

Kőzetek tagolófelületeinek nyírási szilárdsági vizsgálata változó nyomófeszültség esetén

Vásárhelyi Balázs

Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki Kar, vasarhelyib@gmail.com

Ván Péter

KFKI, RMKI, Elméleti Fizika Főosztály/BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék/Montavid Termodinamikai Kutatócsoport, vpethm@rmki.kfki.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A tagolt kőzetkörnyezetben történő tervezésnél elengedhetetlenül fontos a tagoltság menti nyírószilárdság pontos ismerete. A tradicionális nyírási vizsgálatoknál vagy a nyomóerőt, vagy a rugómerevséget állandó értéken tartva mérjük meg a nyírási elmozdulásokat, határozzuk meg a maximális és reziduális nyírófeszültségeket. Ezen mérésekhez igen nagyszámú vizsgálat elvégzése szükséges. Jelen cikk célja azt megvizsgálni, mi történik abban az esetben, ha a nyomófeszültséget a vizsgálat alatt folyamatosan növeljük. Köztudott, hogy a triaxiális vizsgálatok esetén a környezeti nyomás változtatásával lehetőség van a kőzetet folyamatos törési állapotban tartani, és bár a törési határfeltétel a nyírási vizsgálatok esetében is ugyanaz, az ilyen irányú vizsgálatok nem vezettek eredményre. A mérések szabályosan fogazott cement próbatesteken készültek, melyek mechanikai paramétereit jól ismertek. A kapott eredmények magyarázatára különböző modelleket javasolunk.

Kulcsszavak: nyírási vizsgálat, nyomófeszültség, CFS módszer, tagoltság

1 BEVEZETÉS

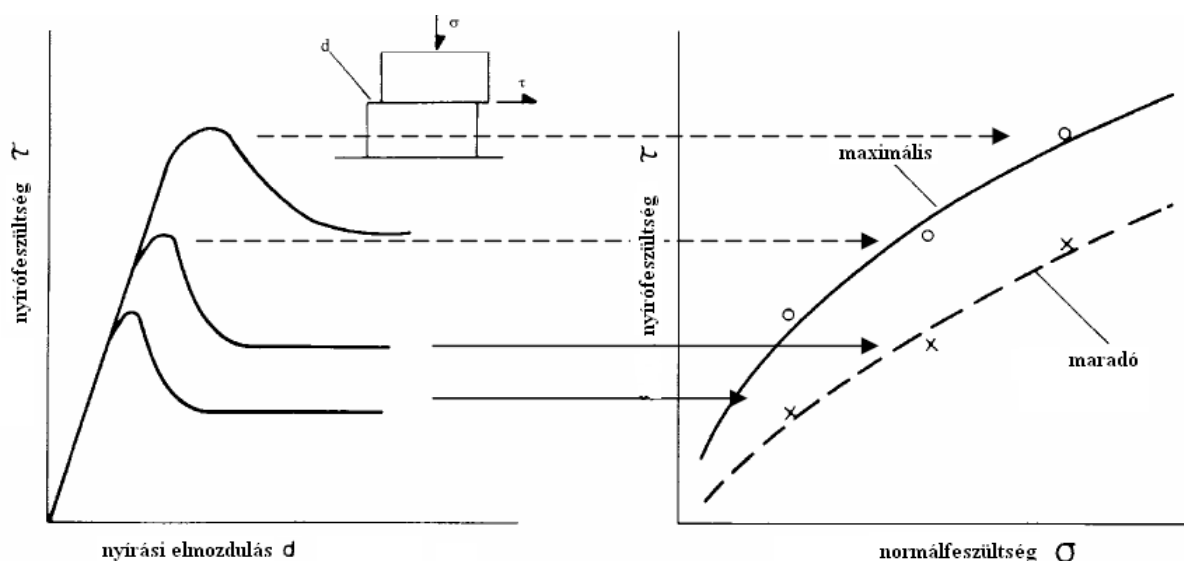
Ma már általános, hogy az ép kőzet törési (és maradó) határfeszültségének meghatározásánál folyamatos törési állapotban lévő, ún. CFS (Continuous Failure State) triaxiális vizsgálatot alkalmaznak. Ez a módszer a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság (ISRM) laboratóriumi mérési javaslatai között is szerepel (Kovári et al. 1983a), valamint már Magyarországon is ismert (Gálos & Vásárhelyi, 1997) és alkalmazásra is került. A módszer lényege, hogy a környezeti nyomás folyamatos változtatásával, állandó axiális elmozdulás-sebesség mellett, az ép kőzet folyamatosan törési határállapotba hozható, azaz a törési határgörbe egy próbatesten laboratóriumi úton meghatározható. A kőzet törése után a reziduális (maradó) feszültséggörbe kimérésére is lehetőség nyílik. Kovári *et al.* (1983b) részletesen ismertetik a mérés menetét, valamint annak elméleti hátterét. Könnyen belátható, hogy ez a mérés csak nemlineáris törési határgörbéjű rideg anyagoknál alkalmazható, így pl. talajok esetén nem, legalábbis abban a legegyszerűbb esetben, ha a törési határgörbe Coulomb egyenest ad, azaz a környezeti nyomás hatására a törési felület nem változik meg. Mivel a rideg kőzetek törési határgörbéje többnyire nem lineáris, így a folyamatosan változó törési síkok miatt a mérés viszonylag pontos eredményre vezet és a törési határgörbe – legalább részlegesen – meghatározható.

Tisa & Kovári (1984) a CFS rendszerű triaxiális vizsgálat bevezetése után felvetette ezen módszer alkalmazhatóságát nyírási vizsgálatoknál is. Ennek elméleti lehetőségét alátámasztotta az a tény, hogy a triaxiális vizsgálatok határgörbéi karakterisztikájukban megegyeznek a nyírási vizsgálatok határgörbéivel (1. ábra)

Tekintettel a nyírási vizsgálatok jelentős anyagigényére, a mérések nehézségére, az eredmények igen nagy szórására, igen fontos lett volna, ha a CFS rendszerű nyírási vizsgálatot itt is alkalmazni tudták volna. Számos fogazott próbatesteken végzett kőzetmechanikai vizsgálat azt mutatta, hogy CFS rendszerű vizsgálatnál nem lehetett pontosan a törési határgörbét meghatározni, míg a reziduális (maradó) részt igen. Bízható eredményt csak csökkenő nyomófeszültség esetén kaptak (azaz a „klasszikus” növekvő nyomású CFS vizsgálat helyett nagyobb kezdeti nyomást alkalmaztak, majd törés után azt csökkentették folyamatosan) (Tisa & Kovári, 1984). A csökkenő nyomófeszültséggel mért eredmény általában a hibahatáron belül mozgott, ezért a gyakorlatban sokszor alkalmazzák nyírási vizsgálatoknál, főleg abban az esetben, ha nincs elég próbatest az egyedi vizsgálatokhoz.

Jelen cikk célja a Tisa & Kovári (1984) által kifejlesztett CFS rendszerű nyírási vizsgálat mérési eredményeinek értékelése abban az esetben, amikor a nyomófeszültséget folyamatosan növeljük. A

mérések minden esetben fogazott cement alapanyagú próbatesteken készültek. A próbatestek törési és reziduális határgörbéje a mérések megkezdése előtt már jól ismert volt egyedi mérésekkel. Kilenc különböző kezdőnyomáson elvégzett kísérletet dolgoztunk fel és értékeltünk. Ezen problémával részletesen foglalkozott Vásárhelyi & Ván (2006)-ban.



1. ábra. A tagolófelületen végzett nyírási vizsgálatok karakterisztikus eredményei, hasonlóan a triaxiális vizsgálatok eredményeihez

2 A MAXIMÁLIS NYÍRÁSI FESZÜLTÉS ÉS A NYOMÓFESZÜLTÉG KÖZÖTTI KAPCSOLAT

Elsőként Patton (1966) végzett nyírási vizsgálatokat fogazott próbatesteken változó nyomófeszültségek mellett. Vizsgálatai azt mutatták, hogy egy bizonyos normálfeszültségig a fogak szöge (i) és a közet súrlódási szöge (φ_μ) ismertében a normál-feszültség (σ_n) és a nyírófeszültség (τ) között az alábbi összefüggés áll fenn

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_\mu + i) \quad (1)$$

Az (1) egyenlet csak alacsony nyomófeszültség mellett igaz, azaz abban az esetben, ha a nyírási elmozdulás a kapcsolódó felületek egymáson való elcsúszásával jön létre. Egy bizonyos (közet anyagára jellemző) nyomófeszültség után (ennek jele: σ_T) a közet fogai eltörnek, azaz már annak szilárdsága a domináns. Ilyen esetben a (2) egyenlettel kell számolni:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_r \quad (2)$$

Ahol φ a tagoltsági felület súrlódási szöge, c pedig a kohézió. Általánosságban elmondható, hogy $\varphi_\mu \approx \varphi_r$.

Patton egyenletéből kiindulva számos modellt alkottak meg, ahol ezen tényezők szerepelnek. Ladanyi és Archambault (1970) az (1) egyenletet természetes tagolófelületekre vonatkozó mérési eredmények alapján a következő alakban általánosította:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_\mu + v) \quad (3)$$

Ahol v a fogak nyírás alatt végbemenő alakváltozott szögét jelenti. Vásárhelyi (1998) újabb méréseivel kimutatta ezen egyenlet helyességét.

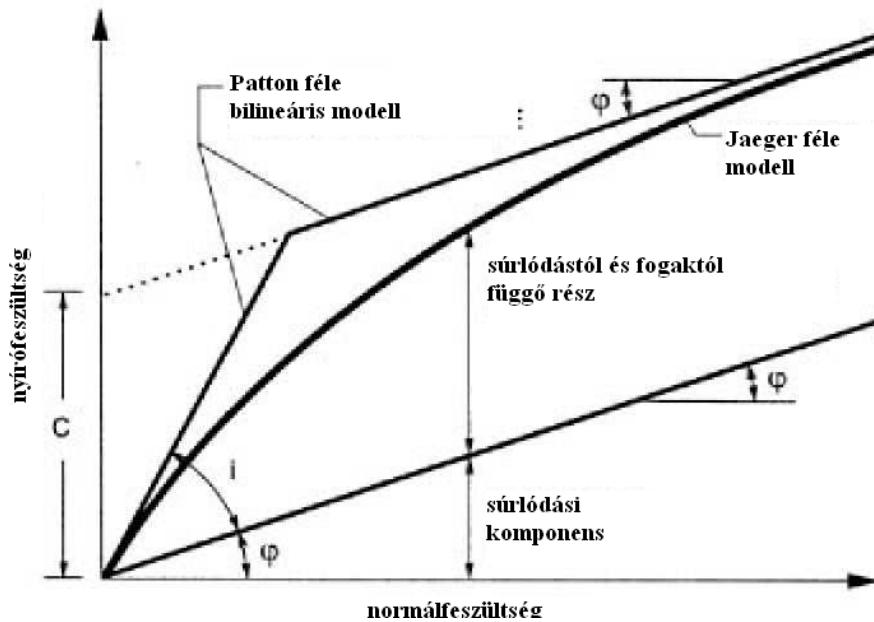
Jaeger (1971) az alábbi egyenlet alkalmazását javasolta, mely Patton mindkét tartományára alkalmazható (lásd 2. ábra):

$$\tau = c [1 - e^{-b\sigma_n}] + \sigma_n \tan \varphi_\mu \quad (4)$$

ahol b empirikus állandó; c : kohézió; σ_n normálfeszültség; φ_μ belső súrlódási szög. A (2) és (4) egyenletek végtelen nagyságú normálfeszültség esetén megegyeznek.

3 KÍSÉRLETI ANYAG ÉS A VIZSGÁLAT VÉGREHAJTÁSA

A kísérletek cement anyagú fogazott próbatesteken felhasználásával készültek, ahol az anyag mechanikai tulajdonságai jól ismertek voltak (Tisa & Kovári, 1984, Vásárhelyi, 1998). Mindegyik próbatest 150 mm széles és 140 mm hosszú volt 4 szabályos fogazattal, melyek között a távolság 20 mm volt. Mindegyik fog 5 mm magas és 15 mm vastag volt az aljánál, azaz a fogak szöge (i) $26,6^\circ$ volt. Az átmeneti feszültség (σ_T) $2,10 \text{ N/mm}^2$, míg a kohézió (c) $2,13 \text{ N/mm}^2$ volt. A mérések alapján a súrlódási szög (φ_μ) $33,64^\circ$, míg a teljes csúszási szög (α) $59,00^\circ$ volt. Az alkalmazott cement mechanikai paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

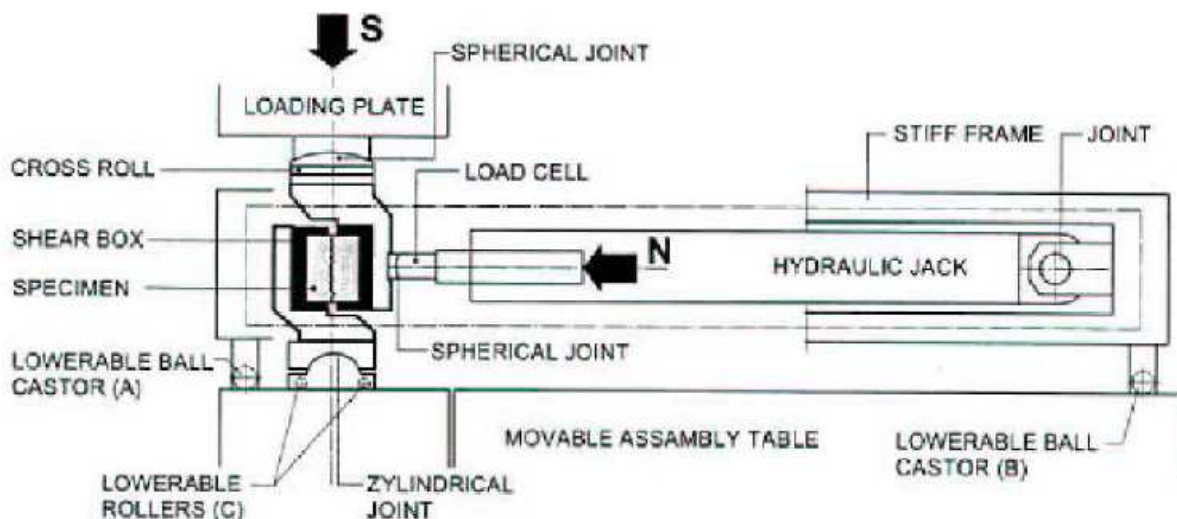


2. ábra. Patton és Jaeger féle modellek összehasonlítása

1. táblázat. A vizsgálatnál felhasznált anyag mechanikai paramétereit

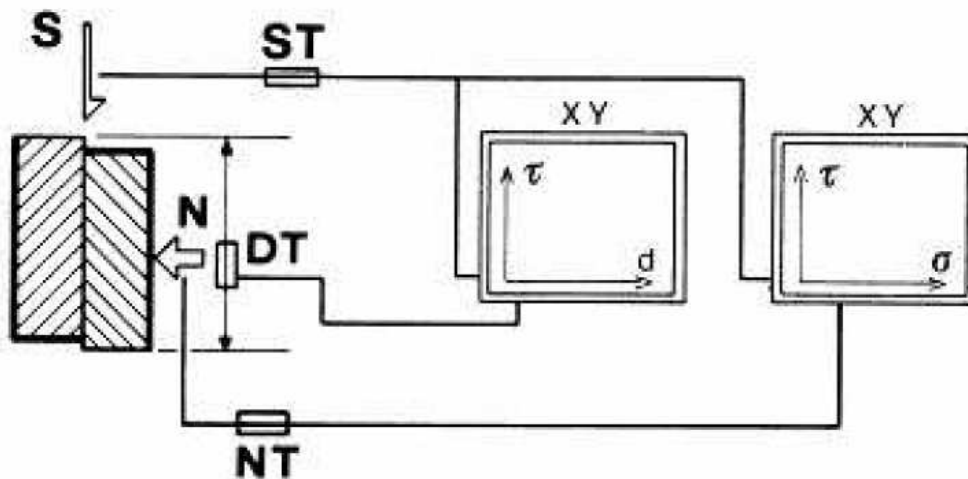
Mechanikai paraméterek	Jele	Mértékegység	Mért értéke
Rugalmassági modulus	E	GPa	17,5
Poisson tényező	ν	-	0,1
Törőfeszültség	σ_c	MPa	60
Húzófeszültség	σ_t	MPa	6,5
Testsűrűség	γ	kN/m^3	22,0

A mérések a Zürichi Műszaki Egyetem (ETH Zürich) közetmechanikai laboratóriumában készültek. Az ott kifejlesztett CNL (állandó nyomású) nyírási műszert Tisa & Kovári (1984) részletesen bemutatják – vázlatosan a 3. ábrán mutatjuk be. A műszer lehetőséget biztosított arra, hogy a nyomóerőt manuálisan folyamatosan változtassák a mérések alatt.



3. ábra. A vizsgálati berendezés vázlatos képe (Tisa & Kovári, 1984)

A mérés vázlatos felépítését a vizsgálati rendszerrel sematikusan a 4. ábrán mutatjuk be. Lehetőség volt a nyírófeszültség, a normálfeszültség, valamint a kétirányú elmozdulás folyamatos mérésére. Minden mérésnél állandó nyírófeszültség-sebességet alkalmaztunk, melynek értéke 0,003 mm/mp volt. A maximális nyírófeszültségig való terhelésig (melynek pontos értéke előző vizsgálatokból jól ismert volt) a nyomófeszültség állandó értékű volt. A mérések a következő kezdeti nyomófeszültséggel készültek el: 0.3; 0.6; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5 and 4.0 N/mm². Elérve a maximális nyírófeszültséget, a normálfeszültség manuális növelését végeztük el a CFS triaxiális vizsgálat mintájára, azaz a nyírófeszültség-nyírás elmozdulás görbe meredekségét állandónak véve fel.



4. ábra. A vizsgálat felépítésének sematikus rajza. (S: nyírófeszültség, N: normálfeszültség)

4 VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ELMÉLETI MODELLEK

A mért nyírófeszültség-normálfeszültség kapcsolatokat a 4. ábrán ismertetjük. A kapott görbék kvázi-lineárisan írhatók le, mely egyenes a reziduális burkoló felé tart. Alacsony normálfeszültség esetén a görbe irányának változása jóval hosszabb (azaz a görbülete jóval nagyobb), mint magasabb nyomófeszültség esetén, amikor is a görbülete lecsökken. Megjegyezzük, hogy a görbék alakja hasonlatos az ún. Ostwald görbékhez, mely a nyírás feszültség és a nyírás sebesség közötti kapcsolatot adja meg (Verhás, 1997). A görbék egyenes szakasza gyakorlatilag minden esetben párhuzamosak egymással, függetlenül az átmeneti feszültségre. A mérési eredményekre egy lineáris, és egy nem-lineáris modellt javasolunk.

4.1 Lineáris modell

A nyírófeszültség és a normálfeszültség közötti kapcsolatok azt mutatják, hogy alakjuk (meredekségük) független a kezdeti nyomófeszültség nagyságától, az minden esetben 25° körüli volt. Ez a szög igen közel van (mérési hibahatáron belül) a fogak szögéhez ($i = 26,6^\circ$), ezért feltételezhető, hogy ezen érték a közet érdekességétől függ. Ebből következően az alábbi lineáris kapcsolat adható meg:

$$\tau = \tau_s + (\sigma_{nx} - \sigma_s) \operatorname{tg} \gamma, \quad (5)$$

ahol τ_s a maximális nyírófeszültség a kezdeti normálfeszültségnél (σ_s), σ_{nx} a folyamatosan növekvő nyomófeszültség, $\operatorname{tg} \gamma$ pedig a normálfeszültség-nyírófeszültség görbe átlagos meredeksége. Az 5. ábra a 2 N/mm²-es kezdeti nyomófeszültséggel mért eredményt hasonlítja össze az így meghatározottal. Elfogadva a (3) egyenlet használhatóságát a Patton féle bilineáris modell mindkét tartományára, azt kapjuk, hogy τ_s lineárisan függ a kezdeti normálfeszültségtől (σ_s), azaz:

$$\tau_s = \sigma_s \operatorname{tg} (\varphi_\mu + \nu) \quad (6)$$

Sík nyírófelület esetén $\nu = 0$, azaz a nyírófeszültség-normálfeszültség görbe megegyezik a törési hátságörbével, mivel $\tan \gamma = \operatorname{tg} \varphi_\mu$ azaz ebben az esetben $\tau_s = \sigma_s \operatorname{tg} \gamma$.

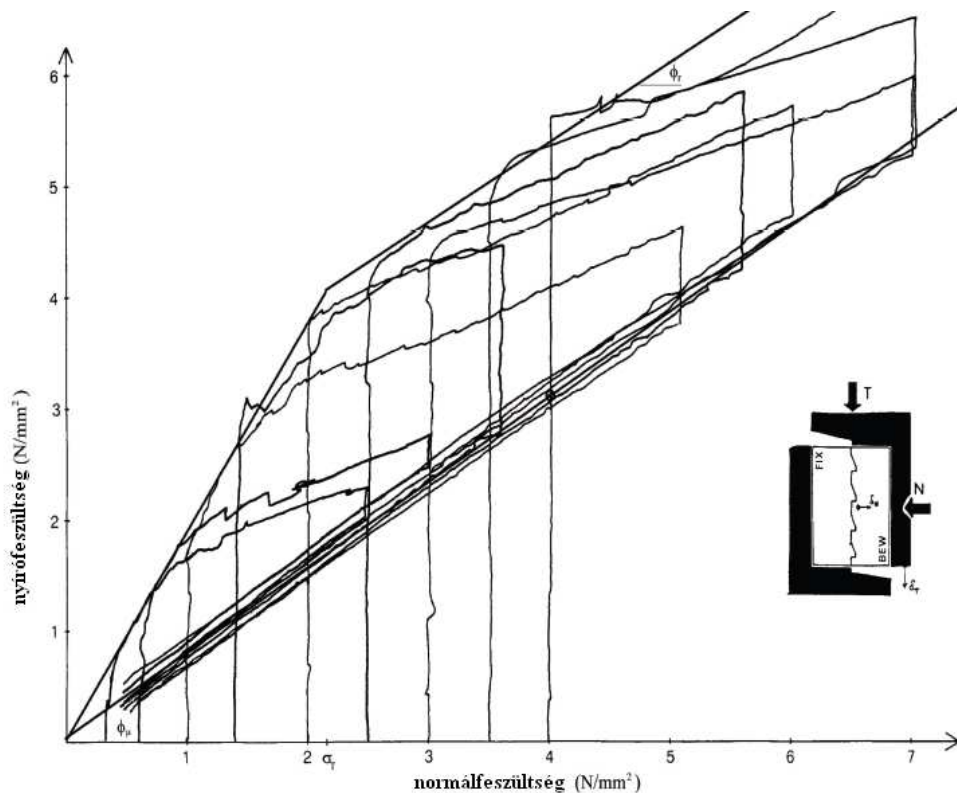
Az (5) egyenlet felbontható az (1) és a (2) egyenletek szellemében, azaz az átmeneti feszültség alatti és feletti tartományra is

Abban az esetben, ha a kezdeti nyomófeszültség kisebb, mint az átmeneti feszültség ($\sigma_s < \sigma_T$) az elmozdulás szöge gyakorlatilag megegyezik a fogak szögével ($\nu = i$). Ebben az esetben:

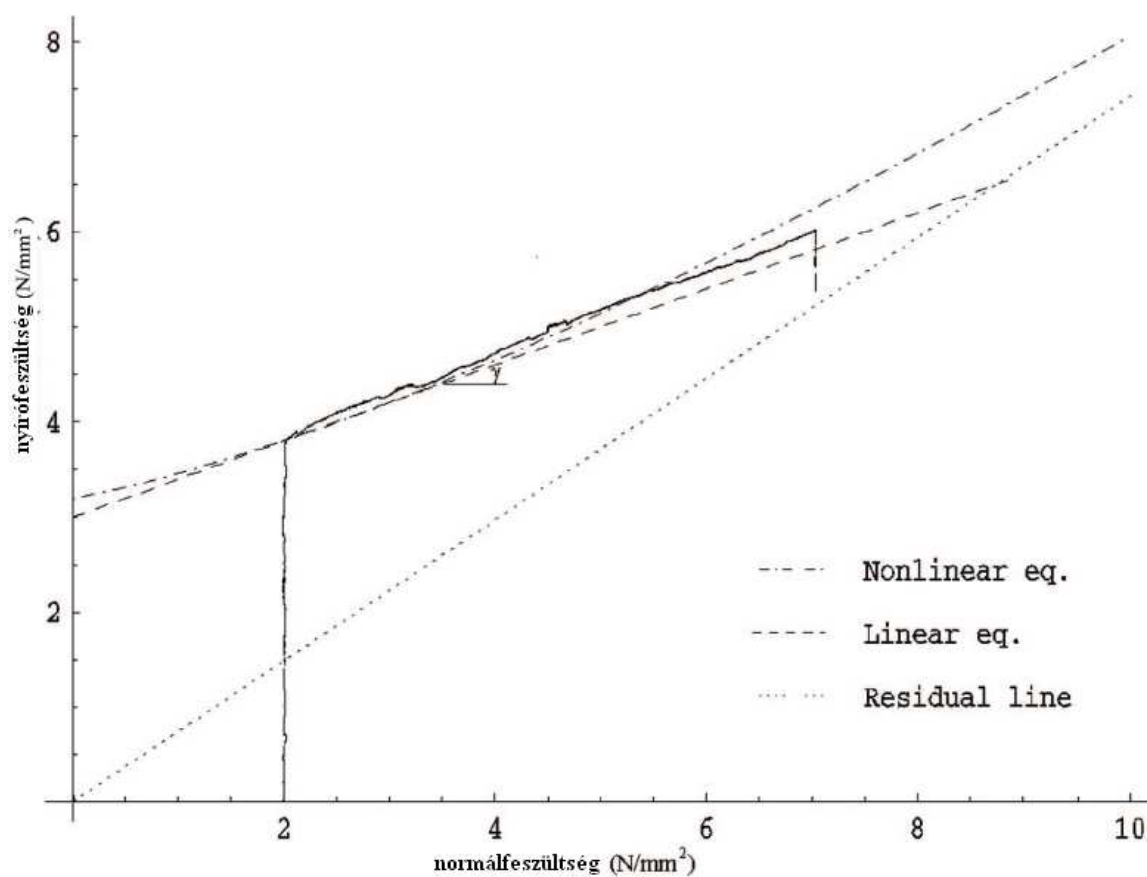
$$\tau = \sigma_s (\operatorname{tg}(\varphi_\mu + i) - \operatorname{tg} \gamma) + \sigma_{nx} \operatorname{tg} \gamma. \quad (7)$$

Abban az esetben, ha a kezdeti feszültség meghaladja az átmeneti feszültséget ($\sigma_s \geq \sigma_T$), vagy meghaladja azt, az alábbi kapcsolat adható meg:

$$\tau = c + \sigma_s (\operatorname{tg} \varphi_\mu - \operatorname{tg} \gamma) + \sigma_{nx} \operatorname{tg} \gamma, \quad (8)$$



4. ábra. A CFS rendszerű nyírási vizsgálattal mért görbék különböző kezdeti normálfeszültség esetén



5. ábra. Lineáris és nem-lineáris elmélettel kapott eredmények a mért növekvő normálfeszültség-nyírófeszültség kapcsolat esetén, 2,0 N/mm²-es kezdeti nyomófeszültség esetén

4.2 Nem-lineáris modell

A bemutatott lineáris modell (4)-es egyenlete főleg a kezdeti nyomófeszültség környezetében ad megbízható eredményt, de nagyobb környezeti nyomásnál már jelentős eltérés volt tapasztalható – annak értéke a mért érték alatt marad minden esetben. Ezért egy nem-lineáris egyenlet megalkotása is fontos, hogy a teljes folyamat jól modellezhető lehessen. A következő kiindulási feltételeket használtuk:

- a görbe szintúgy a maximális nyírófeszültségnél indul, mint a lineáris esetben, azaz: $\tau(\sigma_s) = \tau_s$;
- a görbe meredeksége: $\sigma_{nx} = \sigma_s$ megegyezik $\text{tg } \gamma$ -val.
- az aszimptotája $\sigma_{nx} \rightarrow \infty$ esetén tart a maradó szilárdsághoz ($\sigma_{nx} \text{ tg } \varphi_\mu$);
- a görbe érintője minden pontban pozitív

Jaeger egyenletének (4) analógiájára az alábbi nem-lineáris kapcsolatot lehet a fentiek alapján felírni:

$$\tau = (\tau_s - \sigma_s) \text{tg } \varphi_\mu e^{b(\sigma_{nx} - \sigma_s)} + \sigma_{nx} \text{tg } \varphi_\mu, \quad (9)$$

ahol

$$b = \frac{\text{tg } \gamma - \text{tg } \varphi_\mu}{\tau_s - \sigma_s \text{tg } \varphi_\mu}$$

és τ_s pedig a (6)-os egyenletből határozható meg. Az 5. ábrán ezen egyenlet eredményét is ábrázoltuk. Mint jól látható, ez jóval jobban közelíti a mért eredményt, valamint teljesítheti azt a feltételt, hogy görbe érintője a reziduális (maradó) határgörbe.

5 KONKLÚZIÓ

Megállapítható, hogy a triaxiális vizsgálathoz hasonló CFS rendszerű mérés nyírási vizsgálatok nem használhatóak a törési határgörbe pontos meghatározására. A kapott eredmények viszont számos kérdést felvetnek, mely közelebb vihet a tagolófelületek nyírási szilárdságának megismeréséhez.

A mérés alapján bebizonyosodott, hogy a nyírófeszültség-normálfeszültség kapcsolat folyamatosan növekvő normálfeszültség esetén független a kezdeti nyomófeszültségtől. A kapott eredmények mind lineáris, mind nem-lineáris modellel közelíthetők voltak.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A konferenciára a cikk megírását az OTKA K81161 sz. pályázata támogatta, melynek ezúton mondunk köszönetet.

IRODALOMJEGYZÉK

- Gálos M.; Vásárhelyi B. 1997: *Kőzetmechanikai anyagtulajdonságok meghatározása CFS rendszerű triaxiális vizsgálattal*. In: Geotechnika'97, Ráckeve, Okt. 28–29, CD-ROM.
- Jaeger J.C. 1971: Friction of rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, **21**: 97-134.
- Kovári K.; Tisa A. Attinger R.O. 1983b: The concept of “continuous failure state” triaxial tests. *Rock Mech. & Rock Engng.* **16**: 117-131.
- Kovári K.; Tisa A.; Einstein H.H.; Franklin J.A. 1983a: Suggested methods for determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **20**: 283-290.
- Ladanyi B., Archambault G. 1970: *Simulation of shear behavior of jointed rock mass*. Proc. 11th Symp. Rock Mech.: Theory and Practice, AIME, New York, 105-125.
- Patton F.D. 1966: *Multiple modes of shear failure in rock*. Proc. 1st Congress of ISRM, Lisbon, I/509-513.
- Tisa A.; Kovári K. 1984: Continuous failure state direct shear tests. *Rock Mech. Rock Engng.* **17**: 83-95.
- Vásárhelyi B. 1998: Influence of normal load on joint dilatation rate, *Rock Mech. Rock Engng.* **31**:117-123.
- Vásárhelyi B. és Ván P. 2006: Shearing tests with continuously increasing normal stress, *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.* **50**(22): 1-10.
- Verhás J. 1997: *Thermodynamics and Rheology*, Kluwer-Academic Press, Budapest.