mindkét esetben azonban két tényező határozza meg alapvetően a számítás pontosságát: a talaj alakváltozási paraméterei és az összenyomódó réteg vastagsága. Az alakváltozási paraméterek megadására számos lehetőség van: részletesen definiálni lehet az alakváltozások nemlineáris jellegét, lehet – egy a folyamatra vonatkoztatott – átlagértéket használni stb. Értelemszerűen minél pontosabban ismerjük és vesszük figyelembe a számításhoz a talaj viselkedését, annál pontosabb eredményeket kapunk. A másik fontos tényező az összenyomódó réteg vastagsága, vagy más szóval határmélység. Ez nem egy laboratóriumban vagy helyszínen mérhető talajtulajdonság, különböző módszerekkel becsülhető, mesterséges mérnöki fogalom, mely a gyakorlat számára megadja az adott probléma esetén a releváns talajzóna méretét. Az ez alatti talajrétegek összenyomódását elhanyagolhatóan kicsinynek tekintjük. Jelen cikk e határmélység meghatározásának lehetőségeivel és problémáival foglalkozik.

3 KÉPLETEK A HATÁRMÉLYSÉG MEGHATÁROZÁSÁRA

Számos képlet áll rendelkezésre a határmélység meghatározására, ezen képleteknél a határmélység általában az alapszélesség és a terhelés értékének függvényében számítható. A gyakorlatban használt legelterjedtebb képletek összefoglalása az 1. táblázatban található.

A korábbi módszerek jellemzően kizárólag az alpméret függvényében definiálják a határmélységet, azonban a képletekbe később egyre nagyobb súllyal került be a talajra háruló feszültségek értéke is. A jelenlegi gyakorlatban legelterjedtebb módszer szerint a terhelés okozta feszültségnövekményt számítjuk, és azt a mélységet tekintjük határmélységnek ahol ez a növekmény a (terhelés előtti) hatékony feszültség bizonyos százalékára csökken. A hazai gyakorlatban leginkább a korábbi MSZ 15004-1989 és DIN1054 szerinti 20%-os arány használata a legelterjedtebb. Nagy alapterületű építmények esetén azonban 50%-os értékeket is tapasztaltak (Széchy-Varga, 1968); az elmúlt évek monitoring eredményeinek összegzése alapján Kempfert (2006) pedig 25%-os átlagértéket határozott meg. A különbségek számottevőek, aminek több oka is van: egyrészt a határmélység és az összenyomódási paraméterek összefüggenek, egy konkrét helyszíni mérés esetén – elméletileg – végtelen sok határmélység-rugalmassági modulus kombináció létezik, mely a tapasztalt süllyedést eredményezi. Másrészt valószínűsíthető, hogy az elhanyagolható alakváltozások zónája sokkal inkább az alakváltozásokhoz köthető, mint a feszültségekhez; és e kettő bár összefügg, kapcsolatok talajtípusonként különböző.

1. táblázat

Módszer	Határmélység	Megjegyzés
Jáky (1944) (Farkas, 1995 könyvből)	$2B \cdot (1-B/2 \cdot L)$ sávalapokra: 2B	“B” az alap szélessége “L” az alap hosszúsága, sávalapok esetén: $L=\infty$
De Beer (1978) (Kaniraj, 1988 könyvből)	4 B	“B” az alap szélessége
Egorov and Malikova (1975)	$\xi \cdot (B \cdot q^2 / p^2)^{0.5}$	Nagy alapterületű lemezalapok esetén. “ ξ ” egy tapasztalati tényező $\xi=6$ kötött talajok esetén és $\xi=4$ szemcsés talajok esetén “q” a talajra hárított feszültség átlagos értéke “p” egy referencia feszültség, $p=300$ kPa
DIN 1054 MSZ 15004-1989	“20%”	Az mélység ahol az altalajra háruló feszültségnövekmény a korábbi hatékony feszültség 20%-a alá csökken.
Széchy and Varga (1968)	“50%”	Nagy alapterületű lemezalapok esetén. az mélység ahol az altalajra háruló feszültségnövekmény a korábbi hatékony feszültség 50%-a alá csökken.
Kempfert (2006)	25%	10 nagy alapterületű lemezalaposítás esetén mért értékek visszaszámításából. Az mélység ahol az altalajra háruló feszültségnövekmény a korábbi hatékony feszültség 25%-a alá csökken.

4 HATÁRMÉLYSÉG ÉS VÉGES ELEMES MODELLEZÉS

A véges elemes programok lehetővé teszik, hogy a kézi számításnál pontosabban az adott talajparaméterek figyelembe vételével határozzuk meg a talajban kialakuló feszültségállapotot és alakváltozásokat. Mindemellett azonban megfigyelhető, hogy minél nagyobb (mélyebb) modellméretet veszünk figyelembe, annál nagyobb süllyedéseket eredményez a számítás. Azaz még a jelenleg használt, a talaj nemlineáris jellegét figyelembe vevő talajmodellek sem képesek teljesen pontosan visszaadni a talaj viselkedését. Emiatt a véges elemes számítás esetén is szükséges a határmélység előzetes becslése, és a modellméret e szerinti definíciója. A számos elérhető talajmodellek közül jelen vizsgálat kereteiben 4 talajmodellt vizsgáltam:

1. Lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny, Mohr-Coulomb talajmodell;
2. Feszültséggel keményedő („felkeményedő”) talajmodell;
3. Cam-Clay talajmodell;
4. Feszültséggel keményedő, kis alakváltozási merevebb viselkedést feltételező („HSSmall”) talajmodell.

A Mohr-Coulomb modell az egyik legegyszerűbb talajmodell, a talaj feszültség-alakváltozás görbáját lineáris összefüggésként kezeli, azaz a talaj alakváltozási tulajdonságait – a feszültség szinttől függetlenül – a rugalmassági modulussal és a Poisson tényezővel írja le. A „felkeményedő” és a „Cam-Clay” talajmodellek a talaj viselkedését már pontosabban közelítik: nagyobb átlagos normál feszültségeknél merevebb viselkedést, nagyobb nyírófeszültségeknél pedig nagyobb alakváltozásokat vesznek figye-

lembe. Ezek a talajmodellek már pontosabb süllyedésszámítást tesznek lehetővé, elsősorban az által, hogy a mélyen fekvő (nagyobb normálfeszültséggel terhelt) talajzónában kisebb alakváltozásokat eredményeznek.

A „HSSmall” talajmodell nagyban hasonlít a „felkeményedő” modellhez, azonban kiegészül még azal, hogy a kis alakváltozási tartományban a talaj viselkedését – külön definiált talajparaméterek szerint – nagyobb merevséggel veszi figyelembe.

5 EGY 10 M MAGAS TÖLTÉS VIZSGÁLATA

5.1 Méretek, talajjellemzők

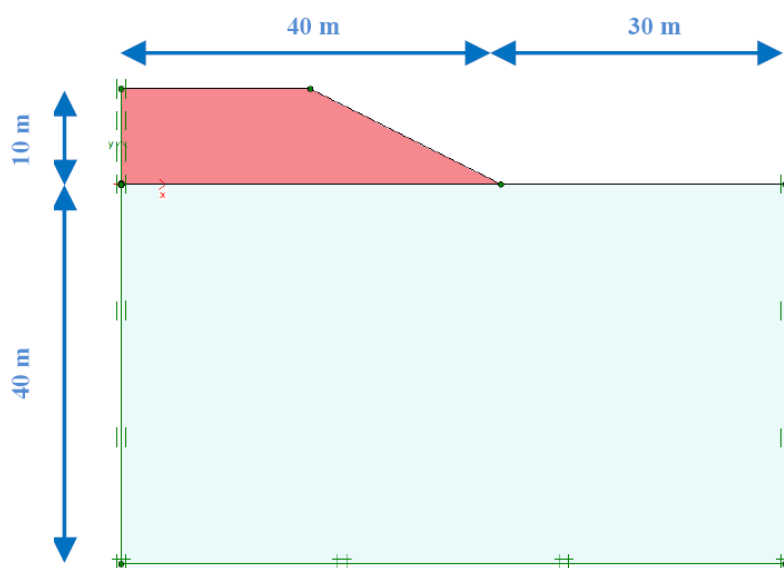
Egy egyszerűsített modellt felhasználva vizsgáltam meg a puha kötött talajon épített töltések süllyedésszámításához rendelkezésre álló módszerek előnyeit, hátrányait, lehetőségeit és korlátait. A számításhoz használt töltés magassága 10 m volt, a korona- és talpszélesség pedig 20 és 80 m. Ebből adódóan a rézsúhajlás 2:1. Az altalaj egyetlen, végtelen mélységű puha agyagrétegből állt. Ennek tulajdonságait az M43 autópálya nyomvonalán feltárt felső puha agyag laboratóriumi és helyszíni vizsgálatainak alapján határoztam meg. A felhasznált geotechnikai modell az 1. ábrán, a talajrétegek megnevezése és tulajdonságai a 3. táblázatban, a puha agyag leírásához használt anyagmodellek és jellemzők pedig a 3. ábrán láthatóak.

2. táblázat

Talajréteg	γ Nedves térfogatsúly [kN/m ³]	γ_{sat} Telített térfogatsúly [kN/m ³]	ϕ' , Belső súrlódási szög (hatékony) [°]	c' , kohézió (hatékony) [kPa]
Feltöltés	16	19	30	1
Puha agyag	17	19	25	1

3. táblázat

Talajmodell	E, E_{50}^{ref} Rugalmassági Modulus [kPa]	E_{oed}, E_{oed}^{ref} Összenyomódási modulus [kPa]	λ , (Cam-Clay) Kompressziós index [-]	G_0 ; nyírási modulus referenciértéke (nagyon kis alakváltozásnál, $\gamma_s < 10^{-6}$) [kPa]	$\gamma_{0.7}$; Nyírási alakváltozás, ahol $G_s = 0.7G_0$ [-]
Lineárisan rugalmas-tökéletesen képlékeny (Mohr-Coulomb)	4000	5000			
Felkeményedő	4000	5000			
HSSmall	4000	5000		50 000	$4 \cdot 10^{-4}$
Cam-Clay			0.04		

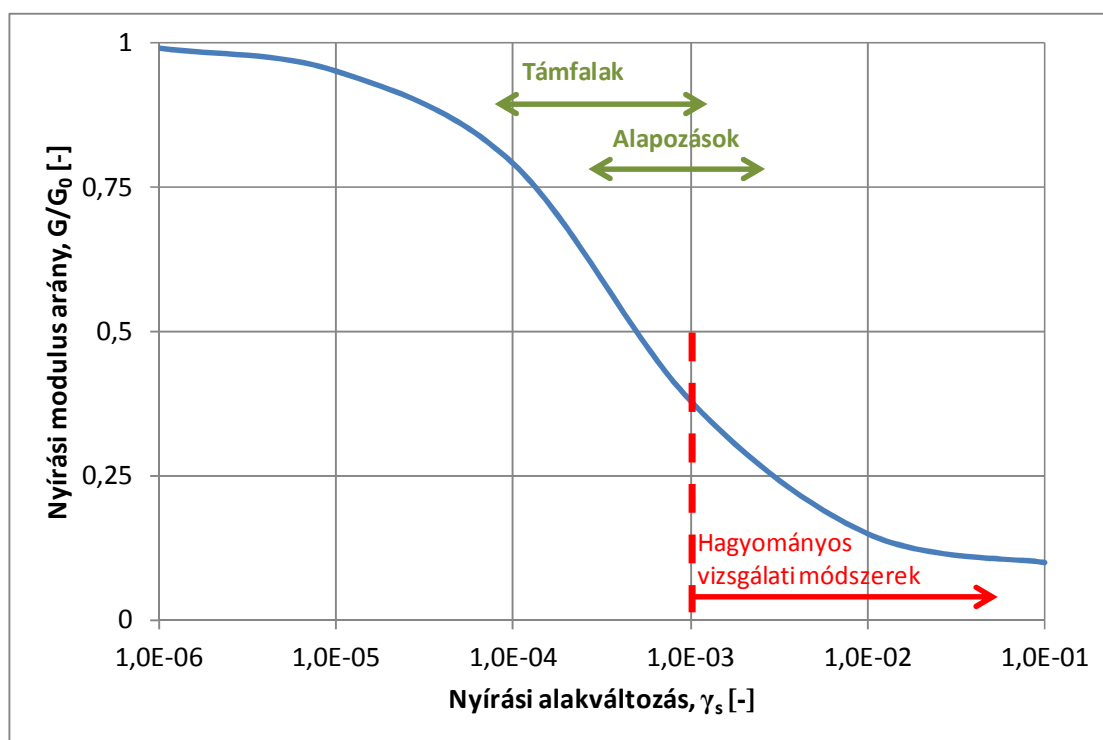


1. ábra Véges elemes modell

5.2 Véges elemes számítások

A „Mohr-Coulomb” modell kivételével a felhasznált talajmodellek figyelembe veszik azt, hogy a talaj alakváltozási jellemzői nemlineárisak. A felkeményedő talajmodell a deviátor feszültség-alakváltozás összefüggést hiperbolával, a kompressziós feszültségállapotban meghatározott σ - ε összefüggést pedig hatványfüggvénnyel közelíti. A Cam-clay modell a „kritikus állapot” elméletét használva a hézagtnyező és az átlagos normálfeszültség közti összefüggést logaritmikus összefüggéssel közelíti.

A „HSSmall” modell a „felkeményedő” talajmodell azzal egészíti ki, hogy a nagyon kis alakváltozások tartományában merevebb talajviselkedést vesz figyelembe. Ezt a tulajdonságot régóta tapasztalták a talajok dinamikus vizsgálatakor, de általánosan elfogadott vélekedés volt, hogy a nagyobb merevség a terhelés jellege, és nem a kis alakváltozások miatt adódik. Az elmúlt évek tapasztalatai azonban azt igazolták, hogy a merevebb viselkedés kis alakváltozások esetén statikus terhelés esetén is tapasztalható. Ezt a tulajdonságot a talajmodell egy merevségcsökkenési függvény (degradációs görbe) alapján veszi figyelembe, ahol a talaj nyírási modulusa a nyírási deformáció függvénye (2. ábra). A tapasztalatok azt mutatták, hogy különböző talajtípusok esetén a görbék normalizált alakjai nagyfokú hasonlóságot mutatnak, ennek köszönhetően az összefüggés két paraméter segítségével becsülhető. E két paraméter a nagyon kis alakváltozásokhoz tartozó (vagy kezdeti) nyírási modulus G_0 , és az az alakváltozás érték, ahol $G=0,722G_0$, ennek jele: $\gamma_{0,7}$. Ahogy a 2. ábra is szemlélteti, hagyományos geotechnikai vizsgálati módszerekkel ezek az értékek nem mérhetők, meghatározásuk speciális mérési módszerek vagy tapasztalati összefüggések segítségével lehetséges.



2.ábra Nyírási modulus és nyírási alakváltozás összefüggése

5.3 Alakváltozási jellemzők kis alakváltozások esetén

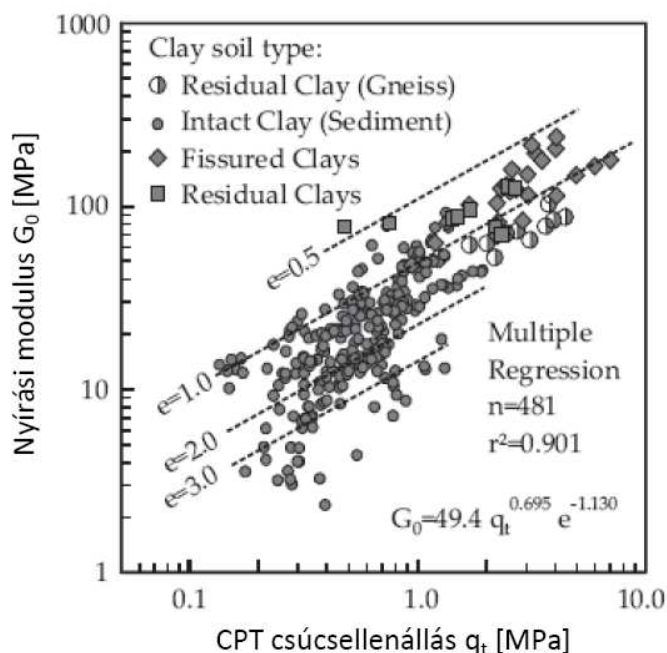
A kis alakváltozások tartományában érvényes alakváltozási paraméterek meghatározása többféle helyszíni és laboratóriumi vizsgálattal lehetséges. A legelterjedtebb laboratóriumi módszerek:

- a helyi nyúlásmérő bélyegekkel ellátott mintán végzett triaxiális vizsgálat;
- a talajmintán gerjesztett hullámok terjedési sebességét mérő bender elemekkel végzett vizsgálat, vagy „rezgetett henger” („resonant column”) vizsgálat;
- és a torziós nyíróvizsgálat.

A laboratóriumi módszerek mellett több helyszíni (jellemzően szeizmikus) vizsgálat is végezhető az említett paraméterek meghatározásához. Ilyenek például:

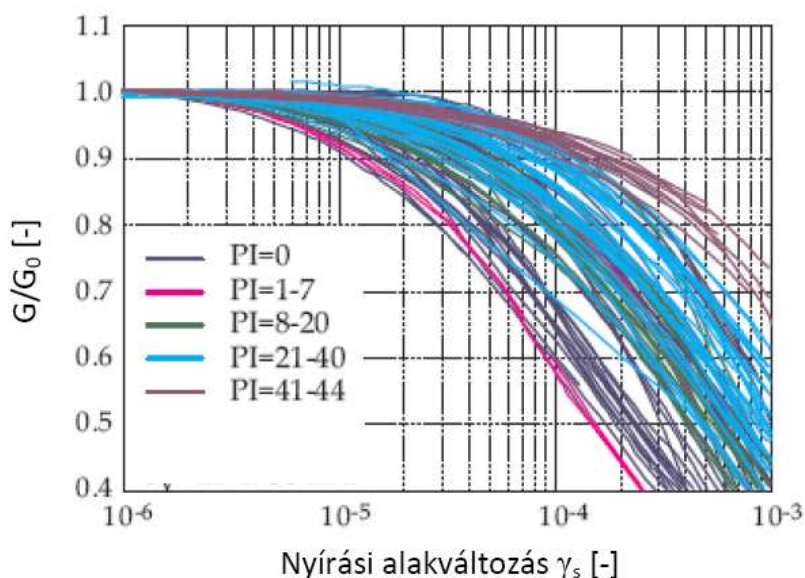
- a downhole vagy crosshole vizsgálat,
- és a szeizmikus CPT.

Bár a fenti meghatározási módszerek némelyike már hazánkban is elérhető, a mindennapos gyakorlatban nem elterjedt a kis alakváltozási tartományhoz tartozó merevség vizsgálata. Mérési eredmények hiányában számos tapasztalati összefüggés áll már rendelkezésre, melyekkel a hagyományos geotechnikai paraméterek alapján a G_0 értékét becsülhetjük. A tapasztalati összefüggésekben leggyakrabban használt geotechnikai paraméterek a drénezetlen nyírószilárdság, a hézagtényező, az előterheltségi viszonzyszám (OCR), vagy a CPT ellenállás. Egy ilyen tapasztalati összefüggésre mutat példát a 3. ábra.



3. ábra CPT csúcsellenállás és a kezdeti nyírási modulus tapasztalati összefüggése (Mayne - Rix, 1993)

A nagyon kis alakváltozásokhoz tartozó nyírási modulus mellett a merevség változását leíró függvény (degradációs görbe) alakját meghatározó $\gamma_{0,7}$ paraméter szükséges az alakváltozási tulajdonságok definiálásához. Amennyiben nem áll rendelkezésre konkrét mérési adat, ehhez a paraméterhez is számos tapasztalati összefüggés ismert. Ezek többsége a mindennapos gyakorlatban elvégzett vizsgálatok eredményeinek függvényében adja meg a $\gamma_{0,7}$ értékét. Puha agyagoknál elsősorban a plasztikus index határozza meg a degradációs görbe alakját. Benz (2007) számos kötött talaj degradációs görbéjét összegezte, melyek jó támpontot jelenthetnek a mindennapi gyakorlatban. Ugyanakkor mindig szem előtt kell tartani, hogy ezek a tapasztalati összefüggések nem általánosíthatóak, különböző geológiai körülmények között eltérőek lehetnek.



4. ábra Kötött talajok degradációs görbéi (Benz, 2007)

5.4 Határmélység eredmények – hagyományos módszerek

Az előzőekben bemutatott módszerekkel meghatároztuk a vizsgált töltés alatti határmélység értékeit. (4. táblázat). Jáky és De Beer sávalapokra adott javaslata számottevően túlbecsülte a határmélység értékét a vizsgált nagy talpszélességű töltés esetén. A többi megoldás ennél megbízhatóbb eredményeket szolgáltatott, azonban a kapott értékek tág tartományt fednek le.

4. Táblázat: Számított határmélység értékek

Módszer	Határmélység [m]
Jáky	160
De Beer (1978)	320
Egorov and Malikova (1975)	21,5
DIN 1054	41
MSZ 15004-1989	41
Széchy and Varga	20
Kempfert (2006)	35

5.5 Véges elemes vizsgálatok eredményei

A korábban említett talajmodellek felhasználásával véges elemes vizsgálatokat hajtottam végre különböző modellmélységek figyelembe vételével. Ennek célja az volt, hogy megállapítsam a különböző talajmodellek esetén a számított süllyedésértékeket milyen mértékben befolyásolja a modellmélység. A számításokhoz 40, 50 és 60 m mélységű véges elemes modellt használtam, a számított legnagyobb süllyedésértéket pedig a modellmélység függvényében ábrázoltam (5. ábra).

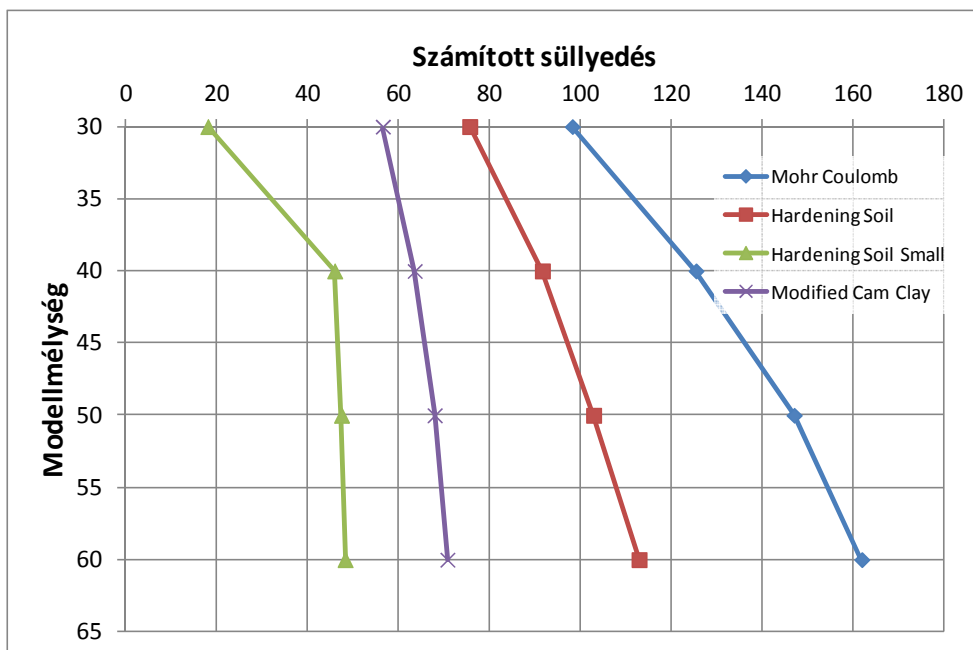
A „Mohr-Coulomb” talajmodell esetén a számított süllyedésértékek közel lineárisan növekednek a számításhoz figyelembe vett modell mélységével. Azaz e modell esetén a modellmélység jelentősen befolyásolja a számított süllyedések értékeit, emiatt megbízható használatához a felhasználónak előzetesen meg kell határozni az összennyomódó talajréteg vastagságát, és a számításhoz használt modell mélységét ez alapján kell megadnia.

A „felkeményedő” és a „Cam-Clay” modellel kapott eredmények kevésbé függték a modell mélységtől, de a számított értékek különbségei, különösen a „felkeményedő” talajmodellnél még mindig nem nevezhetőek elhanyagolhatónak. A „Cam-Clay” modellel kapott eredmények valamivel realisztikusabbak, a görbe a mélység növekedésével egyre inkább közelíti a függőlegest, azaz a mélység hatása egyre kisebb. Azonban még e modell esetén is 7 cm (kb. 10%) különbséget tapasztaltunk a 40 és 60 m-es modellmélységekkel meghatározott értékek között. Ráadásul a görbének nincs egy határozott töréspontja, ami alapján a határmélység könnyen megállapítható lenne. Azaz e két modell esetén is a modellmélység, bár kisebb mértékben, de még mindig nem elhanyagolhatóan befolyásolja a számított süllyedésértékeket, így itt is szükséges a modellmélység óvatos megválasztása.

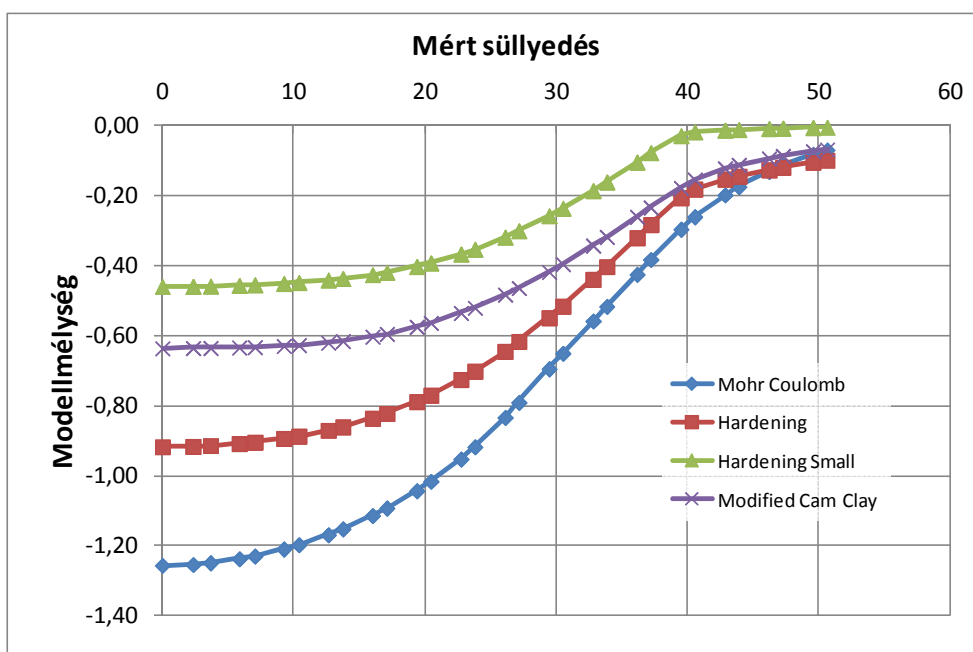
A vizsgált talajmodellek közül a HSSmall modellt szolgáltatotta a leginkább modellmélység-független eredményeket. A 30 és 40 m-es modellmélység esetén a számított süllyedésértékek között jelentős eltérés volt tapasztalható, de a modellmélység további növelése nem eredményezett számottevő változást. A 40 és 60 m-es modellmélységgel számított értékek közötti eltérés mindössze 2,3 cm (~5%) volt, azaz e talajmodell használatakor kellően nagy (a határmélységnél nagyobb) modellmélységekhez szinte ugyanazt az eredményeket kapjuk – az eredmények a modellmélységtől függetlennek tekinthetők.

A véges elemes számítások azt mutatták, hogy a vizsgált esetben a határmélység kb. 35-40 m, ami jó egyezést mutat a jelen gyakorlatban elterjedt, korábbi magyar és német szabványban megfogalmazott számítási módszerrel, és Kempfert tapasztalataival. Nyilvánvalóan a véges elemes számításokkal meghatározott határmélység pontossága a felhasznált paraméterek pontosságától függ. Jelen vizsgálathoz a „hagyományos” alakváltozási paramétereket laboratóriumi vizsgálatok alapján, a kis alakváltozási zónában érvényes paramétereket pedig tapasztalati összefüggések alapján definiáltam. Ez utóbbi paraméterek pontosabb meghatározásával (specifikus vizsgálatokkal) természetesen a süllyedések és a határmélység meghatározása még megbízhatóbb lenne.

A 40 m modellmélység és különböző talajmodellek figyelembe vételével meghatározott felszínsüllyedési görbék a 6. ábrán láthatóak. A görbe alakja jó egyezést mutat az első három talajmodell esetén, viszont a HSSmall modellel végzett számítások kisebb alakváltozásokat eredményeztek a rézsúlábnál és a mellett. Ez utóbbi alak jó egyezést mutat a jelen mérési eredmények feldolgozásánál tapasztaltakkal. Ez is arra enged következtetni, hogy a kis alakváltozási tartományban tapasztalható nagyobb mérési figyelembe vétele a talajviselkedés pontosabb modellezését teszi lehetővé.



5. ábra Számított maximális süllyedés különböző talajmodell és modellmélységek esetén



6. ábra: Számított felszín-süllyedési görbék különböző talajmodellek esetén

6 ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

Számos eljárás ismert a határmélység meghatározására, melyek közül sok a mindennapos geotechnikai gyakorlat része. Jelen cikkben egy 10 m magasságú autópálya töltés alatti határmélységet határoztam meg különböző számítási módszerek segítségével; a számított eredmények igen tág tartományban szóródtak. A töltés alatti puha agyagréteg alakváltozásainak meghatározáshoz véges elemes számításokat végeztem különböző talajmodellek felhasználásával. A számítási eredmények azt mutatták, hogy a határmélységet elsősorban a talaj kis alakváltozási tartományban tapasztalható merevsége határozza meg, ami egy nagyságrenddel is nagyobb lehet a megszokott alakváltozási tartományban mért rugalmassági (vagy nyírási) modulusnál. A véges elemes számításokkal meghatározott határmélység jó egyezést mutatott a korábbi magyar és német szabvány szerint meghatározottal, valamint Kempfert (2006) tapasztalataival. Bár ezek az eljárások a határmélységet nem az alakváltozások hanem a feszültségek függvényében definiálják, úgy tűnik az eljárás jó megbízhatósággal megadja azt a feszültség szintet, amely alatt az alakváltozásokat a nagyobb merevség határozza meg. Ezáltal itt lényegesen kisebb, legtöbbször elhanyagolható alakváltozások tapasztalhatóak.

A véges elemes számításoknál a Mohr-Coulomb modell nagymértékben, a felkeményedő és a Cam-Clay talajmodell csak kisebb mértékben becsülte túl a nagyobb mélységben fekvő talajok alakváltozását. Így a süllyedésszámításoknál e talajmodellek használata előzetes mérnöki mérlegelést igényel, és a modellmélységet ez alapján kell definiálni. A HSSmall talajmodell használatával, azaz a kisebb alakváltozási tartományban tapasztalható nagyobb merevség figyelembe vételével, a lényeges alakváltozások tartománya vagy más szóval határmélység megbízható módon meghatározható. A talajok e tulajdonságának figyelembe vétele az alakváltozások és a süllyedések pontosabb meghatározását teszi lehetővé, ezáltal a meglévő süllyedésmérések elemzéséhez is hasznos segítséget jelent.

HIVATKOZÁSOK

- Atkinson, J.H., Salfors, G. 1991. Experimental deformation of soil properties. Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **3**: 915-956.
- Benz, T. 2007. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences. ISBN 978-3-921837-55-9. Mitteilung 55. des Instituts für Geotechnik Universität Stuttgart, Germany.
- Egorov, K.E. Malikova, T.A. 1975, Settlement of foundation slabs on compressible base. 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangalore. **1**: 187-190
- Farkas J., 1995. Alapozás. BME egyetemi jegyzet. Műegyetemi kiadó.
- Kaniraj S.R., 1988 Design aids in soil mechanics and foundation engineering. ISBN-13: 978-0-07-451714-7. Tata McGraw-Hill, New Delhi
- Kempfert, H.G. 2006. Excavations and foundations in soft soils. ISBN-13: 978-3-540-32894-0. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Mayne, P.W., Rix, G.J. 1993. G_{max} - q_c relationships for clay. Geotechnical Testing Journal **16**(1): 54-60.
- Plaxis, Material Models Manual 2010 (http://www.plaxis.nl/files/files/2D2010-3-Material-Models_02.pdf)
- Széchy K., Varga L., 1968. Alapozás. Budapesti Műszaki Egyetem. Mérnöki Továbbképző Intézet kiadványa ; M. 66.