

JAROSLAV FEDA, a műszaki tudományok kandidátusa

ADALÉKOK A TALAJOK NYÍRÓSZILÁRDSÁGÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ*

A Csehszlovák Tudományos Akadémia Elméleti és Alkalmazott Mechanikai Intézetében folyó talaj nyírószilárdsági kutatás célja bizonyos állékony-sági kérdések megoldása. Ilyenek elsősorban az alapozási teherbírési kérdések, továbbá a rézsük állékony-sága, valamint — a jövőben — a támfalakra ható földnyomás is. Feltételezhető, hogy egy ilyesféle kutatás döntően befolyásolhatja a szokásos matematikai megoldásokat és tökéletesítésükhöz jobb közelítéseket tesz lehetővé — vagyis jobb egyezést a valósággal.

Az ilyen — többé-kevésbé gyakorlati — cél megkívánja, hogy alapvető kutatásokat végezzünk a talajoknak — mint többfázisú rendszereknek — rheológiai tulajdonságai terén, vizsgálván szerkezetüket és ennek változását a nyírási folyamat alatt.

Először — az 1957. évben kezdődően — a legegyszerűbb rendszereket, a homokokat vizsgáltuk, majd fokozatosan rátértünk a kötött talajok vizsgálatára is, míg a legutóbbi években már ez utóbbiakra összpontosult a kutatás.

A kísérleteket triaxiális készülékkel, nyíródobozzal és Hvorslev rendszerű torziós nyírókészülékkel végeztük, kétféle eljárás szerint: „alakváltozási” módszerrel (amikor a nyírási alakváltozás üteme állandó) és „feszültségi” módszerrel (amikor a terhelést lépcsőkben változtatjuk).

Homokok

Gyakorlatilag valamennyi kísérleti homok száraz volt, telített mintákat csak összehasonlítás végett vizsgáltunk.

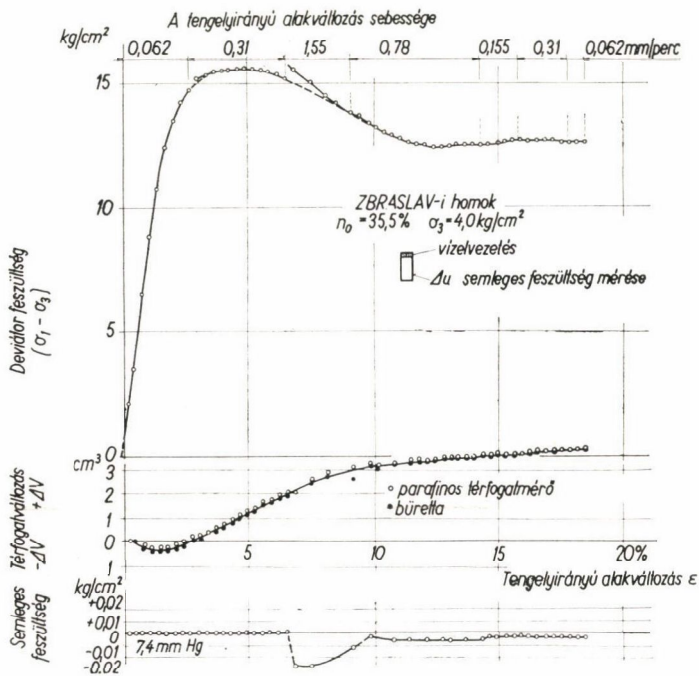
A kísérletek előtt különböző laboratóriumi problémákat kellett megoldani, így pl. a minták kezdeti hézagterefogatának pontos meghatározását, nagyon laza anyagok beépítését, stb. A vizsgálatok közelítő terjedelmének eldöntését is itt említhetjük meg.

Az 1. sz. ábra olyan — tömör, telített homokkal végzett — kísérlet eredményeit szemlélteti, amelynek során változtattuk a tengelyirányú alakváltozás sebességét. A minta magassága 7,5 cm, átmérője 3,8 cm volt.

Látható, hogy az 1,55 mm/perc sebesség mellett negatív pórúsvíznyomás keletkezett. A minta felső véglapján szűrőréteg volt, a pórúsvíznyomást az alján mértük.

* Dipl. Ing. Jaroslav Feda a műsz. tud. kandidátusa, a Csehszlovák Tudományos Akadémia Prágai Elméleti és Alkalmazott Mechanikai Intézete kiküldöttjének előadása a Magyar Tudományos Akadémián Budapesten, 1964. október 16-án. A cikk eredeti címe tulajdonképpen: „Shear Strength of Sands”; mivel azonban — mint látni fogjuk — nemcsak homokokról lesz szó, helyesebbnek tartottam a fenti, általánosabb érvényű fordítást. (A ford. megjegyzése.)

Az ilymódon elrendezett minta tehát egyenlőtlen semleges feszültségeket mutatott, és emiatt a megengedhető alakváltozási sebességet 0,31 mm/perc-re csökkentettük. Száraz homokban valószínűleg még kisebb a belső nyomás, hiszen a vízhez viszonyítva a légnemű komponens sokkal összenyomhatóbb. Ilyen kísérletekhez azt irányoztuk elő, hogy a törés kb. 1 óra alatt következék be.



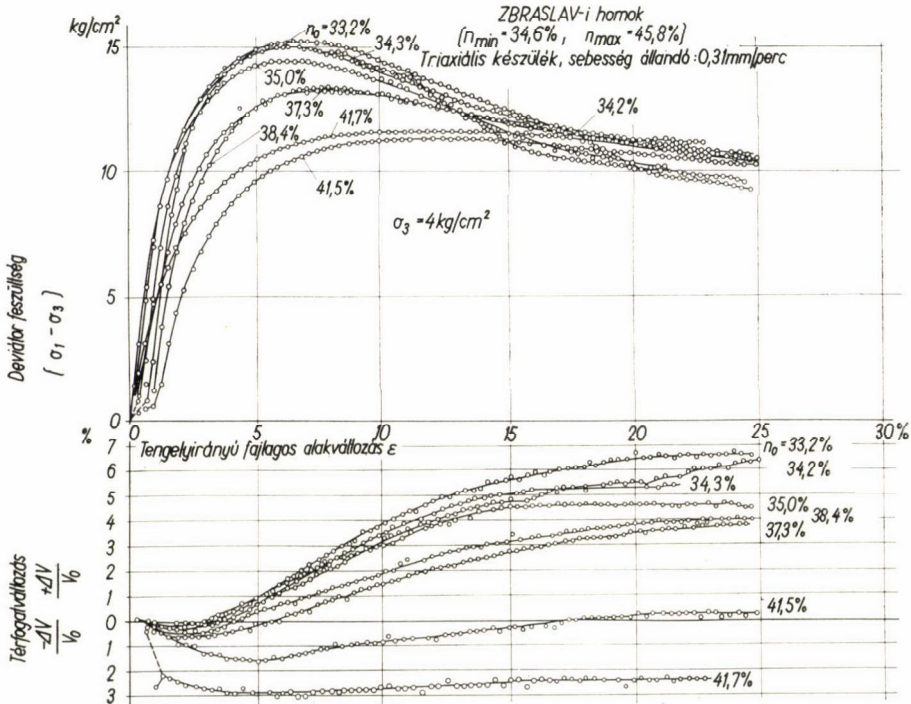
1. ábra. Az alakváltozás sebességének hatása a mért deviátorfeszültségekre

Az alakváltozás sebességének a száraz homok szilárdságára gyakorolt hatását részletesen vizsgáltuk $8,4 \times 8,4$ cm méretű nyíródobozban. Azt az eredményt kaptuk, hogy a 0,48 és 120 mm/perc sebességi tartományon belül gyakorlatilag állandó maradt a nyírószilárdság (pontosabban a természetes szórás határain belül maradt) és csak a minta kezdeti hézagterefogatától függött.

A száraz homok térfogatváltozásait az ún. parafinos térfogatmérővel mértük. Ennek megbízhatóságát ellenőrizendő, egyidejűleg bürettával is mértük a telített minták térfogatváltozását (mérték a mintából ki vagy beáramló víz mennyiségét). Az 1. sz. ábra mutatja, hogy igen jó egyezést értünk el.

A 2. sz. ábra Zbraslav-i homok nyírószilárdsági vizsgálatának tipikus eredményeit mutatja be. E homok szemcseátmérője túlnyomóan a 0,2–0,6 mm tartományban van. A kísérleteket triaxiális készülékben végezték, a tengelyirányú alakváltozás sebessége 0,31 mm/perc volt, a hidrosztatikus nyomás pedig $\delta_3 = 4 \text{ kg/cm}^2$. Jól szemléltető az a természetes eredmény, hogy a nyírószilárdság, valamint az alakváltozási görbék alakja a minta kezdeti hézagterefogatától függ. Egy bizonyos, eléggé nagy alakváltozás ($\epsilon \cong 20\%$) után állandó értéket mutatott a szilárdság — az ún. „végső szilárdság” — és ebben már úgyszólván nem mutatkozott különbség az eredetileg laza, illetve tömör

minták viselkedése között. Ez azt bizonyítja, hogy a nyírási folyamat következtében az eredeti szerkezet teljesen megváltozott. Általában hasonló végkövetkeztetés volt levonható kötött talajok esetében is. Ismeretes többek között, hogy a tixotropikus szilárdságnövekedési együttható nagymértékben függ a minta tengelyirányú alakváltozásától (például egyirányú nyomókísérlés esetében), amely mellett meghatározták. A legutóbbi időben *A. W. Skempton* (1964) állapította meg azt a tényt, hogy az előterhelt és a normálisan konsolidált agyagok „végső” szilárdsága gyakorlatilag azonos nagyságú.

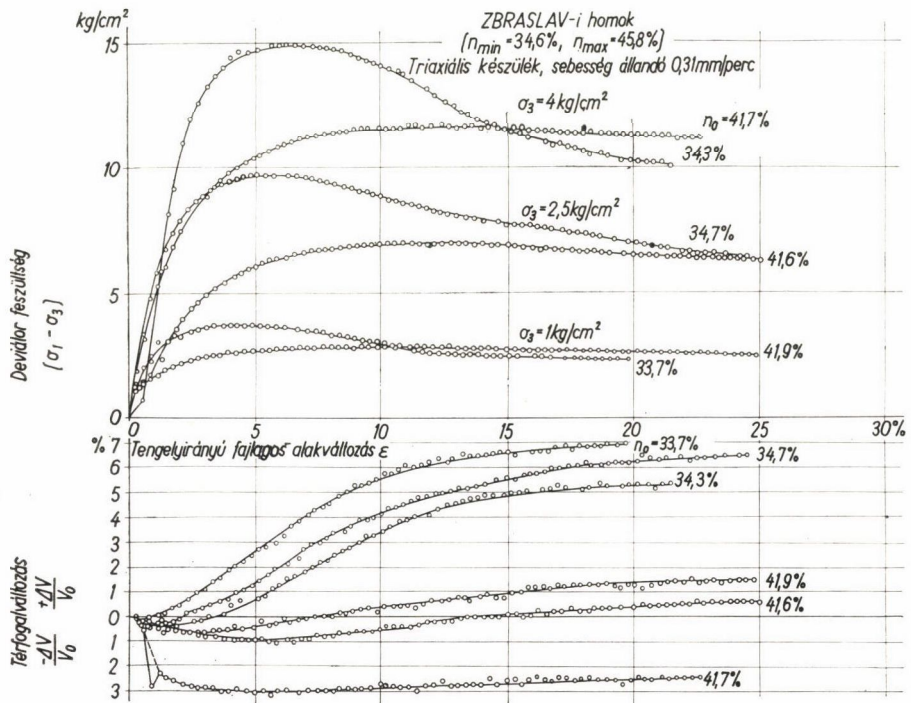


2. ábra. A tengelyirányú alakváltozások, illetve a térfogatváltozások és a feszültségek közötti összefüggést ábrázoló görbék, különböző hézagterfogatú zbraslavi homok esetére: $\sigma_3 = 4 \text{ kg/cm}^2$

Ugyancsak jellemző a nyírókísérlésre a kísérlet alatt bekövetkezett térfogatváltozás. Az eredetileg tömör minták fellazultak — ún. pozitív lazulás jelentkezett — míg az eredetileg laza minták betömörödtek, vagyis ún. negatív lazulás következett be. A térfogatváltozás üteme a törés állapotában a legnagyobb, míg azt követően, a törés végső helyzetében elhanyagolhatóan csekély, másszóval a minta hézagterfogatára már állandósult.

A 3. sz. ábra a kezdeti hézagterfogyozó, illetve a hidrosztatikus nyomás hatását szemlélteti $\sigma_3 = 4; 2,5$ és 1 kg/cm^2 esetekben.

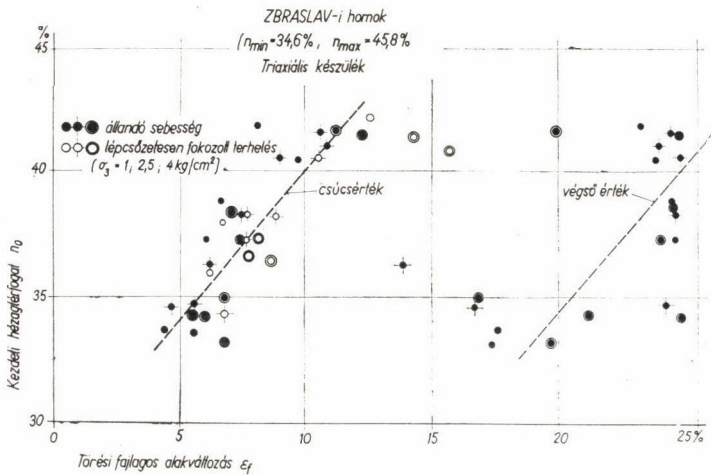
Fontos jellemzője a nyírási folyamatnak a töréshez tartozó alakváltozás: ϵ_f . A 4. sz. ábra jól szemlélteti, hogy az oldalnyomás — csakúgy mint a terhelés módja — másodlagos hatású a minta kezdeti hézagterfogatához képest. A tömör homok merev szerkezete lényegesen lecsökkenti a nyírószilárdság



3. ábra. Szélsőséges hézagterefogatú zbraslavi homok alakváltozási görbéi különböző hidrosztatikus nyomásoknál

teljes mozgósításához szükséges alakváltozás mértékét. E tekintetben a tömör homokhoz hasonlóan viselkednek egyes koagulált szerkezetű agyagok.

A nyírókísérletek eredményeit jól szemléltetik az $\eta_0, \sigma_1 - \sigma_3$ koordináta-rendszerben (lásd 5. sz. ábra) a $\sigma_3' = \text{konst.}$ vonalak, amelyek az $\eta_0, \sigma_1 - \sigma_3$,



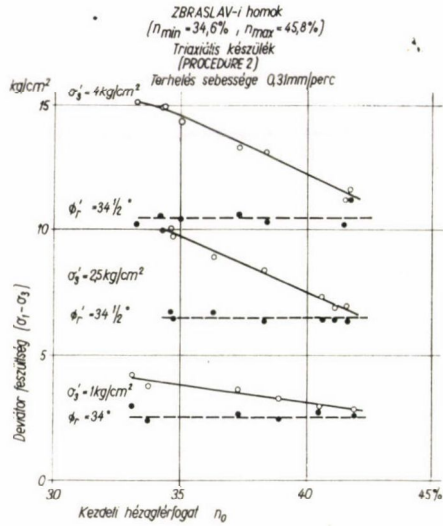
4. ábra. Összefüggés a zbraslavi homok kezdeti hézagterefogata és a töréshez tartozó tengelyirányú alakváltozásai között

σ_3 háromtengelyű koordináta-rendszerben megrajzolható „törési felület” síkmetszeteinek tekinthetők.

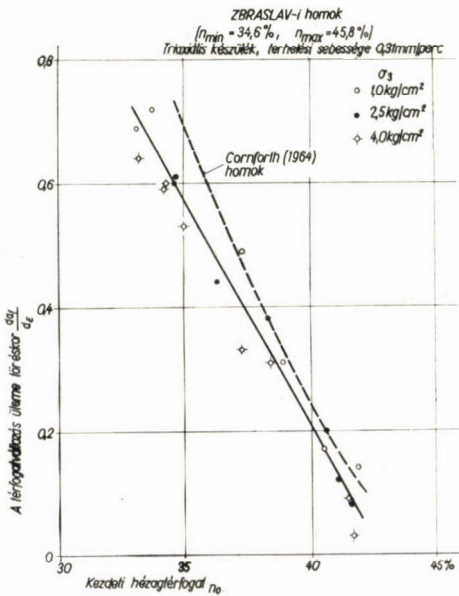
Az 5. ábra alapján nyilvánvaló, hogy a Zbraslav-i homok végső szilárd-sága ($\Phi = 34^\circ$) nem függ a minta kezdeti hézagterefogatától. Ezért feltételezhetjük, hogy ez az érték a szemcsék közötti tényleges surlódást képviseli.

A 6. sz. ábra azt mutatja be, hogy a töréskor — amikor tehát $\sigma_1 = \sigma_3$ a legnagyobb — észlelhető terfogatváltozás üteme csak másodlagosan függ σ_3 -tól. Mindenekelőtt a minta kezdeti szerkezete lényeges, amelyet a kezdeti hézagterefogat — n_0 — jellemez. Az összefüggés közelítően lineáris. A kísérletileg vizsgált esetben nem találtunk lényeges eltérést ahhoz a hasonló összefüggéshez képest, amit a közelmúltban D. H. Cornforth ismertetett.

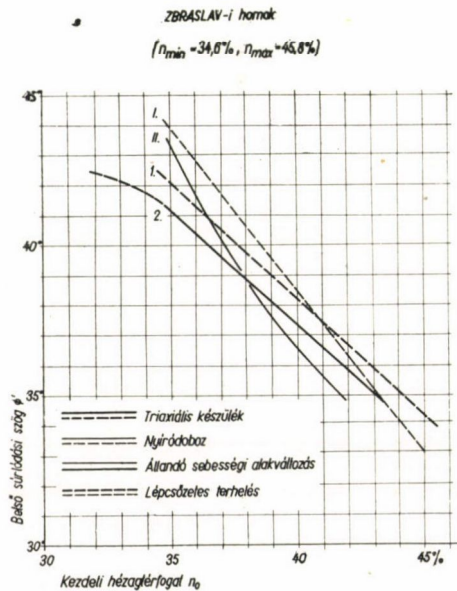
A 7. sz. ábrán a Zbraslav-i homokkal végzett nyírókísérletek eredményei láthatók, amelyeket különböző módon (feszültségi, ill. alakváltozási módszerrel), illetve különböző eszközökkel — triaxiális készülékkel, illetve nyíródobozzal — határoztunk meg. A surlódási szög értékében mutatkozó eltérés



5. ábra. Különböző hézagterefogatú zbraslavi homok — a deviátor feszültségek csúcs- és végső értékei



6. ábra. Zbraslavi homok. Összefüggés a kezdeti hézagterefogat és a terfogatváltozás üteme között



7. ábra. Zbraslavi homok. A kísérleti eszköznek és a kísérlet végrehajtási módjának hatása a belső surlódási szög mért értékére

eléri a 3° -ot, vagyis nagyobb, mint az egyes vonalakhoz tartozó szórás — mint-hogy a triaxiális kísérletek középhibája kb. $0,75^\circ$, a dobozos nyírókísérleteké pedig $1,25^\circ$. Mindamellet a belső surlódás végső értéke $33-34^\circ$ között volt, függetlenül a mérés módjától, illetve a mérőeszköztől.

A belső surlódási szög értékében mért különbségeket a nyírás során fel-lépő térfogatváltozásokkal kapcsolatos munkát figyelembe vevő korrekciók elméletének alapján tárgyalták, amit már 15 évvel ezelőtt javasolt *D. W. Taylor* és később *W. Bishop A.* fejlesztett tovább. Hasonló jellegű megoldást közölt *Kézdi Á.* is (1963). Bár bizonyos ellenvetések tehetők az ilyen korrek-ciók módszerekkel szemben, legalábbis a vizsgált kérdés első, közelítő megoldá-saként jól használhatók. Ezt a következtetést támasztják alá a Zbraslav-i ho-mokkal végzett dobozos nyírókísérletek is, ahol Φ' értékét jó eredménnyel kor-rigáltuk a 35° -os értékre, ami meg is felelt a végső állapotban mért Φ' értékeknek.

Az említett elmélet alkalmazása azon a feltevésen alapul, hogy a nyíró-szilárdság két részből tevődik össze: az első az egyes szemcsék egymás közötti surlódásából adódik, a másik rész a talaj szerkezetéből, és ez utóbbi okozza a minta térfogatváltozását a kísérlet alatt.

Már említettük, hogy az első tényező a végső szilárdságban jelentkezik. Az előzőek során ismertetett megfigyelések általános érvényét támasztja alá az *A. W. Skempton* által közölt (1964) összefüggés is, amelyet a 8. sz. ábrán elevenítettünk fel. Ugyanott feltüntettük — összehasonlítás végett — a Zbras-lav-i homok végső szilárdságának megfelelő Φ' belső surlódási szög értékét is.

Ha a kohézió $C' = 0$, akkor az alakváltozási munkából származó korrek-ció közvetlenül alkalmazható a (valódi) belső surlódási szögre. Ha csak a minta törésének pillanatát vizsgáljuk, akkor nyíródobozra, illetve korrigált nyírószilárdságra érvényes a szokásos összefüggés:

$$\tau_i = \sigma \left(\operatorname{tg} \Phi' - \frac{dh}{dt} \right)$$

ahonnan

a belső surlódási szög korrekciója

$$\operatorname{tg} \Phi'_k = \frac{da_f}{d\gamma_f} \quad (1)$$

ahol

$$a_f = \frac{\Delta V_f}{V_0} = \frac{h_f - h}{h}$$

a minta fajlagos alakváltozását jelenti, γ_f pedig a minta szögtorzulását jelképezi.

Triaxiális készülékre hasonló összefüggés vezethető le:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_i = (\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma'_3 \left(\frac{da}{d\varepsilon} \right)_f$$

vagy

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_i = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \left(\sin \Phi' - \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \cdot \frac{d d_f}{d \varepsilon_f} \right)$$

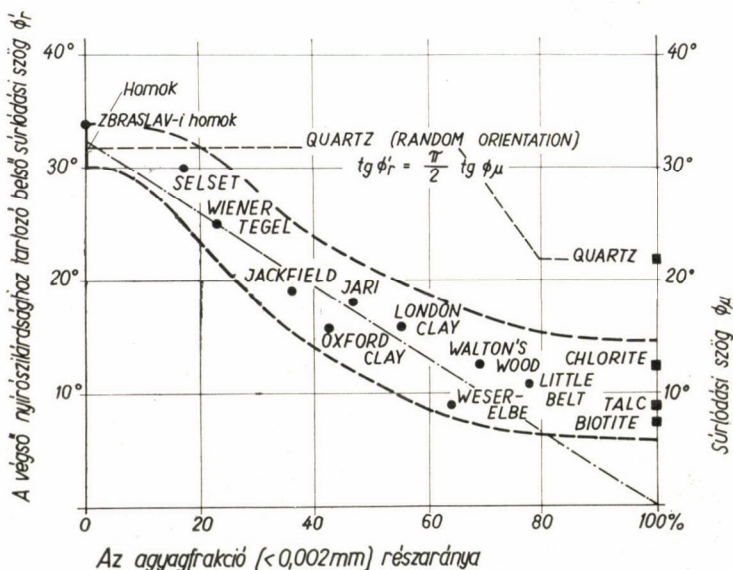
Ez utóbbiból:

$$\sin \Phi'_k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}} \cdot \frac{d a_f}{d \varepsilon_f} = \frac{1}{1 + \operatorname{cotg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi'}{2} \right)} \cdot \frac{d a_f}{d \varepsilon_f} \quad (2)$$

Ez az összefüggés hasonló ahhoz az egyenlethez, amelyet Kézdi Á. (1963) vezetett le. Ha $\Phi'_k \leq 10^\circ$ — a megfigyelésekkel összhangban — közelítően: $\sin \Phi'_k = \text{tg } \Phi'_k$. Ha a nyíródobozban és a triaxiális készülékben mért belső surlódási szögeket egyenlővé akarjuk tenni, akkor a Φ'_k -re vonatkozó (1) és (2) sz. összefüggést egybevethetjük, vagyis:

$$\frac{d a_f^B}{d \gamma_f} = \frac{1}{1 + \cot g \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi'}{2} \right)} \cdot \frac{d a_f^T}{d \varepsilon_f} \quad (3)$$

ahol B index jelképezi a nyíródobozt és T index a triaxiális készüléket. A zbraslavi homokra vonatkozó átlagos érték $\Phi = 38^\circ$.



8. ábra. A végső szilárdságnak megfelelő belső surlódási szög és az agyagtartalom közötti összefüggés — A W. Skempton (1964) szerint

A kísérleti eredmények szerint $\gamma_f = 1,25 \varepsilon_f$ és a 6, ill. 9. sz. ábrának megfelelően

$$\frac{d a_f}{d \varepsilon_f} = K_0 \cdot a_f.$$

Így

$$\frac{K_0 \cdot a_f^B}{1,25} = \frac{1}{5,2} \cdot K_0 \cdot a_f^T$$

és

$$a_f^B = 0,25 \cdot a_f^T$$

vagy még általánosabban, ha

$$a_f^B \stackrel{\geq}{<} K \cdot a_f^T \quad (4)$$

(ahol $0 < K < 1$)

akkor ugyancsak

$$\Phi^B \cong \Phi^T$$

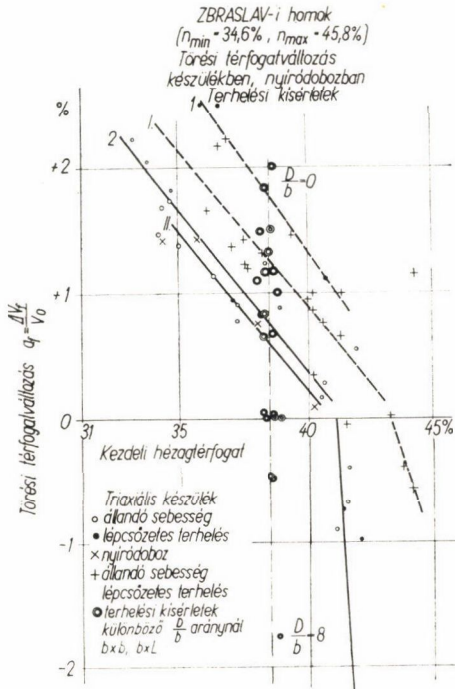
A 9. sz. ábrán mutatjuk be a tapasztalati összefüggést a kezdeti hézagterfogat: n_0 és a törés pillanatában mért

fajlagos térfogatváltozás a_f között azon kísérletek esetében, amelyeket a 7. sz. ábrán mutattunk be. A kísérleti eredmények tanulmányozásából nyilvánvalóvá válik, hogy ugyanolyan terhelési folyamat, különböző kísérleti eszköz és tömör minták esetében $a_f^B > a_f^T$ és így $\Phi^B > \Phi^T$, amint azt mértük is.

A laza homokokon nyert 1., illetve I. jelű kísérleti eredmények (triaxiális készülékkel, illetve nyíródobozzal) az n_0 tengely alatt fordított összefüggést eredményeznek Φ^B és Φ^T között, ami ismét egyezik a tapasztalattal (vö. 7. sz. ábra). Hasonló következtetést vonhatunk le az azonos készülékkel, különböző módon végrehajtott terhelések esetében nyert eredményekből (pl. az 1. és 2. jelű vonalak).

Arra a megállapításra jutunk tehát, hogy a belső surlódási szög értékében mért különbségek okát a minta térfogatváltozásában kell keresni. Eltérő terhelési módok és különböző kísérleti eszközök más és más úton-módon befolyásolják a minta térfogatváltozását, vagyis különböző kinematikai határfeltételeket teremtenek a mintában, amelyek azután a mért nyírószilárdság értékében tükröződnek. A kísérleteknek tehát hangsúlyozottan modell jellegük van.

9. ábra. A töréskor mért térfogatváltozás. Az ábra a kísérleti eszköz és a végrehajtási mód hatását szemlélteti



A homokok nyírószilárdságából levont következtetések között tegyük néhány megjegyzést a homokok „kohéziójáról” is. Amint a 10. sz. ábrán látható, a triaxiális kísérletekkel (vö. az 1. sz. vonallal a 7. ábrán) tömör homokon $0,2 \text{ kp/cm}^2$ -t elérő kohéziót mértünk, míg laza homok esetében $C' = 0$ volt. E kísérletek előkészítése közben a mintákat rétegekben és döngölve építettük be, hogy a kívánt tömörséget biztosítsuk. A további kutatások kimutatták, hogy a Coulomb egyenes a $\tau = f(\sigma)$ koordináta-rendszer origójának közelében görbe, és így az egyenes és a τ tengely metszéspontja (lásd a 11. ábrát) lényegesen alacsonyabbra adódik, mint ahogyan a 10. sz. ábra alapján gondolnánk. A homokok „kohézióját” (jobban mondva a nyírószilárdság lineáris összetevőjét) általában a homokszemcsék belső kapcsolódásának következményének

gondolják. További triaxiális kísérletsorozatok — amikor a mintákat vibrálással tömörítették — $C' = 0$ eredményre vezettek (lásd a 7. sz. ábra 2. sz. vonalát). Úgy tűnik tehát, hogy a „kohéziót” a talajminta „előélete” teremti meg, másszóval, hogy a szemcsék egymáshozfeszüléséből visszamaradt erők okozzák, amelyeket előzőleg a minta dögölése váltott ki. Ha a kísérleteket kis hidrosztatikus nyomásokkal ($\sigma_3 < 0,5$ kp/cm²) végezzük, ezek a visszamaradt feszültségek már a terhelés kezdetén elenyésznek, és ez okozza azután a Coulomb egyenes meggörbülését ezen σ_3 értékek tartományában. Ebből a tényből viszont az következik, hogy a modellkísérletekhez előkészítendő modell-talajt oly módon kell beépíteni, hogy ilyen feszültségek ne maradhassanak vissza, különben ezek meghamisítják a kísérlet jellegét.

A négyféle homoktalajjal (szemcseátmérő 0,05-től 5 mm-ig) végzett nyírókísérletekből levonható legfőbb tanulság az volt, hogy a maximális és minimális hézagterefogat által megadott tartomány az a tényező, amelynek hatása a legnagyobb. Ez az érték — amely a vizsgált homokok esetében 6,7% és 12,8% között volt — megfelelően tükröződik már a szemeloszlási görbe meredekségében is és összefügg a szemcsék felületének minőségével (érdesség, legömbölyített alak). Meghatároztunk egy közelítően érvényes összefüggést:

$$\Phi' = \Phi_0 + D_n \cdot C \quad (5)^*$$

ahol Φ_0 a végső nyírószilárdságból meghatározott belső surlódási szög, amely kb. egyenlő a természetes rézsű hajlásával, és

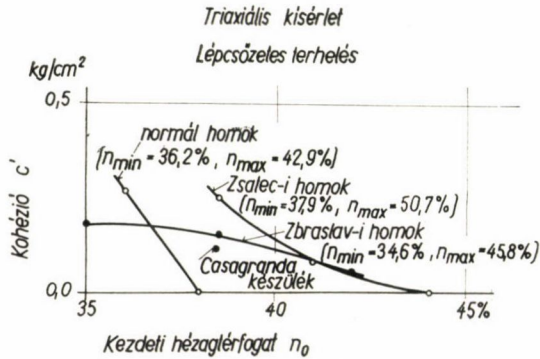
$$D_n = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}$$

Az (5) összefüggés így is írható:

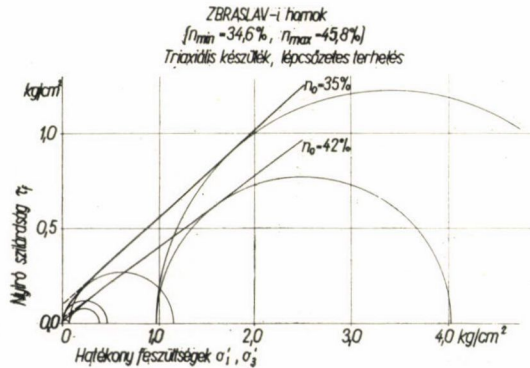
$$\Phi' = \Phi_0 + (n_{\max} - n) \cdot \frac{C}{n_{\max} - n_{\min}}$$

* A Szerző akadémiai előadása után dr. Széchy professzor megemlítette, hogy G. G. Meyerhof hasonló összefüggést alkalmaz, szerinte

$$\Phi' = 28^\circ + 15 D$$



10. ábra. Homok „kohéziója”, mint a kezdeti hézagterefogat függvénye



11. ábra. A Coulomb egyenes alakja a kis hatékony feszültségek tartományában. Zbraslavi homok

A tört értéke az egyes homokok esetében 0,71 és 1,23 között volt (ellenőrizhető, hogy ez az értéktartomány durván egyezik a szórási tartománnyal), és így átlagos értéknek 1-et vehetünk. Ekkor az (5) összefüggés tovább egyszerűsödik:

$$\Phi' = \Phi_0 + (n_{\max} - n) \quad (6)$$

ami általános esetekben kielégítő pontossággal használható a belső surlódási szög meghatározására. A jobb oldal első tagja fejezi ki az egyes szemcsék közötti surlódást, a második pedig a nyírószilárdságnak a talaj szerkezetéből származó összetevője.

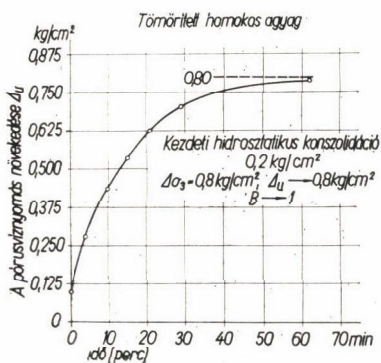
Kötött talajok

A természetes állapotú kötött talajoknak többnyire lényeges jellemzőjük a nagyfokú telítettség (különösen az agyagoké) úgy, hogy nyírószilárdságukat döntően befolyásolja a bennük levő folyadékban uralkodó semleges feszültség. Két fázisú (szemcse + folyadék) rendszerben használhatók a Skempton-féle szemiempirikus A , B , együtthatók, amelyeket

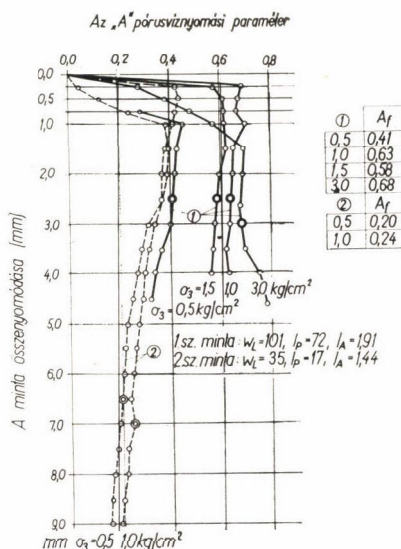
$$\Delta u = B (\Delta \sigma_3 + A [\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3]) \quad (7)$$

összefüggés definiál. Teljes telítettség esetében B is ≈ 1 , sőt még részleges telítettség ($S \doteq 0,95$) esetében is megközelítheti az egységet, ha a triaxiális készülékben alkalmazott hidrosztatikus nyomás eléggé nagy. A B érték ilyen alakulásának jellegzetes esetét mutatja be a 12. sz. ábra.

A B érték, kétfázisú rendszerben, az izotróp feszültségtenzorral kapcsolatos térfogatváltozástól függ, az A érték pedig a deviátor feszültség által létrehozott térfogatváltozástól. A 13. sz. ábra mutat példát az A érték meghatározására, két zavartalan mintán, amelyek Most-ból (É—Ny Csehország) származó, kismértékben túlkonzolidált, repedezett neogén agyagok voltak. Az A érték változott a terhelés során és függött az oldalnyomástól is. A teljes terhelési folyamat, ill. az ezáltal létrehozott térfogatváltozások hívebb ismeretete végett szükséges, hogy az egész terhelési ciklust — amelyet végered-



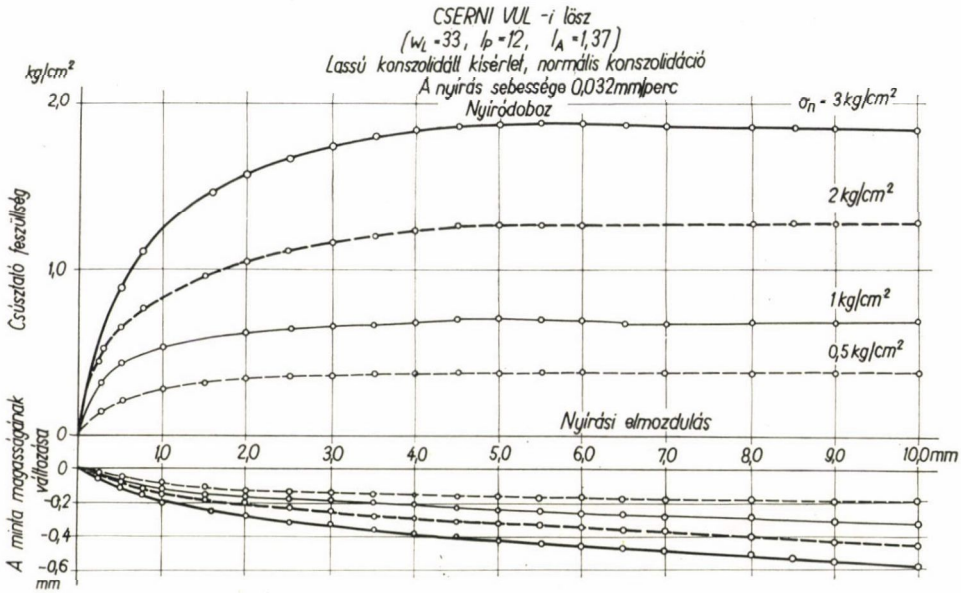
12. ábra. A semleges feszültségek növekedése a konszolidációs időtől függően



13. ábra. Az A pórusvíznyomás paraméter értékei zavartalan Most-i agyagban

ményben a feszültségek alakulása reprezentál — megvizsgáljuk. Egy ilyen vizsgálatot fogunk adni a későbbiekben.

A kötött talajok nyírási folyamatának megvilágítására is használhatók a következtetések, amelyeket homokok nyírószilárdságának tanulmányozása alapján nyertünk — elsősorban is azok, amelyek a nyírási folyamat alatti térfogatváltozás hatására vonatkoztak. Így például normálisan konszolidált lösz esetében közelítően $\left(\frac{da}{dy}\right)_f = 0$, amint a 14. és 15. ábrán látható (a nyíródobozzal nyert eredmények). Ebből arra lehet következtetnünk, hogy Φ' (normálisan konszolidált talajokra $C' = 0$) független a meghatározására szolgáló műszertől.



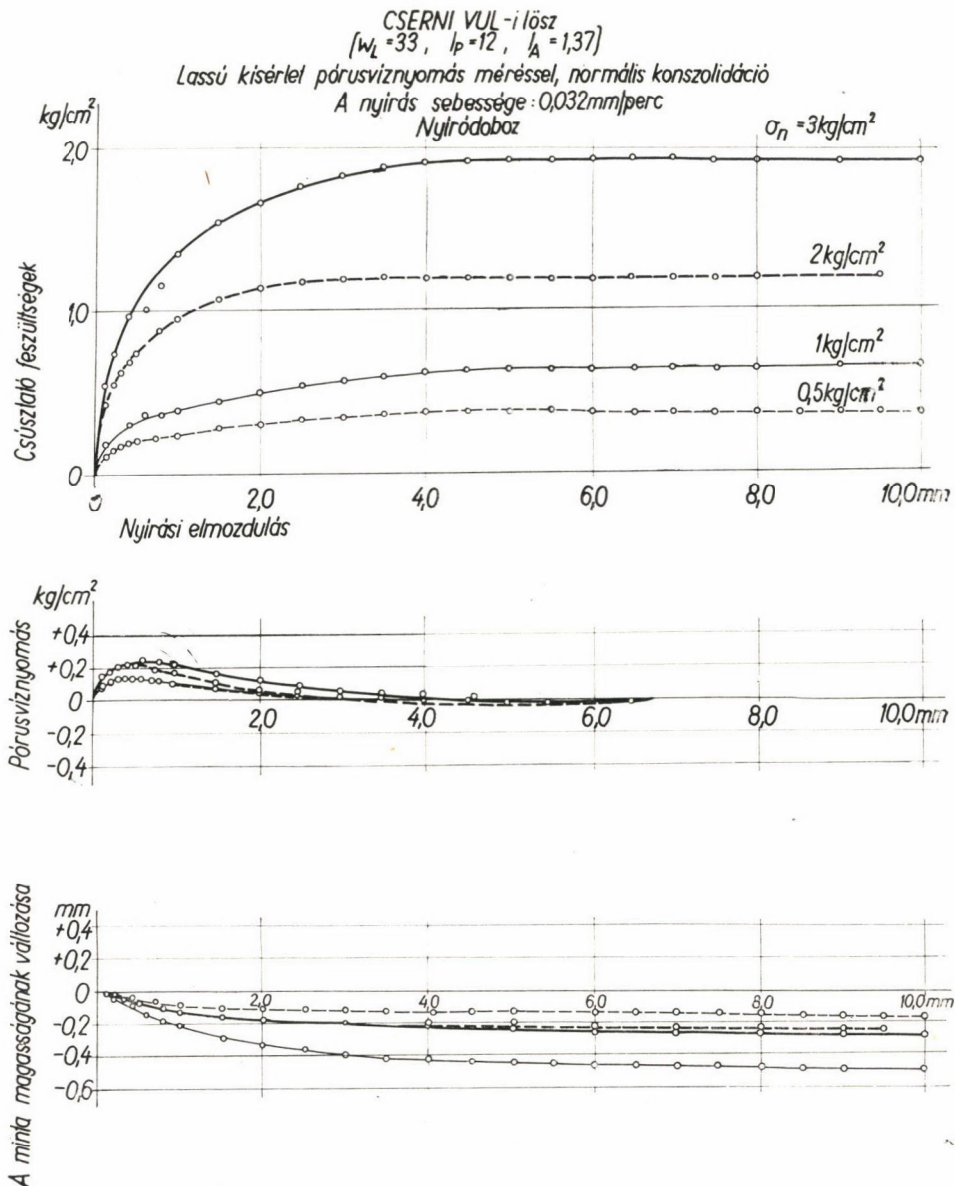
14. ábra. Normálisan konszolidált lösz térfogatváltozása nyíródobozban

A 16. és 17. ábrák is megerősítik ezt a megállapítást. Ezeken láthatjuk, hogy mind a triaxiális készülékben, mind a nyíródobozban ugyanazt a $\Phi = 32^\circ$ -ot mértük, tekintet nélkül arra a körülményre, hogy a triaxiális készülékben zárt volt a rendszer, a nyíródobozban pedig nyílt. Hasonló Φ_u belső surlódási szög eredmények várhatók minden telített mintán zárt rendszerű nyírás esetén (az ilyen minták térfogatváltozása elhanyagolhatóan csekély), még túlkonszolidált állapot esetében is, ha a negatív pórusvíznyomás — amelyet a nyírási folyamat ilyen esetekben létrehoz — nem csökkenti a telítettséget 1 alá. Ha az összehasonlított mintákban a pórusvíznyomás nem túlságosan különböző, akkor a fenti gondolatmenetből következik, hogy a valódi nyírószilárdsági jellemzők is egyformák lesznek.

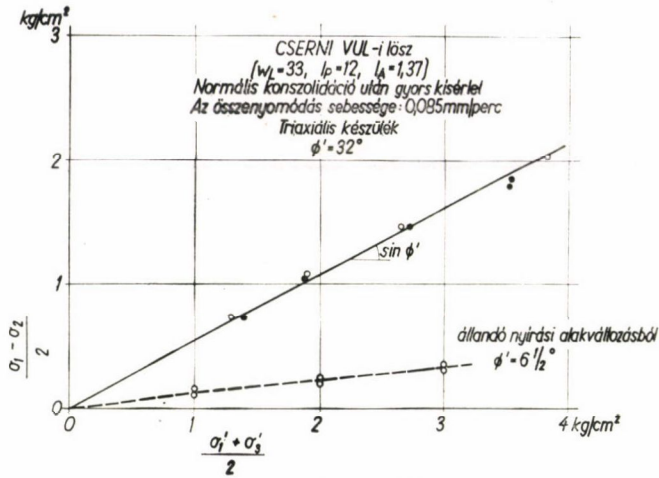
A 18. ábrán hasonlítottuk össze a Most-beli repedezett agyagból származó zavartalan mintákon végzett gyors dobozos nyírás és a zárt rendszerű triaxiális kísérlet eredményeit. A $\Phi_u = 0$ is bizonyítja, hogy a minták tökéle-

tesen telítettek voltak, és egyben ismét alátámasztották a kétféle kísérlet-sorozattal nyert eredmények jó egyezését.

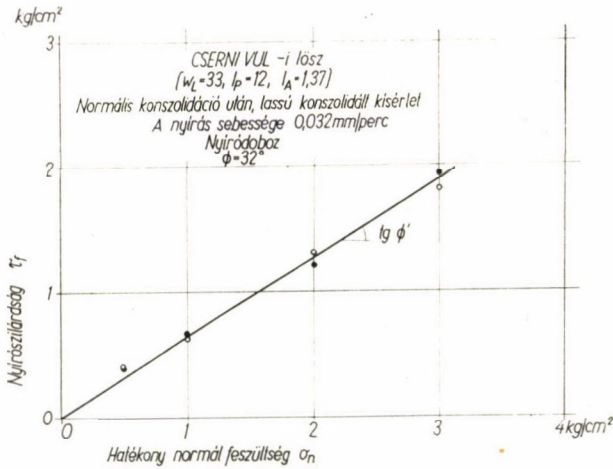
Nemrégiben érdekes kísérletsorozatot kezdtünk pórusvíznyomás mérésére dobozos nyírókészülékekben (átgyúrt, telített mintákkal). A 19. és a 20. ábra mutat be összehasonlítást túlkonzolidált löszökön nyert kísérleti eredmények között, éspedig: lassú nyírás, nyílt rendszer, illetve gyors nyírás, közel



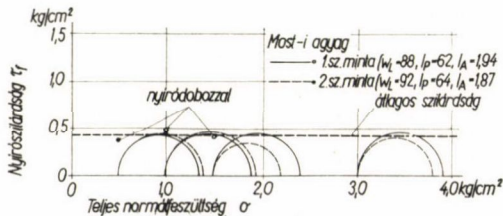
15. ábra. Semleges feszültség és térfogatváltozás; normálisan konszolidált löszminta; nyíródoboz, lassú kísérlet



16. ábra. Normálisan konszolidált lösz valódi belső súrlódási szöge, triaxiális készülék

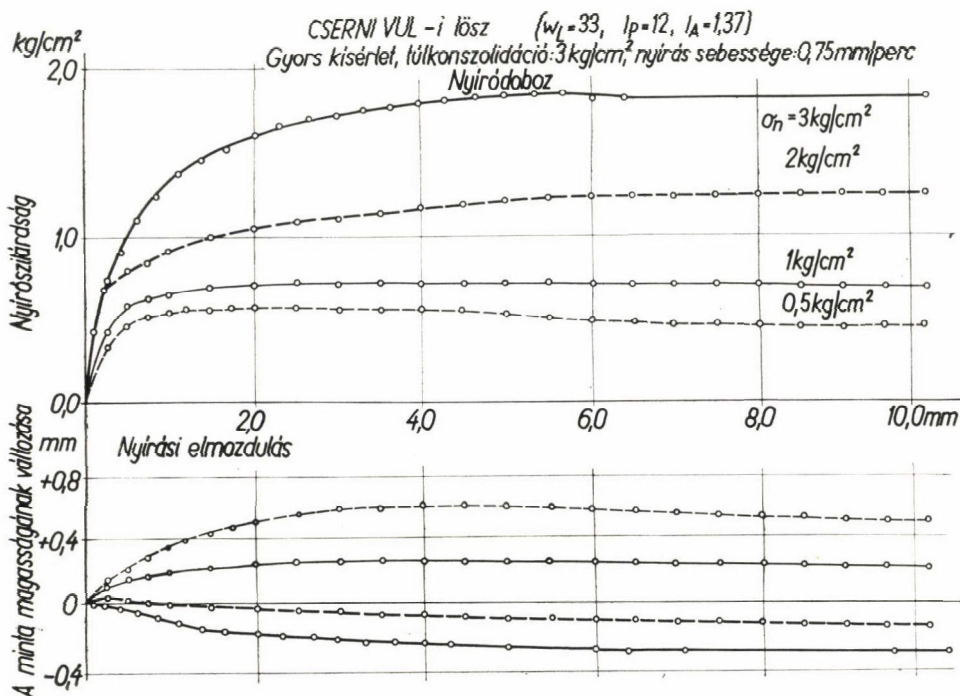


17. ábra. Normálisan konszolidált lösz valódi belső súrlódási szöge. Nyíródoboz, lassú kísérlet



18. ábra. Nyírósúlártság konszolidálatlan állapotban. Triaxiális készülék és nyíródoboz eredményeinek összehasonlítása

zárt rendszer esetére. Az első esetben a kisebb normál feszültségek tartományában térfogatnövekedés jelentkezett, ami mind túlkonzolidált agyagokra, mind tömör homokokra jellemző. Nagyobb normál feszültségek esetében — amikor a minta gyakorlatilag már normálisan konszolidált — térfogatsökkenés lép fel, úgy mint a laza homokokban. Ilyen térfogatváltozás, valamint a mért pórusvíznyomások láthatók a 20. ábrán, vagyis lazulás az alacsony nyomásoknál, tömörödés a nagy nyomásoknál. Ezeket a kísérleteket azért végeztük, hogy



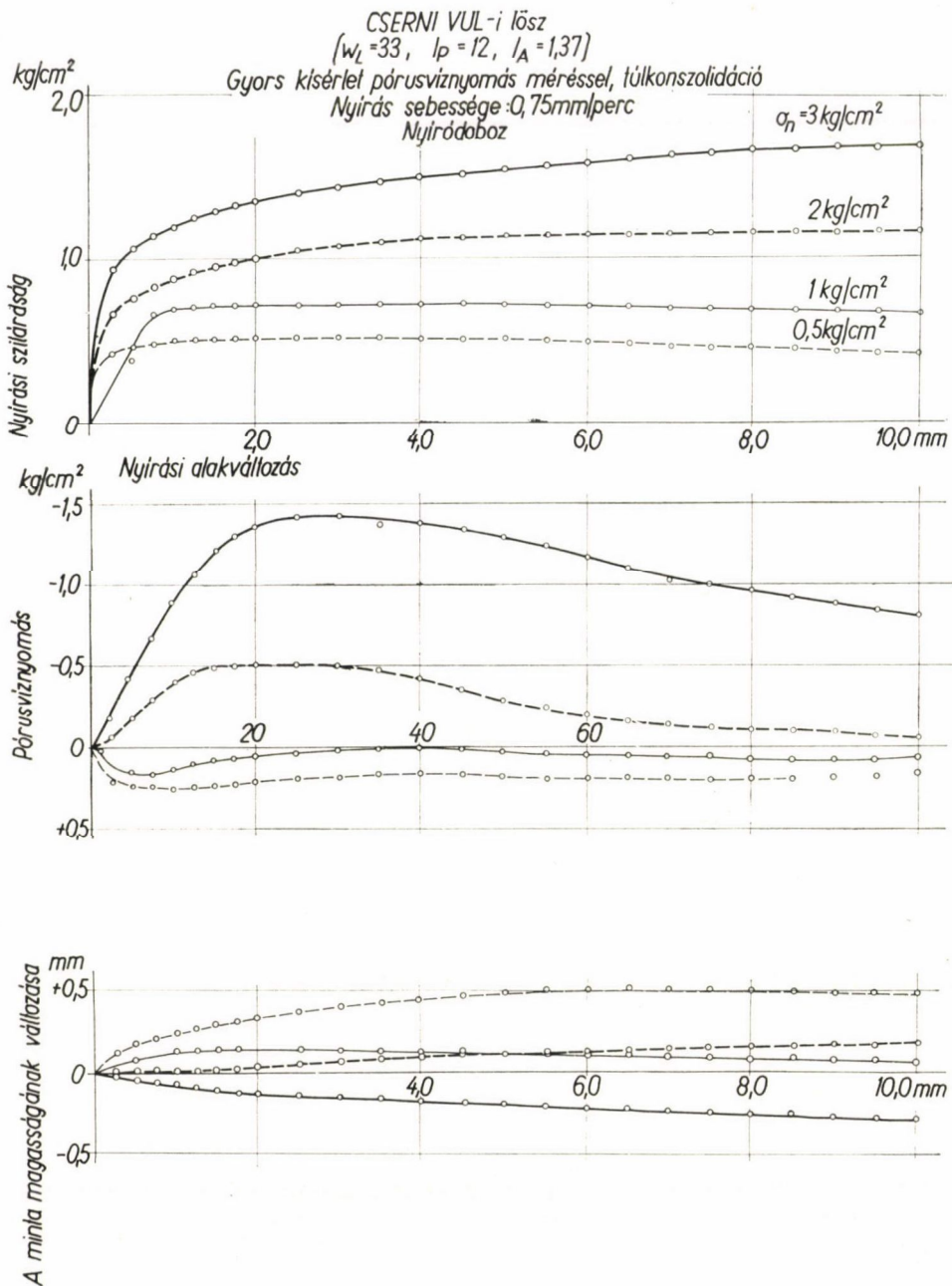
19. ábra. Túlkonzolidált lösz térfogatváltozása nyíródobozban

összehasonlítsuk a nyíródobozzal, illetve triaxiális készülékkel nyert nyírószilárdsági jellemzőket. Az ilyesféle összehasonlítás legfőbb nehézsége abban rejlik, hogy a rendszer zártságának biztosítása végett gyorsan kell végrehajtani a dobozos nyírást, viszont az ilyen erőltetett ütemű elnyírás esetében nem lehet a mért pórusvíznyomás az egész mintára jellemző.

A kétfázisú rendszerek nyírószilárdságának vizsgálatában a legnehezebb kérdés a helyes törési kritérium kiválasztása.

Nyitott rendszerben a $\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{\max}$ kritérium azonos értékű a $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$

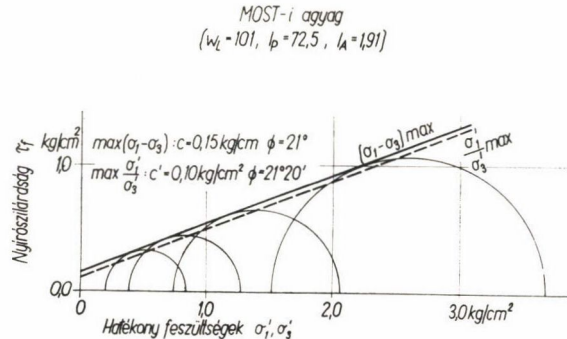
kritériummal, mégis nyitott rendszerekben — kivéve egyes különleges eseteket — e két feltétel különböző eredményre vezet. A 21. ábrán éppen egy ilyen különleges eset láthatunk: az eredmények közötti különbség a kísérleti eredmények szokásos szórásából ered. Ilyesféle eredmény várható mindig, ha a pórusvíznyomás — vagy növekedése — a minta törési helyének elég széles környezetében állandó. Ellenkező esetben az eredmények eltérőek lesznek.



20. ábra. Túlkonzolidált lősz térfogatváltozása és a semleges feszültségek; nyíródoboz, gyors kísérlet

Ezt a tényt a 22. és 23. ábrával bizonyíthatjuk. Ezek a normálisan konszolidált, illetve túlkonszolidált, átglyúrt lösz mintákban ébresztett feszültségek változásának alakulását szemléltetik σ'_1, σ'_3 koordinátarendszerben. A feszültségek alakulását ábrázoló vonal hajlásából bármely pillanatban meghatározható a pórusvíznyomás A együtthatója is, felhasználván ehhez az ábrák jobb alsó sarkába rajzolt sugársort.

A normálisan konszolidált lösznek a 22. ábrán látható feszültségváltozási vonalai általában jellemzőek az izotróp körülmények között normálisan konszolidált talajokra.



21. ábra. A kétféle törési kritérium összehasonlítása; zavartalan Most-i agyag

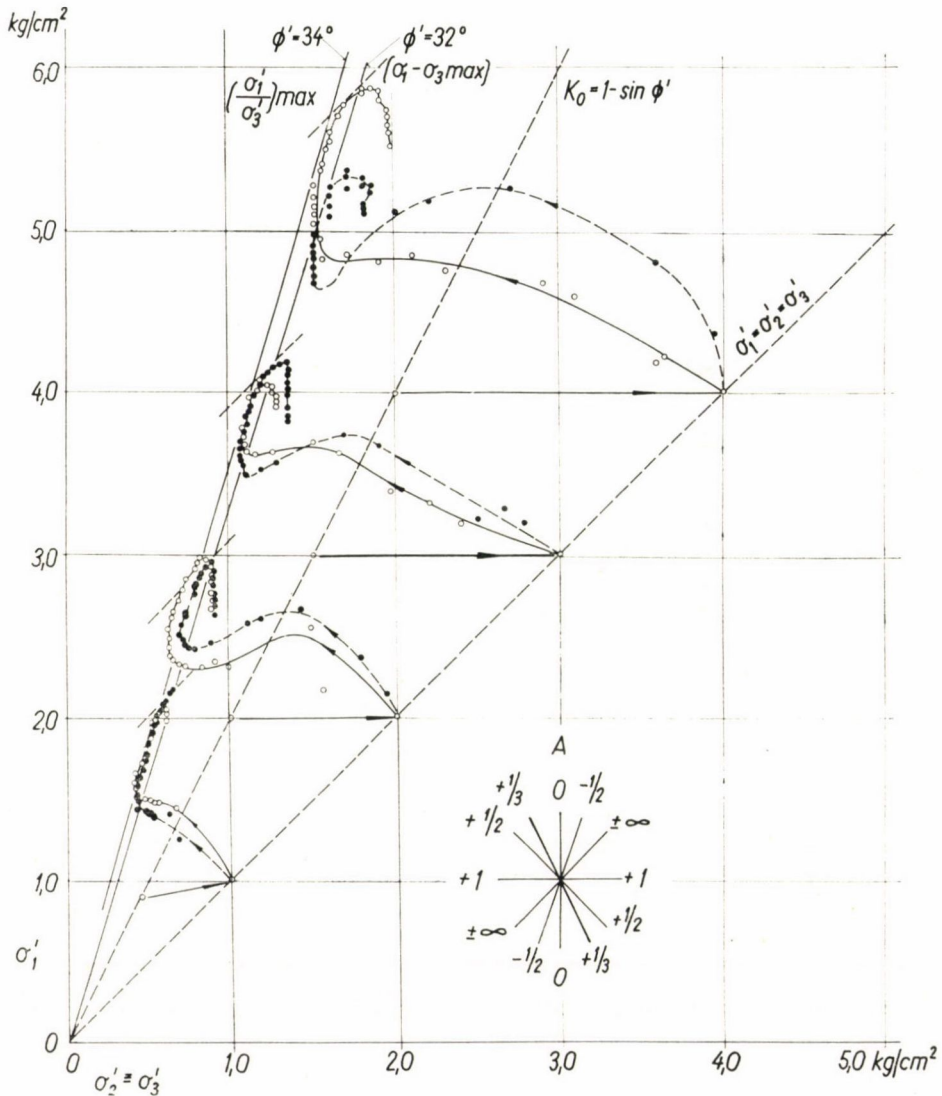
Hangsúlyozni kell, hogy az anizotróp körülmények között ("K₀ – konszolidáció", ami azt jelenti, hogy a mintának nincs oldalirányú alakváltozása) normálisan konszolidált minták összetartozó feszültségeinek alakulása teljesen különböző, habár nyírószilárdságuk azonos lehet (lásd pl. A. W. Skempton – V. A. Sova 1963). A konszolidáció különböző módja miatt a talajminták mikrostruktúrája különböző lehet.

A 22. ábrából származó A együttható értékeinek részletesebb vizsgálatából kitűnik, hogy az első terhelés során, a K_0 vonalig, A körülbelül $0,5 \div 0,8$, akkor azután hirtelen felnő (kivéve a legkisebb, $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$ értéket) a $+ 2 \div 3$ értékig. Ez jelzi, hogy az eredeti szerkezet megbomlott, mert a pórusvíznyomás növekedése nagyobb, mint a σ_1 teljes feszültség növekedése ($A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1}$). Úgy látszik, hogy a folyadéknyomás növekedésével fokozatosan gyengül a szerkezet ilyen megbomlásának tendenciája (a folytonos vonal a 22. ábrán).

Az eredeti szerkezet ezen megbomlása jellegzetes minden normálisan konszolidált talajra (alacsony konszolidációs nyomások esetében) és azt mutatja, hogy bizonyos feszültségi körülmények között ezek változóan stabil szerkezetű talajok módjára viselkednek, hasonlóan azokhoz, amelyek pl. megnedvesítve roskadnak, vagy mint az ún. érzékeny szerkezetű agyagok. A normálisan konszolidált talajok viszonylag magas érzékenységi foka – mely általában $2 \div 4$ közötti, vagy még magasabb is – összhangban áll az ilyen viselkedéssel.

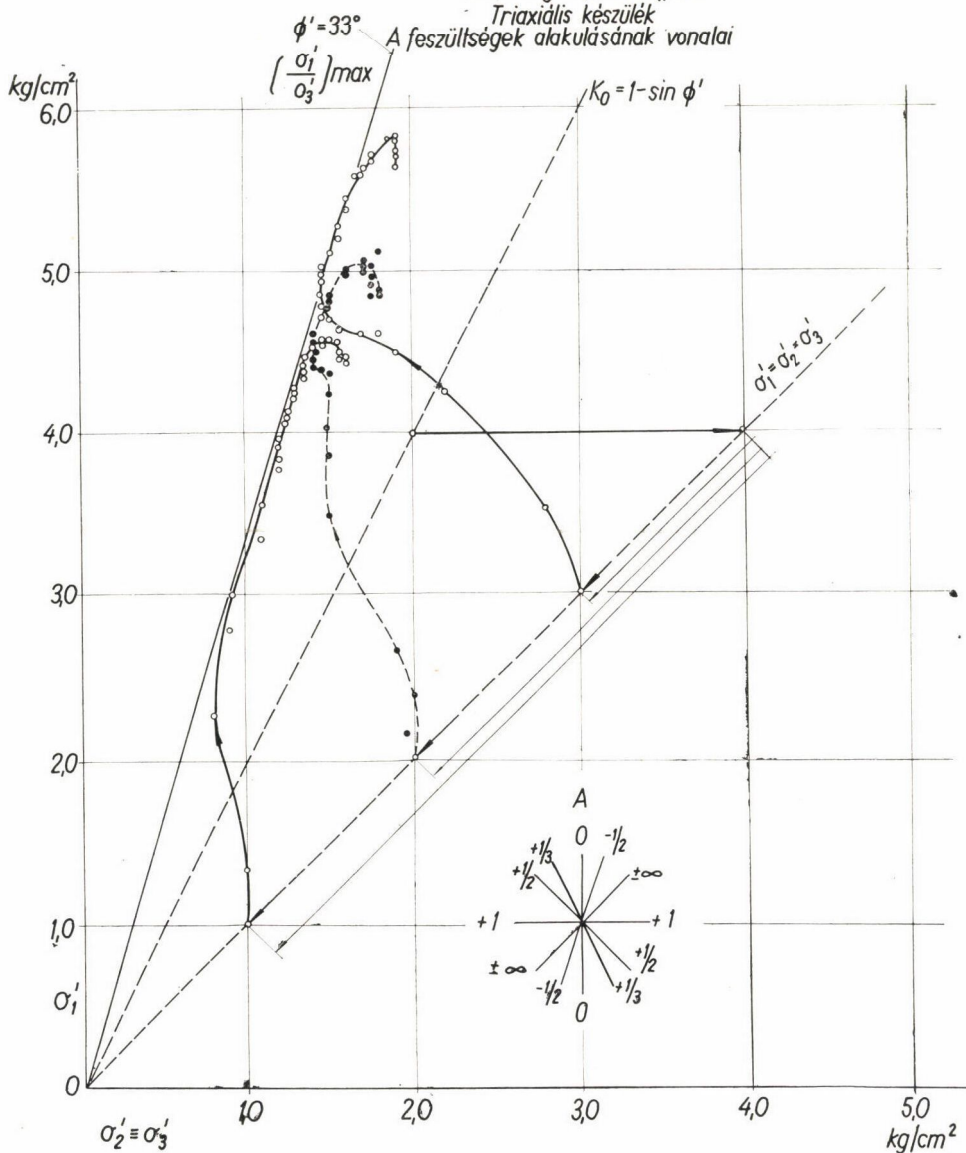
Az eredeti szerkezet megbomlása után egy újraszilárdulás következik és a minta úgy viselkedik, mintha túlkonszolidált lenne, $A < 0$.

CSERNI VUL-i lősz
 ($w_L=33, I_p=12, I_A=1,37$)
 Gyors kísérlet, normálisan konszolidált, az összenyomás sebessége 0,085 mm/perc
 Triaxiális készülék
 A feszültségek alakulásának görbéi



22. ábra. Normálisan konszolidált Cserni vul-beli lősz feszültségváltozásainak alakulása triaxiális készülékben

CSERNI VUL -i lösz
 ($w_L = 33$, $I_p = 12$, $I_A = 1,37$)
 Gyors kísérlet, túlkonzolidáció 4 kp/cm^2 nyomáson az alakváltozás
 sebessége $0,085 \text{ mm/perc}$



23. ábra. Túlkonzolidált Csérni vul-beli lösz feszültségváltozásainak alakulása triaxiális készülékben

A 23. ábrán látható túlkonzolidált löszön nem fedezhető fel a szerkezet megbomlása, csakúgy, mint a többi túlkonzolidált talajon sem. Ez meg-
 egyezik azzal a megfigyeléssel, hogy az ilyen talajok érzékenységi foka 1, ami
 más szóval azt jelenti, hogy a túlkonzolidált talajok nem érzékenyek. Amíg
 σ_3 -at a konszolidációs feszültségig ($\sigma_3 = 4 \text{ kp/cm}^2$) növeljük, a feszültségek
 alakulása hasonló a normálisan konszolidált talajokéhoz. Kezdetben $A =$
 $+ 0,33$, vagyis a minta rugalmas anyagként viselkedik, később $A < 0$, vagyis
 térfogatnövekedés áll elő.

A $\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_{\max}$ törési kritériumot a terhelési vonalak burkolójával szem-

léltethetjük, ennél fogva nagyobb Φ' értékeket kapunk a $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ törési
 kritérium alapján. Ha összehasonlítjuk a 22., ill. 23. ábrákból nyerhető Φ' -ket
 (normálisan konszolidált löszre $\Phi' = 34^\circ$, túlkonzolidált löszre $\Phi = 33^\circ$),
 arra a következtetésre juthatunk, hogy a kétféle érték gyakorlatilag egybe-
 vágó, amit az okoz, hogy mindkét kísérletben igen hasonlóan alakult a végső
 termelési állapot — amint azt előzőleg már említettük.

A $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ törési kritériumot a terhelési vonalakkhoz átlósan (a σ_3
 tengelyhez viszonyítva 45° -os hajlással) húzható érintők érintési pontjai
 adják meg, amint a 22. ábrán látható. Ezen ábra szerint Φ' értéke 2° -kal
 kisebb, ugyanakkor a tengelyirányú összenyomódás nagyobb, mint az előző
 kritérium esetében. A kétféle törési kritérium ilyen viszonya jellemző a túl-
 konszolidált agyagokra és tömör homokokra. Laza homokokra és normálisan
 konszolidált agyagokra (K_0 konszolidáció — vagyis a természetes állapotú
 konszolidáció körülményei között) a $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ törési kritérium kisebb
 tengelyirányú alakváltozások mellett van kielégítve, mint a másik kritérium.
 Ezekből a megfigyelésekből azt a következtetést lehet tehát levonni, hogy az
 első törési kritérium — hatékony feszültségekben megadva — használandó a
 végső konszolidáció állapotának, a másik pedig az építkezés befejezéséig bekö-
 vetkezett konszolidáció állapotának megfelelő állékonysági helyzet ellenör-
 zésére, normálisan és K_0 körülmények között konszolidált agyagokban, illetve
 megfordítva, a túlkonzolidált agyagokban. Az első típusú állékonysági vizsgálat
 esetében ugyanis lényegesen nagyobb alakváltozások mellett következhet be
 törés, mint a másik típusnál.

Ez a néhány megfigyelés — amelyek korántsem merítették ki a nyíró-
 szilárdság teljes problémakörét — arra szolgál, hogy rámutasson a kérdések
 komplex voltára és mind elméleti, mind gyakorlati szempontból rendkívüli
 fontosságára. A szerző reméli, hogy sikerült e téren előrehaladnia.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúttal is hálás köszönetét fejezi ki *J. HAVLIČEK*-nek, a
 Talajmechanikai Osztály vezetőjének, aki a 22. és 23. ábrákon látható „A-
 analízist” javasolta; továbbá *B. BOUČEK*-nek, aki a szerző rendelkezésére
 bocsájtotta a 16., 22., és 23. ábrán látható kísérleti eredményeit; *B. KAME-*
NOV-nak, aki a 7. és 9. ábrán látható 2. sz. görbét határozta meg, és végül a
J. HAVLIČEK, *A. KOLOMINOVÁ* és *S. D. RAMASWAMY* kollektívának,
 akik a 14., 15., 17., 19. és 20. ábrákon látható eredményeikkel voltak a szerző
 segítségére.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] *Conforth, D. H. (1964)*: Some experiments on the influence of strain conditions on the strength of sand. Géotechnique No. 2.
- [2] *Kézdi, Á. (1963)*: Scherverformungen von Sand. Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem Tudományos Közleményei, IX. köt. 5. sz.
- [3] *Skempton, A. W. (1964)*: Long-term stability of clay slopes. Géotechnique No. 2.
- [4] *Skempton, A. W.—Northey, R. D. (1952)*: The sensitivity of clays. Géotechnique No. 1.
- [5] *Skempton, A. W.—Sowa, V. A. (1963)*: The behaviour of saturated clays during sampling and testing. Géotechnique No. 4.