

A geotechnika területén a talajok víztartási függvényének alkalmazási köre és laboratóriumi mérésének tapasztalatai

The application of SWCC and the experiences of its laboratory measurement

FIRGI Tibor mestertanár
KESZEYNÉ Dr. SAY Emma PhD egyetemi docens
Prof. Dr. TELEKES Gábor PhD főiskolai tanár

Szent István Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építőmérnöki Intézet,
1146 Budapest Thököly út. 74
Tel/ Fax +36 (1) 252-12700, Firgi.Tibor@ybl.szie.hu, www.ybl.szie.hu

ABSTRACT

One of the key issues in unsaturated soil mechanics is, the features of the water function. Most engineering tasks affecting the unsaturated soils can be solved by the well-known soil mechanics examinations. In this article, we describe the scope of application of this soil characterization, together with our own measurement experiences.

Keywords: SWCC, unsaturated soil mechanics, sand layer box, pressure chamber

KIVONAT

A telítetlen talajmechanika egyik kulcs kérdése, a vizsgált talaj víztartási függvényének ismerete, így a telítetlen talajzónát érintő mérnöki feladatok döntő része - a jól ismert talajmechanikai vizsgálatokkal kiegészítve – megoldhatóvá válik. A cikkben e talajjellemző alkalmazási körét, meghatározási lehetőségeit ismertetjük, kiegészítve saját mérési tapasztalatainkkal.

Kulcsszavak: víztartási függvény, telítetlen talajmechanika, homoklapos berendezés, feszültségkamrás berendezés

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a geotechnikai tervezésben (árvízi védekezés, vízrendezés, állékonysági vizsgálatok, stb.), illetve a geotechnikához is kötődő interdiszciplináris (talaj- és a talajvíz védelem, hulladékgazdálkodás, stb.) mérnöki feladatok megoldásában, konferenciákon, szakcikkekben, szakmai számítógépes alkalmazásokban, a telítetlen talajok mechanikai viselkedését modellező, ún. telítetlen talajmechanika mind nagyobb súllyal szerepel. Úgy tűnik, hogy a talajmechanika fejlődésének nem egy lehetséges jövőbeni útja, hanem a jelene, a telítetlen talajmechanika alkalmazása.

A telítetlen talajzóna egyik legfontosabb jellemzője a víztartási függvény, amelyet közvetlen méréssel, vagy indirekt úton lehet előállítani. Amikor talajmechanikai célból, talajok víztartási függvényét kellett meghatározunk, a talajtanban szerzett tapasztalatok, irodalom és laboratóriumi mérőberendezések is mintául szolgáltak. A víztartási függvény talajmechanikai elmélete és felhasználási lehetőségei, valamint az általunk alkalmazott berendezések és eljárások ismertetése előtt röviden áttekintjük a talajmechanika vonatkozó alapfogalmait és tudománytörténetét.

1.1. Történeti áttekintés

Az I. Talajmechanikai Világkonferencián (1936) a telítetlen talajokkal foglalkozó tudományos előadások bemutatták, hogy a mérnöki építmények többsége a telítetlen talajzónával van kapcsolatban. Ugyanakkor e konferencián Terzaghi (Karl Terzaghi 1883-1963) a telített talajokra vonatkozó feszültségi állapotváltozót (hatékony feszültséget) vezetett be. Az új állapotváltozó lehetővé tette, hogy a telített talajok viselkedése

egységes, kontinuum-mechanikai közelítéssel legyen tárgyalható. Ezzel indult el a telített talajmechanika fejlődése.

A telítetlen talajokkal kapcsolatos mérnöki feladatokat viszont – megfelelő feszültségi állapotváltozók hiányában – általában tapasztalati úton oldották meg. A telítetlen talajok feszültségi állapotváltozóit Fredlund és Morgenstern 1977-ben állapította meg és vezette be. Céljuk egységes, a telített talajokra és a telítetlen talajokra is alkalmazható megoldások bevezetése volt, hogy lehetővé váljon a talajok egységes kontinuum-mechanikai tárgyalása. Ezt követte az állapotváltozók közötti kapcsolatot leíró anyagegyenletek, majd a bonyolultabb, kontinuum-mechanikai modellek megalkotása és alkalmazása [1], [2].

A geotechnikai számítások a klasszikus talajmechanikában zárt alakú megoldásokra vezettek. A telítetlen talajmechanikai feladatok nemlineárisak, megoldásuk általában numerikus módszerrel történik. Ezért széleskörű alkalmazásuk csak az utóbbi évtizedekben vált általánossá a számítástechnika fejlődésével.

A telítetlen talajok egyik fontos fizikai egyenlete a víztartási függvény, amit D.G. Fredlund (Delwyn G. Fredlund 1940-) a telítetlen talajmechanika „kulcsának” tart. Meghatározása a talajmechanikában a feszültségi állapotváltozók bevezetése után kezdődött. A talajtanban viszont a víztartási függvény elméletét E. Buckingham már 1904-ben leírta. Mérésére szolgáló berendezések kifejlesztése az 1960-as évekre tehető [3].

1.2. Alapfogalmak

A *telítetlen talajokat* a talajtantól különbözően tekintik négy-fázisúnak. A fázisok ekkor: szilárd rész, folyadék, levegő és a víz-levegő határfelületen a felületi feszültség miatt elkülönülő 3-4 molekula-vastagságú hártya. Másrészt a talaj telítetlen, ha a pórúsvíznyomása (u_w) kisebb, mint a pórúslvegő-nyomása (u_a). A pórúslvegő-nyomás és a pórúsvíznyomás különbsége ($u_a - u_w$) pozitív, amit szívó feszültségnek, szívásnak, tenzióknak (s) neveznek. A levegő akkor „lép be” a talajba és a levegőfázis akkor lehet folytonos a talajban, ha a tenzió egy – pórúsmérettől függő – küszöbértéknél, levegő-belépési szívó feszültségnél nagyobb. Ennél kisebb tenzió esetén a talaj telített ($S_r = 100\%$), de szívó feszültség lép fel, azaz ($u_a - u_w$) pozitív, ezért a telítetlen talajmechanika rendszerében vizsgálandó. A telített talajmechanika egyik alap feltétele ugyanis, hogy $u_a = u_w$, azaz a tenzió nulla, ami ez esetben nem teljesül.

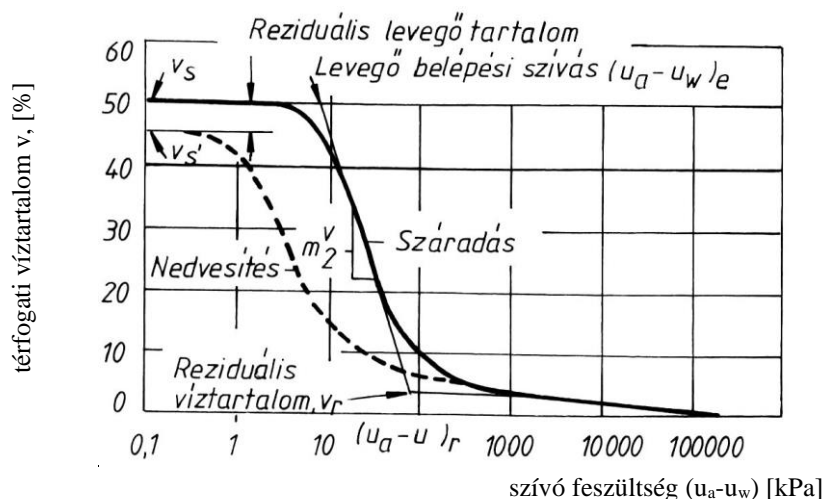
Az *állapotváltozó* a rendszer egyensúlyi állapotát írja le az anyagjellemzőktől függetlenül. A feszültségi állapotváltozók a rendszer feszültségi állapotának -, a deformációs állapotváltozók a rendszer deformációs állapotának jellemzésére alkalmasak. A talajok viselkedésének kontinuum-mechanikai alapú tárgyalásához megfelelő feszültségi állapotváltozók szükségesek. Ugyanis a teljes feszültség, a folyadék-, és a légnemű fázis nyomása/feszültsége önmagában nem jellemzi a talajt egyértelműen. A hatékony feszültség, a telített talaj feszültségi állapotváltozója, mely a szemcsék érintkezési pontjaiban ébredő erők, felületegységre vonatkozó értéke. Telített talajokban értéke kiszámítható a kívülről ható teljes feszültség és a pórúslvegő-nyomás (semleges feszültség) különbségeként. Telítetlen talajok esetén a fázisok nagyobb száma miatt, több független feszültségi állapotváltozó szükséges [4]. A telítetlen talajban mérhető három feszültség nagyság szerint csökkenő sorrendben: a teljes feszültség (σ), a pórúslvegő-nyomás (u_a) és a pórúsvíznyomás (u_w). Különbségük megadja a telítetlen talajok lehetséges feszültségi állapotváltozóit. Ezek a nettó normálfeszültség ($\sigma' = \sigma - u_a$), a szívó feszültség ($s = u_a - u_w$) és a pórúslvegő-nyomás (u_a) [5].

2. VÍZTARTÁSI FÜGGVÉNYEK A TALAJMECHANIKÁBAN

A víztartási függvény (görbe) – a talajtanban korábban pF-görbe, újabban víztartó képesség függvény - értelmezése, leírása különböző a talajmechanikában és a talajtanban. Az eltérés oka felhasználásának különbségében és történeti okokban keresendő. A következőkben a talajmechanikai tárgyalásmódra összpontosítunk.

A víztartási függvény (víztartalom – szívó feszültség függvény) a talaj nedvességtartalmát (v) a szívó feszültség ($s = u_a - u_w$) függvényében ábrázolja féllogaritmikus koordináta-rendszerben. Általában a nettó normálfeszültség nulla értéke mellett, azaz a $\sigma' = (\sigma - u_a) = 0$ síkon értelmezett, de bármely más állandó ($\sigma - u_a$) > 0 síkon is meghatározható. A víztartási függvény közvetlen, méréssel történő meghatározása csak telítetlen talajon végzett vizsgálattal lehetséges.

A víztartási függvény talajmechanikai jelölésrendszere az 1. ábrán látható. A vízszintes tengelyen a szívó feszültség logaritmus, a függőleges tengelyen a térfogati víztartalom aritmetikusan szerepel. A görbének három jól elkülöníthető tartományát különböztetjük meg. 1.: A levegő-belépési küszöbérték elérésig a talajminták gyakorlatilag vízzel telített. A víztartalom nem változik, a görbe közel vízszintes. 2.: A szívó feszültség növekedésével rohamosan csökken a víztartalom és nő a levegőtartalom. 3.: A szívó feszültség növekedésével csak kis mértékben csökken a víztartalom, a görbe ellapul. A száradási és a nedvesítési ág eltérő. A hiszterézis a szűkülő-táguló kapillárisrendszerrel (Jamin-cső) magyarázható [6]. Kezdeti telített talajállapotból általában csak a száradási ágat mérik.



1. ábra

A víztartási görbe talajmechanikai jelölésrendszere [5];[7]

2.1. A víztartási függvény matematikai leírása

A laboratóriumi méréssel a talaj térfogati víztartalmát (v) néhány, beállított szívó feszültség ($u_a - u_w$) értékre határozzuk meg, így a víztartási görbének csak néhány pontja ismert. A felhasználás érdekében célszerű e pontokra folytonos függvényt illeszteni. Különböző paraméteres függvények a talajtanban is jól ismertek, pl. a van Genuchten-függvény [8]. A talajmechanikában alkalmazott víztartási függvények közül példaként Fredlund és Xing egyenletét ismertetjük [9]:

$$v_n = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

ahol: a, n, m állandók, e – Euler-féle szám
 s - a szívó feszültség értéke ($u_a - u_w$)
 v_n - normalizált térfogati víztartalom

$$v_n = \frac{v - v_r}{v_s - v_r}$$

ahol: v - térfogati víztartalom
 v_s - telített térfogati víztartalom
 v_r - reziduális térfogati víztartalom

Az egyenlet mérési adatokra illesztésekor az ismeretlen paraméterek száma kevesebb, vagy egyenlő lehet, mint a víztartási görbe mért pontjainak száma. Még számos egyenletet ajánlanak különböző szerzők a talajok víztartási függvényének leírására és szinte mind levezethető a következő általános formulából [10]:

$$a_1 v_n^{b_1} + a_2 \exp(a_3 v_n^{b_1}) = a_4 s^{b_2} + a_5 \exp(a_6 s^{b_2}) + a_7 \quad (2)$$

ahol: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1, b_2$ - konstansok
Ha például a (2) egyenletben $a_7/a_1 = e$; $a_4/a_2 = (1/a)b_2$; $b_1 = m$; $b_2 = n$, akkor az (1) egyenletet kapjuk.

2.2. A víztartási függvény felhasználása a talajmechanikában

A vizsgált talaj(ok) víztartási függvényének ismeretében, a szilárdsági, alakváltozási és szivárgási feladatok megoldhatók, amennyiben a talajzóna telített talajokra értelmezett talajfizikai jellemzői ismertek, vagy vizsgálatokkal meghatározottak. Az építőmérnöki gyakorlatban tipikusan ilyen feladatok az árvízvédelmi gátak vizsgálata, rézsűk állékonyságának megállapítása, a függőleges földfalak vizsgálata, a térfogatváltozó (duzzadó-zsugorodó) talajok modellezése, a víztelenítési - vízáramlási fel-adatok számítása. A napjainkban használt számítógépes programok jelentős részében (pl. Plaxis, Soil Vision, GEO5, stb.) a telítetlen talajzónára

vonatkozó feladatok megoldására, a telítetlen talajmechanika eredményeit használják. Példaként a szilárdsági feladatok megoldásának alapját képező törési feltétel telítetlen talajokra való kiterjesztését és a szivárgási feladatok megoldásának alapját jelentő általános Darcy-törvényt tekintjük át.

A telített talajokra vonatkozó Mohr-Coulomb törési feltétel:

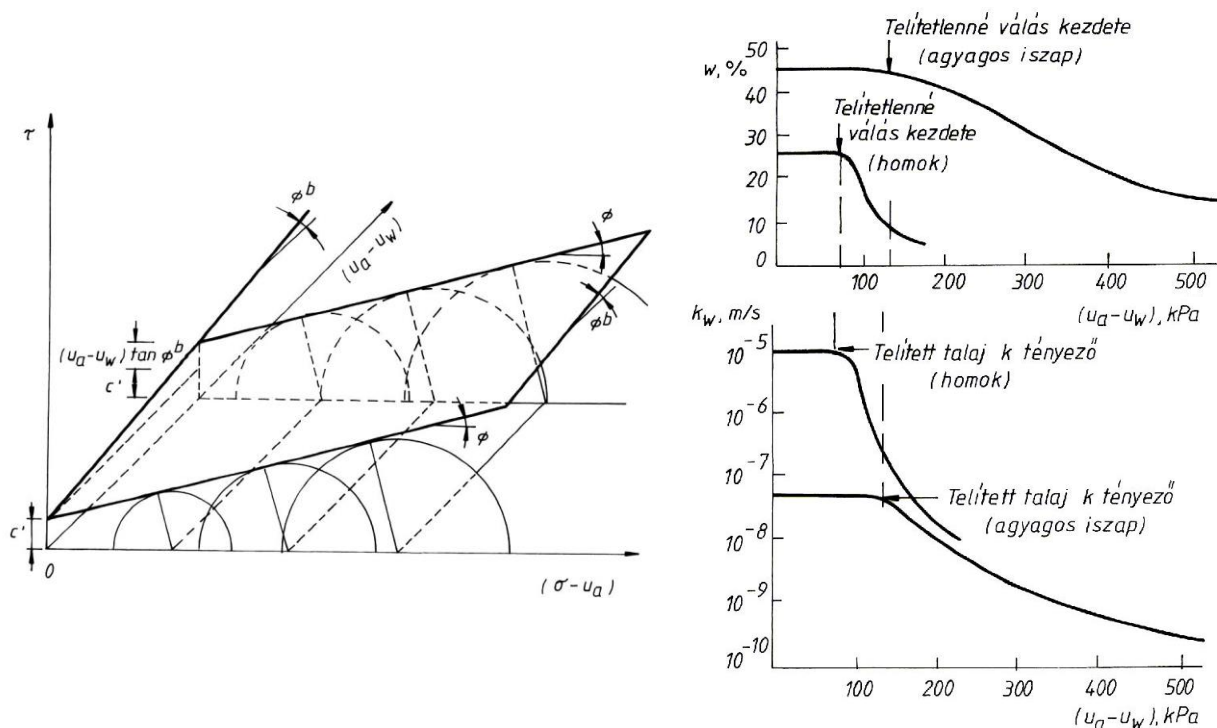
$$\tau = (\sigma - u_w) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

ahol : τ - nyírófeszültség,
 $(\sigma - u_w)$ – hatékony normálfeszültség
 φ - belső súrlódási szög,
 c – kohézió,

A telítetlen talajokra vonatkozó törési feltétel (2. ábra):

$$\tau = (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi^b + c \quad (4)$$

ahol : $(\sigma - u_a)$ – nettó normálfeszültség,
 $(u_a - u_w)$ – kapilláris szívó feszültség
 φ^b - kapilláris szívó feszültségtől függő súrlódási szög,



2. ábra

A Mohr-Coulomb törési feltétel, és a víztartási függvény
 – áteresztőképességi együttható összefüggése telítetlen talajok esetén [11] [12]

A φ^b szög a víztartási függvény integrálásával írható fel: [11]:

$$\tau(u_a - u_w) = (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + \int_0^{u_a - u_w} [v_n(u_a - u_w)]^p d(u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (5)$$

ahol : $v_n(u_a - u_w)$ – normalizált víztartási függvény.

A (4.) egyenlet szerinti leírásból látható, hogy alkalmazva a telített talajra vonatkozó feltételt, miszerint $u_a = u_w$, a Mohr-Coulomb törési feltételt (3) adja. Tehát a telítetlen talajmechanika egyenletének határesetére a telített talajmechanika összefüggésére vezet.

A Darcy-törvény érvényes telítetlen talajokra is (a vízfázis és a levegőfázis áramlására egyaránt), de a k áteresztőképességi együttható nem állandó, és lényegében csak a víztartalomtól függ. Az áteresztőképességi együttható a szívó feszültség függvényében a víztartási görbe felhasználásával is megadható [12] (2. ábra).

Az áteresztőképességi függvény, víztartási görbéből, kapilláris elméleti megfontolások alapján történő meghatározásának sok megoldása ismert. Itt példaként, van Genuchten [8] zárt alakú megoldását mutatjuk be, amely a gyakorlatban jól használható, és a paraméterek azonosak a víztartási görbe paraméterekkel:

$$k_r = \frac{\left\{1 - (as)^{n-1} \left[1 + (as)^n\right]^m\right\}^2}{\left[1 + (as)^n\right]^{m/2}} \quad (6)$$

A víz- és levegő-áteresztőképességi függvény ismeretében, a szivárgási feladatok a telítetlen talajzónában is megoldhatóvá válnak, általában numerikus módszert alkalmazó számítógépes programok segítségével.

3. A VÍZTARTÁSI FÜGGVÉNY MEGHATÁROZÁSA

A meghatározás két lehetősége: a mérés, vagy a számítás. A laboratóriumi mérések idő- és költség igényesek. A gyakorlat számára ezért fontosak, a szemeloszlási görbéből kapillárisokra vonatkozó összefüggéseken [13], szemeloszlási görbéből adatbázis felhasználásával egyszerűen mérhető talajparamétereken [14], és a szemeloszlási görbéből a szemeloszlási entrópián [15] alapuló számítási módszerek.

A víztartási görbe meghatározásának másik lehetősége a mérés, mely lehet helyszíni és laboratóriumi. Telítetlen talajok esetén három mérhető/szabályozható feszültség van: a teljes feszültség (σ), a póruslevegő-nyomás (u_a) és a pórusvíznyomás (u_w). A mérések csak akkor értékelhetők a feszültségi állapotváltozók függvényében, ha a pórusvíznyomást és a póruslevegő-nyomást külön-külön mérik vagy szabályozzák.

A mérési módszerek két nagy csoportja ismert, a mechanikai és a kémiai. A mechanikai módszerek egy részénél közvetlenül a vízfázis szívási feszültségét növelik (csökkentik), a másik lehetőség a levegő-nyomás növelése, az úgynevezett tengelyeltolási technika alkalmazása. A tengelyeltolási technikára telítetlen talajok esetén azért van szükség, mert a víznyomás a mérőrendszerben a fellépő kavitáció miatt nem csökkenthető az adott hőmérsékletnek megfelelő telítettgőz-nyomás alá, és ez a mérésnek felső határt szab. A tengelyeltolási technika a következő két fizikai megfigyelésen, tapasztalati tényen alapul. Egyrészt, ha a talajmintát zárt térbe helyezük, és megnöveljük a légnyomást Δp értékkel, akkor minden mérhető feszültség (teljes feszültség, pórusvíz- és póruslevegő-nyomás) nő Δp értékkel, miközben a $(\sigma - u_a)$ – nettó normálfeszültség, és a $(u_a - u_w)$ – szívó feszültség állandó marad. Másrészt, ha a mintát olyan féligáteresztő elemre helyezük, amely a létrehozott légnyomás értéknél a vizet átereszt és a levegőt nem, akkor a pórusvíznyomás értéke külön szabályozható. Ha tehát egyidőben levegőnyomást alkalmazunk, és a minta alján a pórusvíznyomás értékét külön szabályozzuk, akkor elvileg tetszőlegesen nagy tenzió érték létrehozható.

A féligáteresztő lapok/membránok anyaga lehet szemcsés anyagú, kerámia vagy celofán. Működésük egyrészt az adhéziós jelenségeken alapszik, másrészt az elem megfelelő víztartási tulajdonságán. A megfelelő azt jelenti, hogy csak a vizet engedik át és a levegőt mindaddig nem, míg a fellépő szívó feszültség nagysága a levegő belépési küszöbértékük alatt marad. Tehát a víztartási görbéjük 1. tartományában használhatók mérésre ezek az elemek.

A kémiai módszerek, relatív páratartalom szabályozásán alapuló csoportjának alapelve az a tény, hogy mindig egyensúlyi állapot alakul ki a minta víztartalma és az azt körülvevő légtér páratartalma között. Az ozmózison alapuló kémiai módszerek esetén vízben oldott, nagy molekulásúlyú polietilén-glykol (PEG) anyagot használnak egy olyan membrán egyik oldalán, amely ezt a vegyületet nem engedi át.

A módszerek alkalmazhatósági tartományai [16]:

- 1) mechanikai módszerek:
 - (a) víznyomást szabályozva:
 - megcsapolt vízoszlop módszer $u_a - u_w < 20 \text{ kPa}$
 - függő vízoszlop módszer $u_a - u_w < 100 \text{ kPa}$
 - (b) levegő- és víznyomást szabályozva:
 - nyomásmembrános eljárás $100 \text{ kPa} < u_a - u_w < 1600 \text{ kPa}$
 - feszültségkamrás eljárás $u_a - u_w < 600 \text{ kPa}$
- 2) kémiai módszerek:
 - (a) ozmózison alapuló $u_a - u_w > 2500 \text{ kPa}$
 - (b) relatív páratartalom szabályozása $u_a - u_w < 1500 \text{ kPa}$

Általában nem elegendő egyetlen módszert alkalmazni a teljes víztartási görbe meghatározására. A gyakorlatban alkalmazott eljárási rend a növekvő tenzió szerint: teljes telítés vízzel - minta alsó éle merül vízbe - homoklapos berendezés - kaolinlapos berendezés – nyomásmembrános készülék.

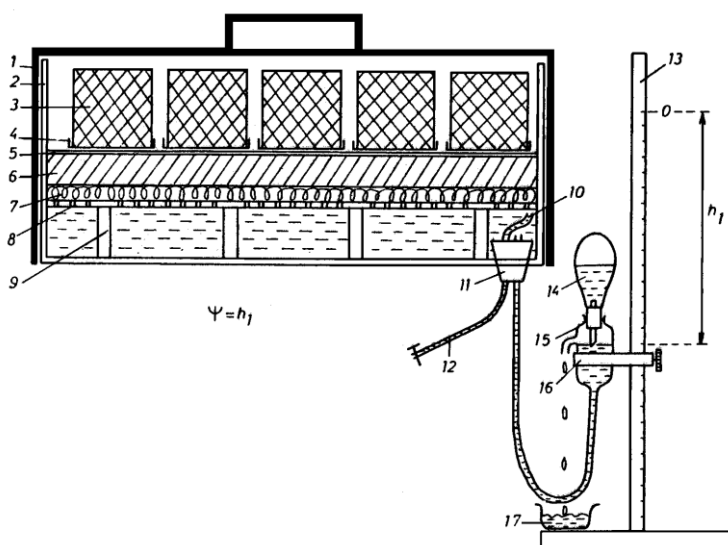
Szakcikkék és konferenciák tanúsága szerint napjainkban a víztartási görbe méréstechnikai fejlesztése az automatizálás és a sokpontos mérés irányában folytatódik [17].

3.1. Talajmechanikai célú víztartási görbék laboratóriumi mérési tapasztalatai

Mintáink víztartási görbéinek mérésére a függő vízoszlop módszert (homoklapos berendezéssel) és a feszültségkamrás eljárást alkalmaztuk. Méréseink során a szokásos geotechnikusi tapasztalat szerint jártunk el, miszerint a szemcsés és a kötött (plasztikus) talajok vizsgálatára más vizsgálati metodika alkalmas.

3.1.1. Homoklapos berendezés

A mérési berendezés az ún. függő vízoszlop módszer laboratóriumi eszköze. A folyadékfázisra ható szívó feszültséget hozunk létre, a meghatározó szabad vízfelszínnek, a mintához viszonyított helyzete változtatásával, azaz a nívópalack mozgatásával és/vagy egyidejű vákuum létrehozásával (3. ábra).



1. Átlátszatlan PVC fedél emelőfüllel.
2. Átlátszó plexi kád.
3. 100 cm³-es hengerekben elhelyezett talajminta.
4. A hengerek alsó nyílását lezáró nylon szitaszövet, szorító gumikarikával.
5. Nylon szitaszövet a szűrőlap felszínén.
6. Töltőanyag.
7. Azbesztgyapot.
8. Átlátszó plexiből készült perforált tartólap.
9. Tartólap lábazata.
10. Üvegcső a vákuumtérben esetleg megjelenő légbuborékok eltávolítására.
11. Kétfuratú gumidugó.
12. Légbuborék mentesítő cső kivezetése a vákuumforráshoz.
13. cm-beosztással ellátott acélállvány.
14. Nívópalack.
15. Állandó vízszintet biztosító edény.
16. Rögzíthető fémkonzol.
17. Vízyűjtő edény.

3. ábra

Homoklapos berendezés [16]

E laboratóriumi eszközöket az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetben (TAKI) fejlesztették ki, és Várallyay-féle pF-mérő „box”-ként, vagy TAKI-módszerként vált ismertté. Az Eijkelkamp-féle berendezés, amely a kereskedelmi forgalomban kapható, működési elvét tekintve a homoklapos-kaolinlapos berendezéssel azonos.

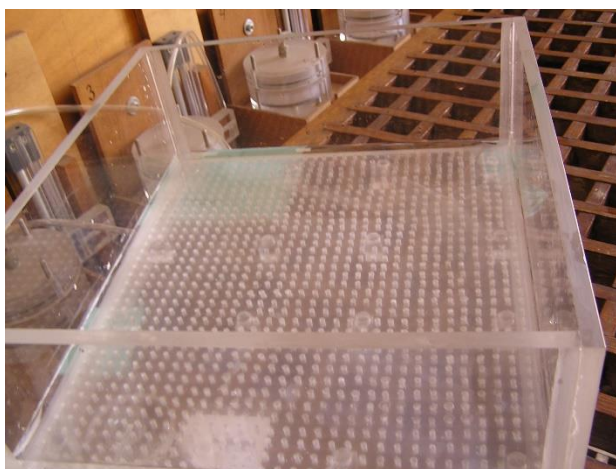
A kutatási program egy részében homok és homok-keverékek víztartási görbéinek mérését végeztük. Mivel az 1-100 vízoszlop-cm terhelés közötti tartományban a TAKI berendezései fix terhelésen működnek, így új homoklapos berendezést építettünk (4. ábra).

A berendezéshez szükséges egy felülről nyitott doboz, amelynek átlátszósága fontos a szívótérben esetlegesen megjelenő buborékok vagy homokfolyás észlelhetősége érdekében. Továbbá megfelelő szilárdság, légzárás, vegyi ellenállóság és biológiai inaktivitás kell, hogy jellemezze a berendezést. E követelményeknek a 10 mm vastagságú plexi lemez megfelel. Újításként a mérőedény 3 részből készült – 1 meghajlított U alakból és két oldallapból. Ezáltal csökkent a ragasztás hossza. A gyártást és a ragasztást speciális kétkomponensű ragasztóval szakkég végezte.

A szívótér és a többletű töltet elválasztására perforált lapot használtunk. Anyaga szintén 10 mm vastag, lyuggatott, lábakon elhelyezve. A további kiegészítő eszközök megegyeznek a Várallyay-féle berendezésével.

A berendezés membránja az alacsony helyzetben tartott vízfelszín által kifejtett szívást a víztől a mintához továbbítja. A szívástartományon belül a vizet átbocsájtja, a levegőt pedig visszatartja. A durva szemcsés anyagoknak kicsi a levegő belépési szívásuk, a finomabb szemcséjű anyagoknak kis szívásértékeknél kicsi a vízáteresztő-képessége, ezért a különböző szívástartományokhoz különböző anyagokat használunk membránként.

Az elválasztó réteg feladata, hogy megakadályozza a membrán anyagának alsó vízterbe jutását. Elválasztó réteggént eredetileg azbesztet alkalmaztak, de egészségvédelmi okokból ez az anyag már nem használható, ezért új anyagot kerestünk. Kipróbáltunk, geotextíliát, bazaltgyapotot; kerámiagyapotot. Ezek közül a kerámiagyapot bizonyult megfelelőnek, mert a kezdeti minimális mértékű homokszivárgás után, már feladatát tökéletesen ellátta.



4. ábra

Homoklapos berendezés építés- és működés közben

Mérési tapasztalataink az új berendezéssel a következők. A méréshez gyűrűben elhelyezett mintát használunk, amelynek víztartalom változását tömegméréssel mértük. A víztartási görbe mérésének módszere a szakirodalomból ismert [18]. Mivel egyetlen berendezéssel dolgoztunk és a nívópalack mozgatásával növeltük a terhelést, ezért a szűrőréteg kismértékben és rugalmasan alakváltozott (összenyomódott). Ezt a nívópalack mozgatási kalibrációjával vettük figyelembe.

Méréseink eredményei szerint a szemes talaj vízáteresztő képessége a szívó feszültség kis értékeinél is rohamosan csökken, ezért az egyensúly beállításához akár több mint egy hónapra is szükség lehet. Tapasztalatunk szerint, az elhúzó méréseket algásodás zavarhatja meg, amit fényzáró tetővel minimalizáltunk. Gombaölő szert nem használtunk, mert a víz viszkozitására gyakorolt befolyásoló hatását nem ismertük.

A folytonos vízszál megléte döntő jelentőségű a mérés megbízhatósága szempontjából. Ugyanakkor a minták mozgatása, kivétele szükséges a tömegváltozásuk méréséhez, így ideiglenesen megszakad a vízszál. Az újbóli kialakulásához a minta aljának és a homoklapnak a jó kapcsolata, érintkezése szükséges, amelyet a berendezésnél a lágy anyagú homoklap elősegíti (szemben a merev anyagú pl. kerámia szűrőkővel). Azonban ez esetben is célszerű a minták mozgatását, e hibaforrás elkerülése érdekében minimalizálni.

A függő vízszalpos módszer előnye, hogy kicsi szívás értékek beállításánál a folyadékfázis nyomásának (szívásának) pontos szabályozása a légnyomásénál egyszerűbb. Az azbeszt szűrőréteg kiváltása lehetővé teszi, az előregedő és felújítandó Várallyay-féle berendezések további üzemben tartását.

3.1.2. Feszültségkamrás berendezés

Kutatási programunkban kötött (plasztikus) talajok víztartási görbéjét is mértük. Ebben az esetben célszerű a tengelyeltolási technikát alkalmazó berendezést választani. Méréseinkhez feszültségkamrás berendezést használtunk, amelyet Kanadában (University of Saskatchewan) fejlesztettek ki. A készülék oldható csatlakozókkal ún. gyors csatlakozókkal kapcsolható a nyomást biztosító berendezésre. Anyaga könnyű műanyag, így a tömegmérés a mintát tartalmazó készülékkel együtt történhet, századgramm pontossággal. Ez lehetővé teszi a talajminták kivétele nélküli több szívó feszültség értékhez történő víztartalom meghatározását (5. ábra).



5. ábra
A feszültségkamrás készülék

A berendezés további tartozékai az alsó víztér zárására szolgáló csapok: két oldalról záró gyorscsatlakozók, felső levegő gyorscsatlakozó. Az atmoszférikusnál nagyobb levegőnyomás előállításához kompresszort, beállításához nyomásszabályzót, a tömegméréshez pedig 4 kg-ig mérő digitális mérleget alkalmaztunk.

A szűrőkö telítését, amely a mérést megelőző egyik fontos feladat, szakirodalom [4] és szabvány (ASTM D 2325-68) szerint végeztük. A szűrőkö telítési eljárása azon az elven alapul, hogy a víznyomás növelésének hatására a víz egységnyi térfogatában több levegő oldódik. A pórus-víznyomás növekedése miatt a levegő „oldódik” a pórusvízben. A telítés menete a következő:

1. A kamrában lévő szűrőköre desztillált, „levegőtlenített” vizet töltünk. A kamrát felül zárjuk, és benne a levegő belépési küszöbértéknél nem sokkal kisebb levegő-nyomást hozunk létre, miközben hagyjuk átfolyani a vizet. Egy órán keresztül tartjuk fent ezt az állapotot, miközben néhányszor az alsó csaphoz csatlakoztatott fecskendő vagy büretta segítségével az alsó víztérben megjelenő buborékokat kifűjjük.
2. Ezután a felül alkalmazott légnyomás fenntartása mellett az alsó csapokat lezárjuk. Így a szűrőköben és az alsó víztérben is ugyanakkora nyomás alakul ki. Ezt az állapotot egy órán keresztül fenntartjuk, majd nyitjuk az alsó csapokat. Tíz percig az alsó csapokat nyitott állapotban hagyjuk, miközben az alsó víztérben megjelenő buborékokat fecskendő vagy büretta segítségével kifűjjük.
3. A tíz perc eltelte után az alsó csapokat újra zárjuk és még ötször megismételjük a 2. pontban leírt 70 perces eljárást. A szűrőkövet ezután víz alatt kell tartani.

A feszültségkamrás mérés nem szabványosított, ezért a következő mérési protokollt állítottuk össze:

1. A mintatartó hengerben lévő minta szívó feszültségét a mérés megkezdése előtt - vízbe állítva - a lehető legkisebb értékre kell csökkenteni („telítés”).
2. A mintát, leszorító rugóval a feszültségkamrában rögzíteni kell, a berendezést össze kell szerelni, és lemérni a tömegét. Össze kell kapcsolni a levegőnyomás vezetékkel. A víz kivezetéseket ki kell nyitni.
3. Alkalmazni kell a megfelelő nagyságú légnyomást, amelyet kompresszor vagy levegőpalack segítségével lehet létre hozni. Az alsó csapok nyitva vannak, amelyeken keresztül a fölös víz a mintából távozik, valamint a szűrőkövön átdiffundált levegőt a csapokon keresztül időről-időre az alsó víztérből fecskendő segítségével ki kell fűjni.
4. A berendezés tömegét a levegő- és vízcsapok zárása és bontása után újra le kell mérni.
5. Az egyensúlyi állapot akkor állt be az alkalmazott tenzió és a minta víztartalma között, ha a fél óra időkülönbséggel mért tömegek között az eltérés pl. 0.01 g-nál kisebb.
6. Ha az egyensúlyi állapot beállt, a berendezés szétszedése nélkül (a minta zavarása nélkül) alkalmazható a következő légnyomás (ill. szívó feszültség) érték. Így egy mintán mérhető az adott talaj víztartási görbéjének nulla és a szűrőkö levegő belépési küszöbértéke közötti tartománya. Mérési berendezésünk e felső határértéke 500 kPa volt, de léteznek más (pl. 100 kPa) levegő belépési küszöbértékű szűrőkövel ellátott berendezések is.
7. A méréssorozat végén a mintát a feszültségkamrából kiszedve, 105 °C-on tömegállandóságig szárítva és megmérve a száraz tömegét, a víztartási görbe diszkrét pontjai számíthatók.

E berendezés mérési tapasztalatai a következőkben foglalható össze. Hasonlóan a függő vízoszlop módszeréhez, itt is döntő jelentőségű a folytonos vízszál megléte, amelyet a merev szűrőkö kevésbé segít. Kötött (plasztikus) talajmintáknál ezért is nagyon fontos a talajminta alsó felületének gondos kialakítása, hogy a bekészítés előtt ép, friss felületű legyen. Tapasztalatunk szerint a terhelés nem monoton jellege (légnyomás

lecsökkentése) is rontja a minta és a szűrők közötti kapcsolatot. Egyes méréseknél ugyanis lecsökkentettük a légnyomást a tömegmérés előtt, de így egy tehermentesítési és terhelési ciklus után szinte mindig elromlott a minta-szűrők közötti kapcsolata, ezért ez nem javasolható. Ha a tömegmérés előtt nem csökkentjük le a légnyomást a berendezésben, akkor nem hanyagolható el az a tény, hogy nagyobb nyomáson a kamrába zárt levegő mennyisége és így tömege is nő, tehát szükséges a bezárt levegő tömegváltozásának figyelembe vétele. A mérést ezzel a hatással korrigálni kell, ezt több módon is megtehetjük:

1. Megmérjük a légnyomás alkalmazása után a levegőtöbbletből adódó tömegváltozást, és ezzel javítjuk a mért eredményt, azaz a mérés megkezdése előtt korrekciós mérést végezhetünk.

2. Számítással korrigáljuk a mért eredményt ($pV = mRT$ – állapotegyenlet felhasználásával).

A víztartási görbe feszültségkamrás berendezéssel történő meghatározásának előnye, hogy a tengelyeltolási technikát alkalmazzuk és így nagyobb tenzió tartományokra is kiterjeszhető a mérés (a szűrők levegő belépési küszöbértékéig), hátránya viszont, hogy a légnyomás kevésbé pontosan szabályozható, ami kicsi tenzióknál okozhat hibát.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben a telítetlen talajok egyik legfontosabb talajfizikai jellemzőjéről a víztartási görbéről írtunk. A jelenleg alkalmazott méréses technikai lehetőségeket foglaltuk össze, a módszerek elvi hátterének rövid ismertetésével. Két víztartási függvény mérési módszert alkalmaztunk az építőmérnöki gyakorlatban előforduló talajféleségekre. Mértünk tisztán szemcsés talajokat: kavicsot és homokot illetve ezek keverékeit, valamint kötött (plasztikus) talajokat, iszapot és agyagot. Homoklapos berendezést és feszültségkamrás készüléket alkalmaztunk. A kontroll méréseket az MTA-ATK-TAKI végezte. Megállapítható, hogy ezek a mérési módszerek a geotechnikai gyakorlat számára is megfelelőek és a mérési eredmények megfelelő pontosságúak. A két mérőeszköz megbízhatósága, egyszerűsége és költségigénye miatt a jövőben is használható.

Szerettük volna megosztani e mérések területén, a méréses technikai fejlesztések során szerzett tapasztalatainkat, javaslatainkat, amelyeket, egy rutin geotechnikai vizsgálatokra alkalmas laboratórium hasznosítani tud, ha a jövőben e terület felé is kiterjeszti tevékenységi körét. Ez azért válhat szükségessé, mivel a telítetlen talajmechanika alapméréséről van szó.

Köszönet nyilváníatás

Dr. Imre Emőkének és Dr. Rajkai Kálmánnak köszönjük a cikk elkészüléséhez nyújtott szakmai segítséget. A tudományos célú- és kontroll mérések elvégzését Laufer Imrének, Havrán Krisztinának. és Motsai Gézánek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Sheng D., Fredlund D.G., Gens A. (2008): A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables, *Canadian Geotechnical Journal*, 45., pp. 511–534.
- [2] Imre E., Laufer I., Sheng D. (2012): A telítetlen talajok egyes talajmechanikai anyagmodelljei. *Hidrológiai Közölny* 92:(3), 55-73. o.
- [3] Várallyay Gy. (1973): A talajok nedvességpotenciálja és új berendezés annak meghatározására az alacsony (atmoszféra alatti) tenziótartományban, *Agrokémia és Talajtan* 22., 1-22. o.
- [4] Imre, E., Czap, Z., Telekes, G. (1999): A telítetlen talajok feszültségi állapotváltozói, *Hidrológiai Közölny* 3., 234-246 o.
- [5] Fredlund, D.G., Rahardjo, H.(1993): *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wilry & Sons, New York, p. 560.
- [6] Taylor, D.W. (1948): *Fundamentals of Soil Mechanics*, New York, Wiley, p. 700.
- [7] Imre E. (2009): *Telítetlen talajok geotechnikájának alapjai* (2. bővített kiadás), Egyetemi jegyzet, SZIE-YMÉTK, Budapest-Gödöllő
- [8] Van Genuchten, M.T.(1980): A closed-form equation for prediciting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sciences American Journal* 44., pp. 892-898.
- [9] Fredlund, D.G., Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal* 31., pp. 521-532.
- [10] Imre, E., Havrán, K., Lőrincz, J., Rajkai, K., Firgi, T., Telekes, G. (2005): A model to predict the soil water characteristics of sand mixtures, *Proceedings of the Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, pp. 359-368.
- [11] Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., Barbour, S.L.(1995): The relationship of the unsaturated shear streng to the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal* 33, pp. 449-448.
- [12] Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S. (1994): Prediciting the permeability function for unsaturated soils using the soil- water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Jurnal* 31, pp. 533-546.
- [13] Arya, L.M., Paris, J.F. (1981): A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soils Sci. Soc. Am. J.*, 45., pp. 102-103.

- [14] Rajkai, K. (2004): A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest
- [15] Imre E; Havrán, K; Lőrincz, J; Rajkai, K , Firgi, T; Telekes, G. (2005) A model to predict the soil water characteristics of sand mixtures, Proceedings of the Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 38337 4, pp. 359-368.
- [16] Várallyay, Gy. (2003): A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai, Budapest-Gödöllő
- [17] Ray, R. (2016): Geotechnical Engineering in the Digital Age, In: Huszák, T., Koch, E., Mahler, A. (ed.), 2. Széchy Károly Emlékkonferencia, MGE-MMK-GT, pp. 22-23.
- [18] Rajkai, K., Várallyay, Gy.(1993): Talajfizikai és mezőgazdasági-vízgazdálkodási fogalmak (definíciók, jelölések, mértékegységek), Búzás I. (szerk.): Talaj- és Agrokémiai Vizsgálati Módszerkönyv, INDA4231 Kiadó, 221-231. o.