

HENGERES TALAJMINTÁK SUGÁRIRÁNYÚ ALAKVÁLTOZÁSMÉRÉSE A TRIAXIÁLIS CELLÁBAN

KABAI IMRE*

[Beérkezett: 1973. június 26-án]

A dolgozat a címben említett vizsgálatok nagy tömegben való elvégzésére alkalmas egyszerű készüléket és a vizsgálatokból levonható következtetéseket ismerteti.

1. Bevezetés

A kisméretű triaxiális cellákban, a háromtengelyű feszültségállapot alá helyezett hengeres talajminták sugárirányú alakváltozása az ismert alakváltozásmérő órákkal nem mérhető. Az alakváltozás mérésére számos módszer ismert, de azok nagytömegű vizsgálatokhoz megbízhatóan nem alkalmazhatók.

Ez a körülmény adta az indítékot egy egyszerű eszköz kialakításához. A dolgozat célja a mérőeszköz és a mérési eredményekből levonható következtetések értékelése és ismertetése.

2. A mérőeszköz

A tengelyszimmetrikus feszültségállapot alá helyezett hengeres talajminták sugárirányú alakváltozásának mérésére szolgáló eszközök két csoportba sorolhatók: *a)* közvetett és *b)* közvetlen mérési adatokat szolgáltató eszközök.

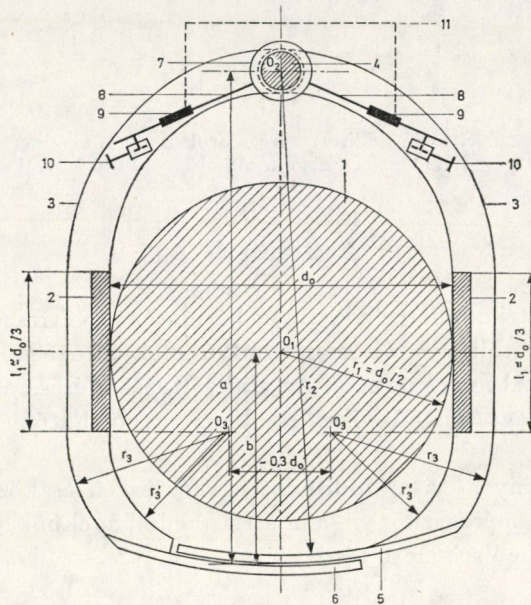
Az *a)* csoportba tartozó eszközök (fényképfelvételek, röntgenfelvételek stb.) általában nehézkesek, bonyolultak, költséges eszközöket igényelnek, munkaigényesek és egyesek csak zavart minták vizsgálatára alkalmasak.

A *b)* csoportba tartozó eszközök is sokfélék, de közös tulajdonságuk, hogy a mérőeszköz magára a talajmintára van rögzítve. Az alkalmazott alapelv miatt a mért keresztmetszet helyzete nem ismert pontosan, és ezért az eredmény értékelése bizonytalan.

Az említett hiányosságokat kívánja kiküszöbölni az ismertetésre kerülő mérőeszköz, amely nagytömegű vizsgálatokhoz is jól alkalmazható.

* Kabai Imre, 1142 Budapest, Ungvár u. 56/c.

Alapelvét az 1. ábra szemlélteti. A talajmintát (1) két alkotómenti érzékelő (2) érinti, ezek a fix tengely (4) körül vízszintes síkban forgó csuklós-karokra (3) vannak rögzítve. Az alkotómenti érzékelők (2) magassága $m \approx 2/3 \cdot h_0$, ahol h_0 a talajminta magassága. A csuklóskarok a minta félmagasságának a síkjában forognak, de szükség szerint ez a sík változtatható — emelhető vagy süllyeszthető. Az érzékelők függőleges sík felületek, mozgás



1. ábra. Alakváltozás-mérő eszköz: 1 — talajminta; 2 — érzékelő; 3 — csuklós kar; 4 — függőleges fix-tengely; 5 — skála; 6 — nóniuszos index; 7 — lemezrugó rögzítő gyűrű; 8 — lemezrugó; 9 — elektromos nyúlásmérő bélyegek; 10 — szabályozó csavar; 11 — csatlakozás az elektromos nyúlásmérő műszerhez

közben is függőlegesek maradnak, és a talajminta terhelése alatt a maximális sugárirányú alakváltozásnak megfelelő helyzetbe jutnak. A vázolt kialakítás két eszköz együttes alkalmazását is lehetővé teszi, és négy alkotó mentén — két egymásra merőleges függőleges síkban — is elvégezhető a mérés.

A csuklós karokra (3) rögzített skála (5) és átlátszó anyagból készített nóniuszos index (6) relatív elmozdulása a tényleges sugárirányú alakváltozásnak $a/b \geq 2$ -szerese. Figyelembe véve a vízzel feltöltött cella nagyító hatását is, a közvetlen leolvasás pontossága $\sim 0,05$ mm, ami rutinvizsgálatokhoz teljesen elegendő.

A mérőeszköz érzékenysége elektromos nyúlásmérő alkalmazásával növelhető. Az elektromos nyúlásmérőket (9) a fix tengelyhez (4) kapcsolt lemezrugókra (8) kell ráragasztani. A csuklós karokhoz (3) kapcsolt szabá-

lyozó csavarokkal (10) a lemezrugókat kissé meg lehet feszíteni, illetve beszabályozni az alakváltozás pontos mérése érdekében. A lemezrugók alakváltozását a cellán kívül elhelyezett elektromos mérőműszerek mutatják, illetve szükség szerint regisztrálják.

A mérőeszközt az ismertetett alapelv alapján, a rendelkezésre álló triaxiális cellák és talajminta méretek ismeretében kell megtervezni és elkészítés után pontosan be kell kalibrálni.

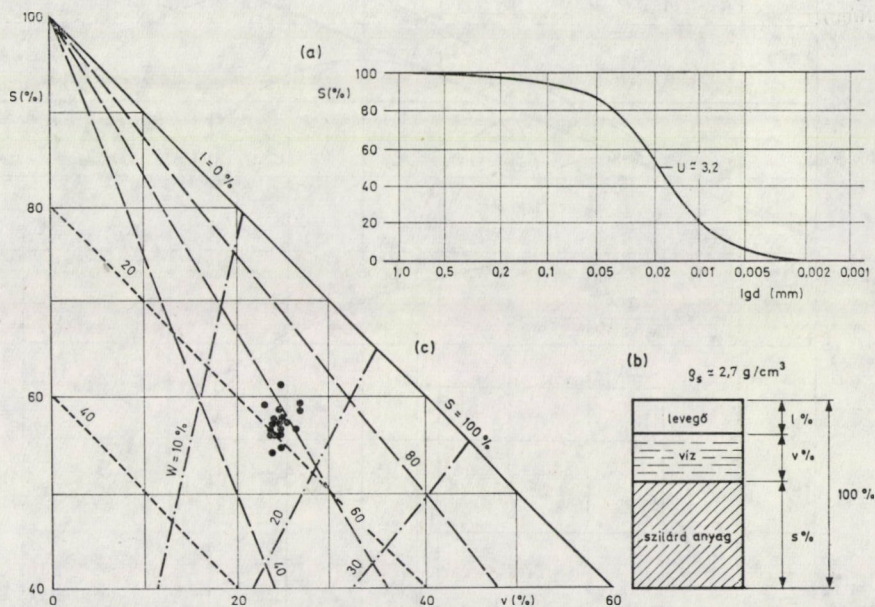
3. Mérési mód

Az 1. ábrán vázolt mérőeszköz egyszerű kivitelezésben, már évek óta használatban van a Geotechnikai Tanszék laboratóriumában. Az eredmények jellegzetességeit egy mérési sorozat alapján mutatjuk be.

A vizsgálatok telítetlen tömörített talajra vonatkoznak. A vizsgált anyag szemeloszlási görbéjét és a zavart minták szilárd, víz és levegő arányát a 2. ábra mutatja.

A triaxiális kísérletek végrehajtásának sorrendje a következő volt:

- a) a talajminta hidrosztatikus feszültségállapot alá helyezése ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) és a konszolidáció kivárása ($\sigma_1 = \bar{\sigma}_1; \sigma_2 = \bar{\sigma}_2; \sigma_3 = \bar{\sigma}_3$);
- b) a törési kísérlet végrehajtása nyílt rendszerben, térfogatváltozás ($\beta \neq 0$) mellett, $v \approx 0,5$ mm/perc terhelési sebességgel.



2. ábra. (a) A vizsgált talaj szemeloszlása; (b) a tömörített minta modell; (c) a vizsgált minták szilárd rész, víz és levegő eloszlása

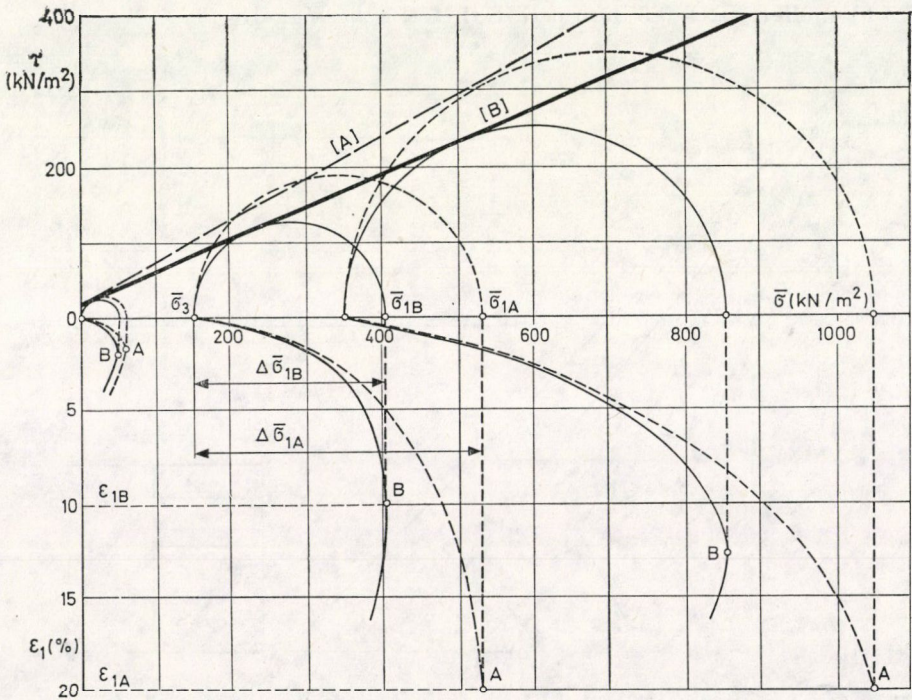
Az alkalmazott kísérleti módszer mellett a teljes főfeszültség ($\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_1$) és a hatékony főfeszültség ($\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3 + \Delta\bar{\sigma}_1$) egyenlő volt egymással ($\sigma_1 = \bar{\sigma}_1$; $\Delta\bar{\sigma}_1 = \Delta\sigma_1$), mivel a kísérlet alatt a konszolidáció lejátszódott. (A képletekben $\bar{\sigma}_1$ a legnagyobb, σ_3 a legkisebb főfeszültséget, és $\Delta\sigma_1$ pedig a deviátor-feszültséget jelenti.)

4. Kísérleti eredmények értékelése

A vizsgálatok alapján a következő kérdések elemzésére kerül sor.

- A sugárirányú alakváltozás szerepe.
 - A térfogatváltozás és sugárirányú alakváltozás összefüggése.
 - A nyírószilárdsági paraméterek és a törési kritériumok összefüggése.
- a) A leírt körülmények között elvégzett vizsgálatokból egy kísérleti eredményt a 3. ábra mutat be. A nyírószilárdsági egyenesek [A], [B] két feldolgozás eredményét adják. Az eredmény az összes mintánál hasonló volt, amire a későbbiekben még visszatér a dolgozat.

Az [A] nyírószilárdsági egyenes $\varepsilon_1 = 20\%$ -os tengelyirányú alakváltozáshoz tartozó főfeszültségi érték ($\bar{\sigma}_{1A} = \bar{\sigma}_3 + \Delta\bar{\sigma}_{1A}$) alapulvételével készült



3. ábra. Nyírószilárdsági egyenesek a két feldolgozás alapján

(KÉZDI [8]). (A képletben $\Delta\bar{\sigma}_{1A} = F/A_0$, ahol F a tengelyirányú erő és A_0 a minta kezdeti keresztmetszeti területe.)

A $[B]$ nyírószilárdsági egyenes a sugárirányú alakváltozásmérés alapján számított főfeszültséget ($\bar{\sigma}_{1B} = \bar{\sigma}_3 + \Delta\bar{\sigma}_{1B}$) vette alapul. (A képletben $\Delta\bar{\sigma}_{1B} = F/A$, ahol A az átmérőmérés alapján meghatározott változó keresztmetszeti terület.)

A 3. ábrából kitűnik, hogy a két feldolgozási mód jelentős eltérést eredményez a nyírószilárdságban. A változás a belső súrlódási szögben jelentkezik, és a kohézió gyakorlatilag változatlan.

Az irodalomból (KÉZDI [8]) ismert képletet is lehet alkalmazni a redukált deviátor feszültség meghatározására:

$$\Delta\bar{\sigma}_{1r} = \Delta\bar{\sigma}_{1A}(1 - k\varepsilon_1) \quad (1)$$

Az (1) képletben szereplő k a talajminta deformációs alakjától függő konstans, ahol $k = 0,6 \div 1,0$ között változik. Az (1) képletet alkalmazva nagyon jelentős volt a szórás a tényleges mérési eredményekhez képest. A

$$\delta = 100 \frac{\Delta\bar{\sigma}_{1r} - \Delta\bar{\sigma}_{1B}}{\Delta\bar{\sigma}_{1B}} \quad (2)$$

képletet bevezetve a relatív összehasonlításra, $\delta = -2\% \div +8\%$ között változott. Az (1) képlet alkalmazása tehát csak közelítő pontosságú eredményt szolgáltatott.

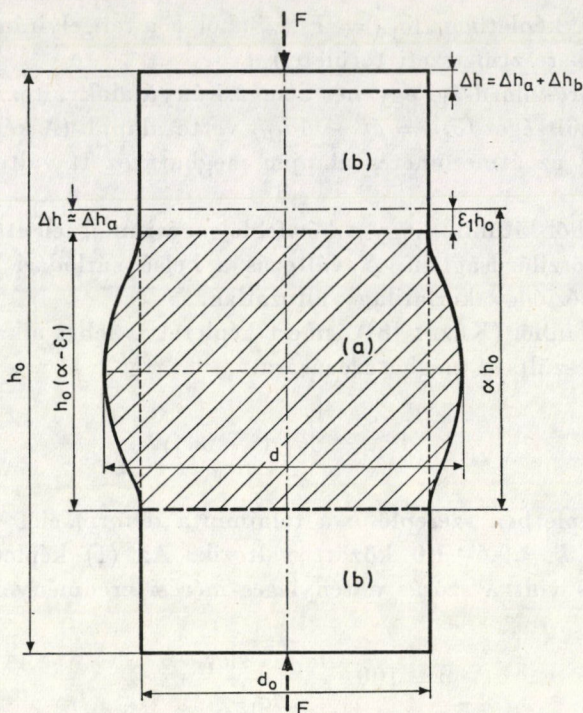
Az eredmények azt bizonyították, hogy a sugárirányú alakváltozás mérése legalább annyira fontos, mint a tengelyirányú alakváltozásé.

b) Elvileg az átmérőváltozás a térfogatváltozás alapján is számítható. A gyakorlati tapasztalatok azonban azt igazolják, hogy a térfogatváltozásméréseket igen sok hiba terheli, és ezért a sugárirányú alakváltozás meghatározására nem elég pontos. A térfogatváltozásmérés alapján számított átmérők pontossága még igen egyszerű, az átmérőváltozást közvetlenül mérő eszközök pontosságát sem éri el.

A sugárirányú és tengelyirányú alakváltozásmérés lehetőséget és elegendő pontosságot biztosít a térfogatváltozás közbeni folyamat — tömörödés és lazulás — leírására.

Az elmondottak igazolására magát a térfogatváltozást és átmérőváltozást kell részletesen megvizsgálni. A jelenségek összefüggéseinek leírásához legyen adott a 4. ábrán vázolt talajminta. A jelenség elemzéséhez a vizsgálat a következőket tételezi fel:

a) A talajminta egésze h_0 vagy egy része αh_0 plasztikus folyással megy tönkre.



4. ábra. A térfogatváltozás elemzéséhez felvett modell

b) A talajminta tetszőleges terhelés hatására bekövetkező teljes összenyomódása

$$\Delta h = \Delta h_a + \Delta h_b,$$

de mivel

$$\Delta h_b \ll \Delta h_a,$$

ezért közelítően

$$\Delta h \approx \Delta h_a. \quad (3)$$

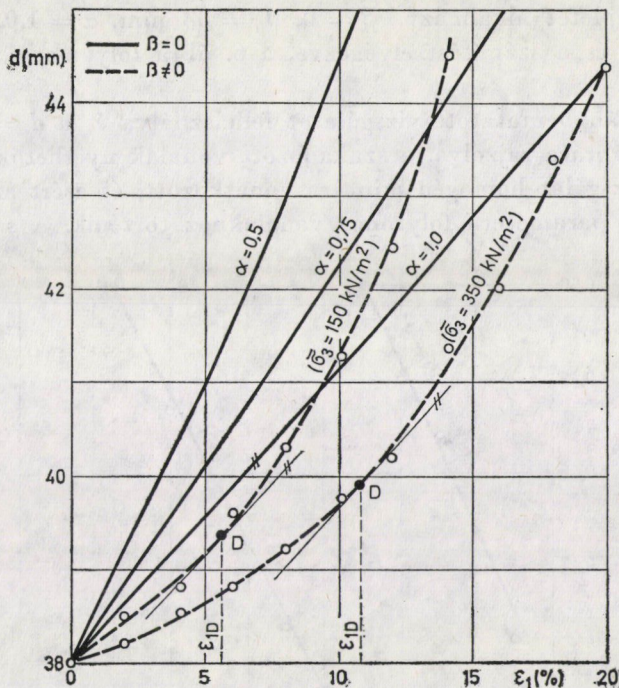
c) Terhelés alatt a talajminta megtartja a tengelyszimmetrikus alakját.

d) A plasztikus folyás térfogatváltozás nélkül következik be, tehát

$$\beta = \frac{V_0 - V}{V_0} = 0, \quad (4)$$

ahol V_0 a kezdeti és V pedig tetszőleges terheléshez tartozó térfogat.

e) A talajminta és a terhelőlap között, illetve az a) és b) anyag határán sugárirányban nincsen elmozdulás.



5. ábra. Tengelyirányú alakváltozás, sugárirányú alakváltozás és térfogatváltozás összefüggése

A 4. ábra jelöléseit, a (3) és (4) képletek feltételeit, valamint a Simpson-féle szabályt alkalmazva, a V_0 és V értékek egyszerűen felírhatók. A V_0 és V értékek a részletek mellőzésével a következő alakba írhatók:

$$V_0 = h_0 d_0^2 \frac{\pi}{4},$$

$$V = h_0(1 - \alpha) d_0^2 \frac{\pi}{4} + h_0(\alpha - \varepsilon_1) \frac{\pi}{12} (d_0^2 + 2d^2), \quad (5)$$

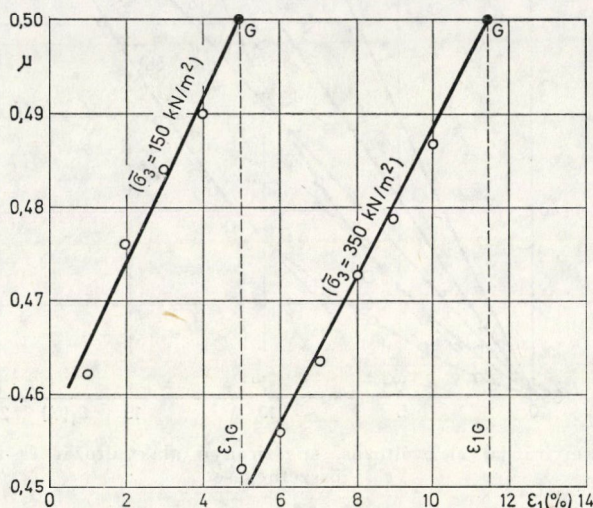
$$V = V_0(1 - \alpha) + \frac{1}{3}(\alpha - \varepsilon_1) \left(V_0 + h_0 d^2 \frac{\pi}{2} \right).$$

Az (5) képleteket felhasználva, a (4) képletbe behelyettesítve és azt rendezve, a következő képlet írható:

$$d = d_0 \sqrt{\frac{\alpha + 0,5 \cdot \varepsilon_1}{\alpha - \varepsilon_1}}. \quad (6)$$

A (6) képletet alkalmazva $\beta = 0$, $d_0 = 38$ mm, $\alpha = 1,0$, $\alpha = 0,75$ és $\alpha = 0,5$ esetre és a számítást elvégezve, a 6. ábra folyamatos vonalai szerkeszthetők.

A 3. ábrán bemutatott vizsgálatot felhasználva és a $d = f(\varepsilon_{1B})$ összefüggést az 5. ábrára rajzolva, a szakadozott vonalak nyerhetők. A 3. ábrán bemutatott vizsgálat homogén mintára vonatkozott, és ezért az összehasonlítás az $\alpha = 1$ paraméterű folytonos vonalakhoz történik. A számítás ered-



6. ábra. A Poisson-tényező (μ), tengelyirányú alakváltozás és főfeszültségek ($\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$) összefüggése

ményei (folyamatos vonalak) és a tényleges mérés eredményei (szakadozott vonalak) alapján a tömörödési folyamat szakaszai — a tömörödés és lazulás — megkaphatók. A tömörödésnek ott van szélső értéke, ahol az $\alpha = 1$ vonallal párhuzamos vonal érinti a szakadozott vonalat, vagyis a D pontban. Az 5. ábrából megállapítható, hogy csak a D pontban igaz az, hogy $\beta = 0$. Igen fontos eredmény, hogy a B és D pontokhoz tartozó tengelyirányú alakváltozás nem egyenlő egymással, hanem

$$\varepsilon_{1B} > \varepsilon_{1D}; \quad (7)$$

(3. és 5. ábrák). A (7) egyenlőtlenség azt jelenti, hogy már ε_{1D} értéknél megindult a „progresszív folyás” és az alakváltozási munka gyakorlatilag ki-merült. Az elmondottakat CHEN [5] és BALLA [1–2] vizsgálatai alapján gyakorlatilag is igazolni lehet.

CHEN [5] az alakváltozási munkával arányos értéket a következő egyenlettel adja meg:

$$E_D = \sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3 = c \cot \varphi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3). \quad (8)$$

A kísérleti eredmények további értékeléséhez a következő feltételezéseket kell tenni:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3, \quad (9)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

A (9) alatti feltételezések figyelembevételével, a (8) képlet felhasználásával és annak rendezésével $\cot \varphi$ -re a következő képlet írható:

$$y = \cot \varphi = \frac{1}{c} \frac{\sigma_1 + 2\mu\sigma_3}{1 + 2\mu}. \quad (10)$$

A (9) egyenletből a Poisson-tényező (μ) szélső értéke a

$$\frac{dy}{d\mu} = 0 \quad (11)$$

differenciálhányados meghatározásával számítható. A differenciálszámítás elvégzése után természetesen $\mu = 0,5$ értékre adódik. A továbbiakban felhasználva BALLA [1–2] vizsgálatait, a mérésekből meghatározható a Poisson-tényező (μ) és a tengelyirányú alakváltozás (ε_1) összefüggése, amit a 6. ábra szemléltet. Az 5. és 6. ábrák összevetéséből megállapítható, hogy a D és G pontokhoz tartozó tengelyirányú alakváltozások gyakorlatilag azonosak ($\varepsilon_{1D} \simeq \varepsilon_{1G}$).

Az előzőekben bemutatott szélsőérték a (8) képlet és az $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ feltétel alapján a mérésekkel is igazolható. A (8) képletet rendezve $\cot \varphi$ -re a következő képlet írható:

$$\cot \varphi = \frac{1}{c} \frac{\sigma_1 \varepsilon_1 + 2\sigma_3 \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3}. \quad (12)$$

A (12) képletben a kohézió (c) a vizsgálatok szerint konstans volt, ezért elegendő az

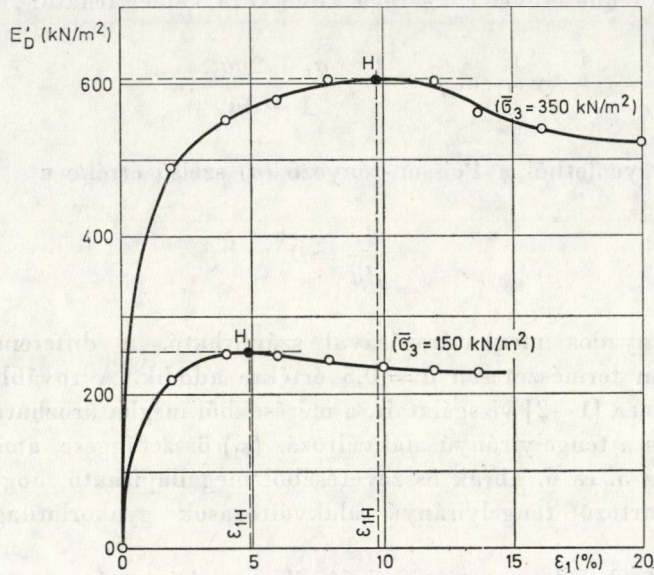
$$E'_D = \frac{\sigma_1 \varepsilon_1 + 2\sigma_3 \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3} \quad (13)$$

érték változását vizsgálni. A számítások eredményeit a 7. ábra mutatja. A 3., 5., 6., 7. ábrák összevetéséből megállapítható, hogy

$$\varepsilon_{1A} > \varepsilon_{1B} > (\varepsilon_{1D} \simeq \varepsilon_{1G} \simeq \varepsilon_{1H}). \quad (14)$$

Az elvégzett mérésekből és számításokból megállapítható, hogy a $\bar{p} = 0,5 (\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)$ és $\bar{q} = 0,5 (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$ koordinátarendszerben a feszültségi pálya-

görbén levő pontok (B és D), amelyekhez a $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{\max}$ és $0,5(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)_{\max}$ érték tartozik, nem két külön törési feltételt jelent, hanem a „progresszív folyási szakaszt” adja meg. A 4. ábrán bemutatott kísérleti eredményt a \bar{p} és \bar{q} koordinátarendszerben a 8. ábra mutatja. A 8. ábrán a $[B]$ nyírószilárdsági egyenes a $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3 + \Delta\bar{\sigma}_{1B}$ főfeszültség szélső értéke, a $[D]$ nyírószilárdsági egyenes pedig az $\varepsilon_{1D} \approx \varepsilon_{1G} \approx \varepsilon_{1H}$ tengelyirányú alakváltozáshoz tartozó főfeszültség érték alapján lett meghatározva. Az utóbbi feltétel helyessége



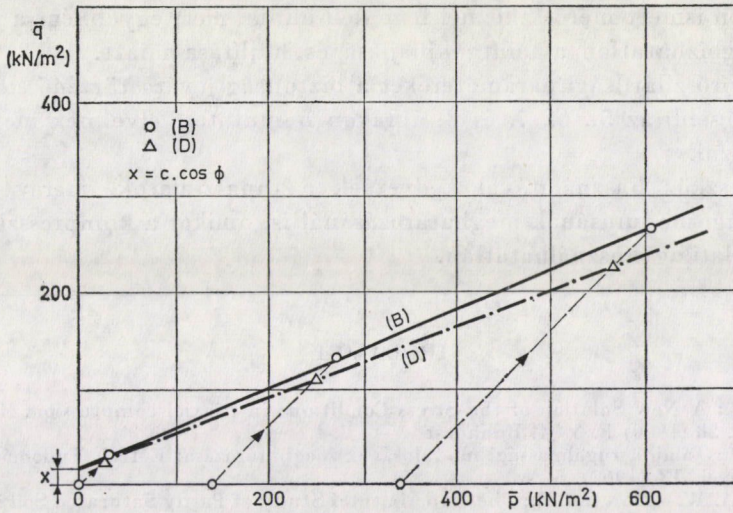
7. ábra. Tengelyirányú alakváltozás és E_j érték összefüggése

egyszerűen igazolható, hiszen a pórusvíznyomásméréssel végrehajtott kísérletnél $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3$ ott lesz maximum, ahol az anyag tömörödése éppen befejeződött, illetve ahol a lazulás éppen megkezdődött, mert ebben a pillanatban a semleges feszültség hirtelen csökkenni kezd.

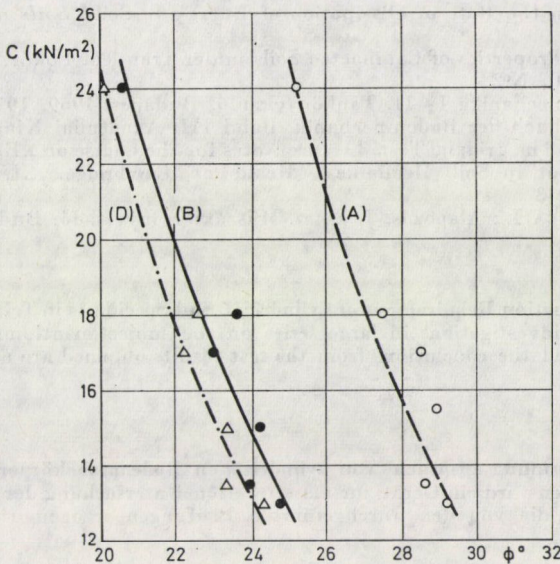
A tömörített mintáknak a 2. ábrán bemutatott összetételétől függően természetesen változott a nyírószilárdság értéke. A leírt feltételek alapján elvégzett értékelést összefoglalóan a 9. ábra mutatja, ahol a nyírószilárdsági paraméterekben bekövetkezett változás jól nyomon követhető.

5. Összefoglalás

Az eredményeket összegezve megállapítható, hogy az alakváltozásmérő eszköz egyszerűsége ellenére is jól használható eredményeket szolgáltat a triaxiális kísérletek kiértékeléséhez.



8. ábra. A nyírószilárdsági paraméterek változása [B] és [D] nyírószilárdsági egyenesek közötti része a „progresszív folyás” tartományát jelenti



9. ábra. Fázisos összetétel, sugárirányú alakváltozás és a törési határ felvétel szerepe a nyírószilárdság értékében

A 2. pontban leírt és pontosabb mérést biztosító elektromos nyúlás-mérők alkalmazásával a talajminta térfogatváltozása is pontosabban követhető, mint a térfogatváltozásmérőkkel. Az ismertetett mérőeszköz mérési pontossága és megbízhatósága annál jobb, minél jobban megtartja tengelyszimmetrikus alakját a talajminta a kísérlet alatt. Ennek a feltételnek azon-

ban minden ismert mérőeszköznél fenn kell állnia, mert egyébként a vizsgálat egésze megbízhatatlan a minta kihajlása és hajlítása miatt.

A nyírószilárdsági paramétereket a biztonság javára történő elhanyagolással helyesebb az 5., 6., 7. és 8. ábrákon bemutatott elveknek megfelelően meghatározni.

Az eszköz használatával kedvezőek a tapasztalatok, merev agyagok rugalmassági modulusának meghatározásánál is, amikor a kompressziós kísérlet gyakorlatilag használhatatlan.

IRODALOM

1. BALLA Á.: A New Solution of the Stress Conditions in triaxial compression. *Acta Techn. Hung.* 28 (1960) F. 3–4. Budapest
2. BALLA Á.: Talajok rugalmassági modulusának meghatározása; ÉMKE Tudományos Közleményei, 13 (1967), 5. sz.
3. BISHOP, A. W.—DONALD, B.: The Experimental Study of Partly Saturated Soil in Triaxial Apparatus. Paris; *Proc. 5th. International Conf. Soil Mech. and Foundation Engg.* 1 (1961)
4. BISHOP, A. W.—HENKEL, D. J.: The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Tests. Edward Arnold, Ltd, London 1957
5. CHEN, W. F.: On the Rate of Dissipation of Energy in Soils. *Soils and Foundations*, 8 (1968), N°6
6. KAWAKAMI, F.: Properties of Compacted Soils under Transient Loads. *Soils and Foundations*, 1 (1960), N°2
7. KÉZDI Á.: Talajmechanika I—II. Tankönyvkiadó, Budapest 1969, 1970
8. KÉZDI Á.: Handbuch der Bodenmechanik, Band III. Akadémiai Kiadó, Budapest 1973
9. PARRY, R. H. G.: The Triaxial Test. Lecture Notes for the Course on „Research Techniques and Equipment in Soil Mechanics” Heald at Cambridge. *CUED/C-SOILS/LN3*, Cambridge 1973
10. SZÉCHY K.—VARGA L.: Alapozás. I. kötet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1971

Radial Deformation Requirement of Cylindrical Soil Specimens in Triaxial Cells. — A device for performing investigations in large series on the subject mentioned in the title of the paper is described and the conclusions from the test results obtained are estimated with that device.

Radiale Verformungsanspruch von zylindrischen Bodenprobekörpern in dreiachsigen Zellen. — Beschrieben wird ein Gerät zur massenweisen Untersuchung der im Titel erwähnten Erscheinungen, und die von den durchgeführten Prüfungen gezogenen Schlußfolgerungen werden ausgewertet.