

Tagoltság menti nyírószilárdság laboratóriumi meghatározása többlépcsős vizsgálati eljárással

Determination of rock joint shear strength by multi-stage shear test

Back Márta

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, marta.back92@gmail.com

Hübner Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, huebnerbala@gmail.com

Görög Péter

BME, Geotechnika és Mérmőkeológia Tanszék, gorog.peter@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A kőzettest tulajdonságai nagy mértékben függenek a tagoltságok jellemzőitől, ezért ezek kulcsfontosságú bemenő paraméterek az állékonyságvizsgálatok, valamint az egyéb mérmőkeológiai problémák számításánál, modellezésénél. A tagoltságok fő jellemzője a tagoltság menti nyírószilárdság, amelynek meghatározására a mai napig nem készült szabványos laboratóriumi vagy számítási eljárás. A Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság készített ajánlást a tagoltság menti nyírószilárdság meghatározására. Cikkünkben ennek az ajánlásnak az 1974-es változatát vetjük össze a legújabb 2014-es előírással, illetve nyírószilárdság vizsgálati példákon keresztül mutatjuk be a korszerű, lépcsős terhelési módszer előnyeit különböző érdességgű felületeken készült laboratóriumi nyíródobozos vizsgálatok eredményein keresztül.

Kulcsszavak: tagoltság menti nyírószilárdság, ISRM előírás, többlépcsős nyírásvizsgálat

ABSTRACT: The properties of the rock mass strongly depend on the parameters of the joints, which are important input parameters of the calculation and modelling of stability analysis and other engineering geological problems. The main characteristic of joints is the shear strength. Until these days there is no standardized method for determining the shear strength of joints in laboratory or for calculating it. The ISRM prepared a suggested method for determining the shear strength. In this paper we compare the version made in 1974 and the newest one, and present the advantages of the modern, multi-stage shear testing by direct shear test examples made on rock surfaces with different roughness.

keywords: shear strength of rock joints, ISRM suggested method, multi-stage shear test

1 BEVEZETÉS

A kőzetek többsége számos tagoltságot tartalmaz, amelyek jelentősen befolyásolják a kőzet tulajdonságait, például a szilárdságát, alakváltozási jellemzőit, áteresztő-képességét (Hencher 2012). A tagoltság a mérmőkeológiai modellben az a határfelületi modell-elem, amely a kőzettestet kőzettömbökre bontja (Gálos és Vásárhelyi 2006). A kőzettest tulajdonságait egyrészt a kőzettömbök jellemzői, másrészt pedig a tagoltságok tulajdonságai határozzák meg, ezért a kőzettesten belül lejátszódó folyamatok megismeréséhez kulcsfontosságú a tagoltságok nyírószilárdságának ismerete, meghatározása. A tagoltság menti nyírószilárdság a tagolófelületek közötti erő-elmozdulást jellemző paraméter, így nem tekinthető azonosnak a nyírószilárdság mechanikában értelmezett fogalmával (Gálos és Vásárhelyi 2006). A tagoltság menti nyírószilárdság tehát a kőzettestek leglényegesebb jellemzője, ugyanis a kőzettestek állékonysága ennek értékével határozható meg, vagyis az alagutak, földalatti létesítmények, sziklarézsűk biztosításának számításánál, a problémák modellezésénél alapvető bemenő paraméter (Buocz et al. 2012).

A tagoltságok nyírószilárdsága nagymértékben függ a tagolófelületek tulajdonságaitól, úgy mint a felületek megnyíltsága, érdessége, mállottsága, a tagoltság kitöltöttsége, víz előfordulása. (Gálos és Vásárhelyi 2006)

A tagoltság mentén bekövetkező tönkremenetel az építőmérnöki-mérmőkeológiai projekteknél kiemelt kockázati tényező, mivel számos baleset, valamint gazdasági kár forrása lehet. Egy adott projekt esetében a kockázat felméréséhez elengedhetetlen a tagoltság menti nyírószilárdság meghatározása. A nyírószilárdság értékének becslése nyírásvizsgálat segítségével történik. A valóságot leginkább közelí-

tő eredményeket az in-situ nyírásvizsgálatok adják, ugyanis esetükben a mérhetőség nem torzítja az eredményt. Azonban a vizsgálat időtartama és költségessége miatt a gyakorlatban a tagoltságokból vett mintákon végzett laboratóriumi nyírásvizsgálatok terjedtek el (ISRM 1974).

A nyírószilárdság értékének meghatározására azonban a tagoltságok változatossága miatt még napjainkban sem létezik szabványosított eljárás, laboratóriumi kísérlet vagy matematikai számítás. A nyírószilárdsági paraméterek számszerűsítésére számos kutató tett ajánlást, amelyekben többnyire új jellemzőket és összefüggéseket vezettek be. Barton, Lien és Lunde valószínűsíthetően elsőként vették figyelembe a felület érdességét (J_r) illetve a tagoltság elmozdulását (J_a) 1974-ben publikált Q-függelékben. Később, 1977-ben Barton és Choubey két új paramétert definiáltak: a tagoltság érdességének a mérőszámát (JRC), valamint a tagoltság anyagának a nyomószilárdságát (JCS) (Goel és Singh 2011). Bár Bartonék elméletének alkalmazása gyakorlati szempontból korlátozott, ugyanis nem a teljes felületet veszi figyelembe, hanem csupán kétdimenziós profilok alapján következtet, illetve nem alkalmazható, amennyiben a tagoltság felülete mállott, vagy ha a tagoltság kitöltött, mégis a számítást sokat még napjainkban is az általuk publikált empirikus képlettel végzik. Ennek oka, hogy nem létezik másik, a gyakorlatban egyszerűen alkalmazható összefüggés, amely valamennyi befolyásoló tényező figyelembe vételével, megfelelő biztonsággal közelítené a tagoltság menti nyírószilárdság értékét (Buocz et al. 2012).

A közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatokra a Nemzetközi Közetmechanikai Társaság készített ajánlást, először 1974-ben, amely az in-situ és a laboratóriumi vizsgálatokra egyaránt vonatkozik.

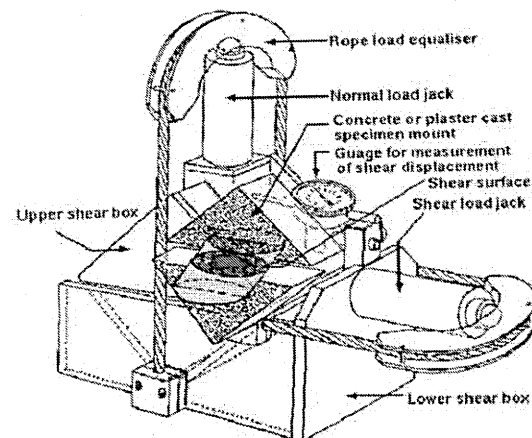
2 KORÁBBI ISRM ELŐÍRÁS (1974):

Az alábbiakban bemutatott módszer az 1974 és 2006 között használt metódus a kőzetek nyírószilárdságának laboratóriumi meghatározására irányult.

A teszt során a kőzet maximális nyírószilárdsági értékét, valamint az alkalmazott normálerő függvényében a reziduális szilárdságot kapjuk meg. A kiértékelt adatok különböző területeken felhasználhatóak, akár egyensúlyi, akár stabilitási vizsgálatokhoz.

A kőzetek nyírószilárdságát a kőzettömb szerkezetének figyelembe vételével kell vizsgálni, a nyírószilárdságot a különböző gyengített felületeken, tagoltságok, réteghatárok mentén ajánlott értékelni. A gyenge síkokat már a próbatésk bekészítésénél figyelembe kell venni, a terhelést ezek mentén kell végrehajtani. Az eddigi előírás egy próbatésk azonos felületén legalább öt vizsgálatot írt elő, különböző konstans normálerők mellett.

A próbatésk készítéséhez a zavartalan magmintákból megfelelő méretű, lehetőleg a tagolt felületet tartalmazó mintát kell vágni, ügyelve a mechanikai sérülések elkerülésére és a víztartalom megőrzésére. A nyírás sík lehetőleg négyzetes és legalább 2500 mm² nagyságú felületben volt meghatározva. A felületek bedolgozás közbeni mozdulatlanágát szalaggal biztosították, a bedolgozáshoz általában cementhabarcsot használtak. A nyírás sík lehetőleg vízszintes, mindkét oldalán legalább 5 mm távolságra kell legyen a rögzítő habarcsból. A nyíródoboz sématis rajzát mutatja az 1. ábra.



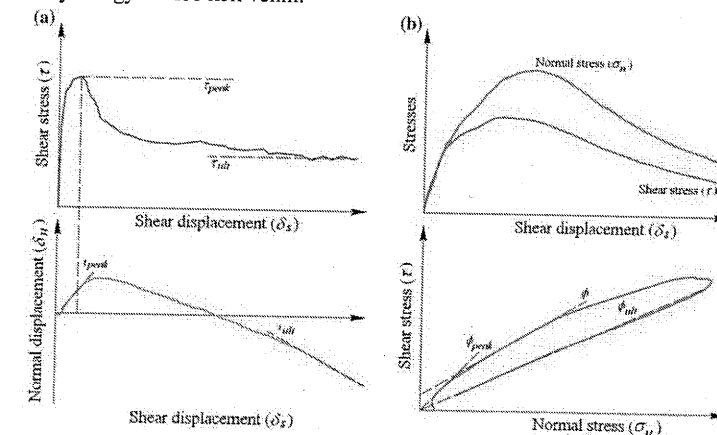
1. ábra: Nyíródoboz sématis rajza (Schematics of a shearbox) (www1)

A megfelelően elkészített próbatésket a szilárdulás után a nyíródobozba bekészítve a terhelés során alkalmazott normálerővel konszolidáltatni kell, a normálerő hatására bekövetkezett elmozdulás, valamint az eltelt idő feljegyzése mellett. A konszolidáció befejeződött, ha az elmozdulás változása lassabb, mint 0,05 mm/10 perc. A próbatésk ekkor terhelhető nyíróerővel. A nyíróerő növelése többféleképpen történhet: folyamatosan, az erő növelésének a sebességét szabályozva, vagy meghatározott lépésekkel növelve azt. A növelés sebessége nem lehet nagyobb, mint 0,1 mm/perc, de maximálisan 0,5 mm/perc a megengedett, ha így is le lehet olvasni a csúcserőértéket. Agyagtalajokban a csúcshilárdság eléréséhez szükséges idő nem lehet kisebb, mint a konszolidációhoz szükséges idő hatszorosa. A csúcshilárdság elérése után 0,5-5 mm-es nyíróelmozdulásoknál kell megtenni a leolvasásokat, maximum 1 mm/perc sebességű nyíróelmozdulás-növelés mellett. A reziduális szilárdságot elértnek tekintjük, ha konstans normál erő mellett legalább négy egymás utáni mérés 5%-nál kisebb eltérést mutat az 1 cm nyíróelmozdulás kialakulásához szükséges nyíróerő értékében. A reziduális érték elérése után a normálerő növelhető, vagy csökkenthető. Az új normálerő mellett szintén konszolidáltatni kell a próbatésket.

3 A 2014-ES ELŐÍRÁS:

A nyírószilárdság laboratóriumi körülmények között történő meghatározására vonatkozó új, 2014-es ISRM előírás jóval részletesebb, mint az 1974-ben megjelent változat. Összefoglalja a tagoltság fogalmát, valamint jelentőségüket az építőmérnöki gyakorlatban, továbbá ismerteti a tagoltság menti nyírószilárdság laboratóriumban történő meghatározására vonatkozó előírásokat, számítási módszereket.

A 2014-es változat a 2007-ben megjelent verzió feldolgozása és kibővítése, amely már a technológiai újítások figyelembe vételével készült. Az előírások lefedik az állandó normálirányú terhelés és az állandó normálmerevség mellett végzett laboratóriumi közvetlen nyírókísérletek követelményeit, valamint a vizsgálat folyamatát. A vizsgálat ezen típusára csúszó súrlódási vizsgálatként is utal a szakirodalom. Az előírás csak a tagoltságok kvázi-statisztikus nyírószilárdságának meghatározására vonatkozik, a ciklikus és dinamikus nyírásvizsgálatokra nem terjed ki. Csak olyan (nyílt vagy majdnem zárt) tagoltságokkal foglalkozik, amely elhanyagolható húzószilárdsággal rendelkeznek, így az ép kőzet vagy mesterséges tagoltságok (például kőzet-beton határfelület) vizsgálatára nem vonatkozik. Nem terjed ki továbbá olyan kitöltött tagoltságok nyírószilárdságának meghatározására, ahol az in-situ pórusvíz-nyomás viszonyait figyelembe kell venni.



2. ábra: Állandó normálirányú terhelés (a) és állandó normálmerevség mellett végzett tagoltsági nyírószilárdsági vizsgálatok eredményeként kapott jellemző görbék (Typical plots from a rock joint shear test under constant normal loading conditions (a) and under constant normal stiffness conditions (b)) (ISRM 2014)

Az új előírás megkülönböztet állandó normálirányú terhelés, illetve állandó normálmerevség mellett végzett vizsgálatokat. Előbbi nem igazán a tagoltság szilárdságát határozza meg, hanem adott normálerő mellett a nyírás ellenállást, ugyanakkor bizonyos peremfeltételek mellett alkalmas lehet tervezési célokra. Az állandó normálmerevség mellett végzett vizsgálati eljárás a tagoltság maximális nyírószilárdságának meghatározására szolgál, és bár nem veszi figyelembe, a normálmerevség dilatáció következtében történő valószínűsíthető emelkedését, sokkal inkább használható nem síkbeli tagoltságok nyírás viselkedésének modellezésére.

Állandó normálirányú terhelés mellett végrehajtott vizsgálatok esetében általában különböző nagyságú, állandó normálirányú terhelések alkalmazunk több, azonos tagoltságból vagy vizsgálati síkról származó mintán, és mérjük a nyírófeszültség, valamint a normál- és nyíróelmozdulás nagyságát. Legalább három, de inkább öt, hasonló tulajdonságokkal rendelkező mintán, azonos irányban kell elvégezni a vizsgálatot.

Amennyiben nem áll rendelkezésre elegendő darabszámú minta, az új előírás megengedi, hogy egy mintán többször is végrehajtsuk a kísérletet, különböző normálirányú terhelési feltételekkel. Egy tagoltsághoz legalább három, de inkább öt különböző normálerő alkalmazása szükséges. Ez a többlépcsős eljárási módszer azonban csak abban az esetben alkalmazható, amennyiben a tagoltság felületének törése vagy leromlása csak minimális mértékben következik be. Annak érdekében, hogy a károsodás hatását minimalizáljuk, minden lépcsőnél magasabb normálterhelést kell alkalmazni, mint az azt megelőzőnél.

Az előírás a korábbihoz hasonlóan leírja, hogy milyen berendezéssel végzendők el a kísérletek. Az 1974-es változathoz képest azonban sokkal inkább részleteibe menően írja le a használandó berendezést, kitérve annak részeire, a terhelő berendezések, a mérőműszerek követelményeire, pontosságukra. Az új verzió nem ír elő nagyobb pontosságot, mint az 1974-es, mind a normálerők, mind pedig a nyíróerők értékének fenntartását és az adatok rögzítését $\pm 2\%$ -os pontossággal kell elvégezni. A technológia előrehaladását jelzi például, hogy a számítógépes adatrögzítés gyakoriságát is meghatározza, minimum 1 Hz-es értékben.

A korábbi változathoz képest újdonság, hogy a 2014-es ISRM előírás jóval részletesebben tárgyalja a nyírószilárdsági vizsgálatokhoz alkalmazott mintával szemben támasztott követelményeket. Kitér a mintavétel, a minta kezelésének és tárolásának körülményeire is, jöllehet a lényegi előírások (úgy, mint a befogáshoz megfelelő méretekkel rendelkező minta vétele, a minta víztartalmának megóvása, a tagoltság mentén történő elmozdulások megakadályozása, stb.) gyakorlatilag nem változtak, csak bővültek. A minta alakjával szemben jóval megengedőbb az új előírás. Míg az 1974-es változat inkább négyzet alakú nyírási felületet részesít előnyben, addig a 2014-es előírás már bármilyen nyírási felületet megenged, aminek méretét megfelelő pontossággal meg lehet határozni. A minta magassága logikusan nagyobb kell legyen, mint a nyírási zóna vastagsága, és elégséges ahhoz, hogy a befogás biztosítható legyen. A nyírási felület hossza meg kell haladja az érdesség legnagyobb magasságának 10-szeresét. A nyírási sík szélessége legalább 48 mm legyen, és a nyírási hossz mentén nem változhat jelentősen, a maximálisan a legnagyobb szélesség 75%-áig csökkenhet le.

A tagoltság minden tulajdonságát, amely befolyásolhatja a nyírószilárdságot, le kell jegyezni, mindkét felületről fényképet kell készíteni a vizsgálat előtt és után, hogy ismerjük az érdességet és annak leromlását. Ezen felül a névleges keresztmetszeti felületet is szükséges lemérni.

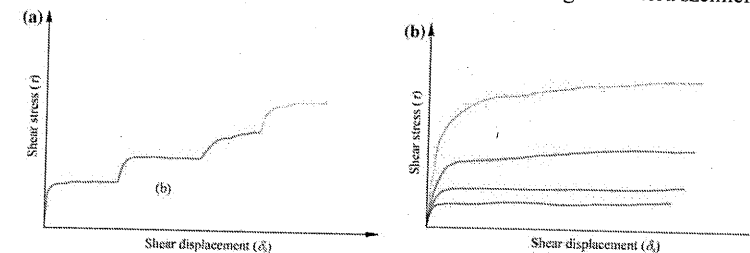
Mivel a minta általában nem idomul a nyíródoboz alakjához, a befogást valamilyen segédanyag (cementhabarcs, műgyanta, stb.) kell biztosítani. Ez lehetővé teszi a tagoltság beállítását és rögzítését a nyírási síkba. Az új előírás részletesen leírja a befogás menetét, az eljárás gyakorlatilag megegyezik az 1974-es változatban közölt folyamattal. A befogás után a tagoltság és a nyírási sík párhuzamossága ellenőrizendő.

A 2014-es előírás a korábbihoz hasonlóan leírja a vizsgálati eljárás menetét, azonban ebben is jóval részletesebb ajánlást tesz, mint a régebbi változat, amelyben a mintával szemben támasztott követelményeket a vizsgálat menetének leírása foglalja magában.

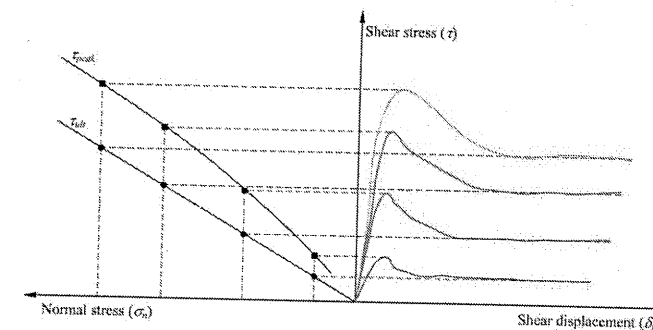
A vizsgálat megkezdése előtt fontos tisztázni, hogy milyen normálirányú terheket kell működtetni a szóban forgó tagoltságtól függően, továbbá szükséges a mérőműszerek megfelelő kalibrálása. A minta behelyezése után a méréshez elegendő számú mérőműszert kell felszerelni, amelyek mérési tartománya megfelel a vizsgálat során fellépő feszültségek, elmozdulások nagyságának.

A terhek alkalmazását is részleteiben tárgyalja a 2014-es verzió, ugyanis a korábbiakhoz képest ebben hoz új előírásokat, változtatásokat. A normálirányú terhelést a kívánt normálterheltség eléréséig fokozatosan kell ráadni a mintára, miközben rögzíteni kell a normálirányú elmozdulásokat. A terhelés sebességét úgy kell megválasztani, hogy a terhelés körülbelül 5 percig tartson, vagyis hozzávetőlegesen 0,01 MPa/s a megfelelő. A normálerő vagy normálmerevség adott szinten történő tartását vizsgálat közben folyamatosan ellenőrizni kell. A nyírási megkezdése előtt ki kell várni a pórusvíznyomás leépülését, valamint a normálmerevség stabilizálódását. A nyírófeszültséget ezután a kiválasztott nyíróelmozdulási sebességnek megfelelően kell működtetni egészen a maximális vagy a reziduális nyírószilárdság eléréséig. Ehhez általában a tagolófelület hosszának mintegy 5-10% -ának elérésével következik be. A megfelelő elmozdulási sebesség körülbelül 0,1-0,2 mm/perc, amit a maximális nyírószilárdság elérése után 0,5 mm/percre lehet emelni. Agyagos felületek esetén előnyösebb alacsonyabb sebesség alkalmazása.

A 2014-es előírás alternatív változatokat is kínál a vizsgálat végrehajtásához. Két különböző módszert ismertet: az egyszerű nyírásvizsgálatot, valamint a lépcsős nyírási eljárást. Mindkét változat elvégezhető állandó normálirányú terhelés és állandó normálmerevség alkalmazása mellett. Az egyszerű nyírásvizsgálat esetében több mintán különböző nagyságú normálterhelések alkalmazásával végezzük el a vizsgálatot, miközben mérjük a nyírófeszültséget és az elmozdulásokat. Lépcsős terhelés alkalmazása esetén különböző normálterhelések mellett egyazon minta terhelését végezzük el. Egy vizsgálat során három, de inkább öt normálerő alkalmazása szükséges, a nyírást pedig mindig azonos irányban kell elvégezni. A lépcsős terhelési módszer kétféle eljárással is megoldható: vagy visszahelyezzük a tagoltságot az eredeti természetes helyzetébe minden lépcső után, vagy pedig nem végezzük el a visszahelyezést, csak a normálerő emelését. A két eljárás közti különbséget a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: Lépcsős terhelés eredményei a tagoltság visszaállítása nélkül (a) és a tagoltság visszaállításával (b) (Results of multi-stage shear tests without repositioning (a) and with repositioning (b)) (ISRM 2014)



4. ábra: Maximális és reziduális nyírófeszültség számítása (Evaluation of the peak and residual shear stresses) (ISRM 2014)

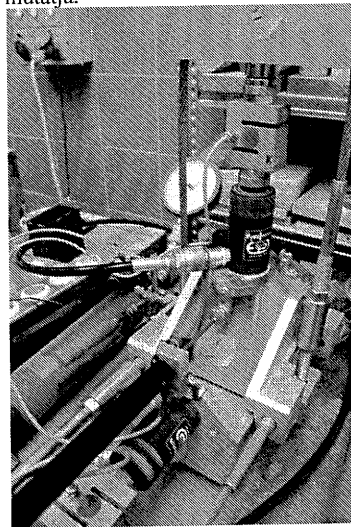
Az előírás részletezi az adatrögzítés követelményeit, nagyrészt az előző szakaszban leírtakat ismételve. A korábbi változathoz hasonlóan ismerteti az elvégzendő számításokat, az eredmények grafikus megjelenítésnek és értékelésének módszereit, követelményeit. A feldolgozás eredményeként szükséges előállítani a nyírófeszültség – nyíróelmozdulás, a normálmerevség – nyíróelmozdulás grafikont, valamint állandó normálmerevség mellett végzett vizsgálat esetében a normálirányú terhelés változását a nyíróelmozdulás függvényében. Ezen felül kirajzolható még a normálterheltség – normálmerevség összefüggése is. Az eredmények alapján ki kell számítani a maximális és a reziduális nyírószilárdság értékeit. Számítható továbbá a dilatációs szög, valamint a törési kritérium szilárdsági paraméterei. Érdes felületek esetében előállítandó a Patton-féle i érték vagy pedig a Barton és Choubey-féle JRC értéke.

Az előírás továbbá ismerteti az eredmények közlésének követelményeit, a szükséges adatokat, diagramokat, valamint a közléshez nem szükséges, de kérésre átadandó eredményeket és leírásokat. A korábbiakhoz képest újdonság, hogy a 2014-es előírás tartalmazza az egyes fogalmak magyarázatát, illetve a hivatkozott irodalmak jegyzékét. A maximális és reziduális nyírófeszültség számítását mutatja be a 4. ábra.

4 VIZSGÁLAT ELRENDEZÉSE

A vizsgálatok végrehajtásához a Controls-group által gyártott nyíródobozt használtuk, melynek tartozékai a nyíródoboz alsó és felső része mellett a két, kézzel működtethető, nyomásmérő órával ellátott hidraulikus pumpa, a normál és a nyíróerők növeléséhez. A függőleges terhet adó pumpához kapcsolo-

lódik egy nyomástartó cella is, a konstans normálerő biztosíthatósága érdekében. A nyíródoboz felső fele mozdul el, az alsó, fix részhez kapcsolt erőmérő cella méri a nyíróerőt, a függőlegesen rögzített hasonló cella pedig az alkalmazott normál erőt. A vízszintes elmozdulásokat 100mm-es elmozdulásmérővel, a függőlegeseket 10 mm-essel mértük. Az erőmérő cellák és az elmozdulásmérők egy Spider adatrögzítő egységhez kapcsolódnak, amely végzi az adatok rögzítését és feldolgozását. A vizsgálati elrendezést az 5. ábra mutatja.



5. ábra. Vizsgálati elrendezés (Test set-up)

5 PRÓBATESTEK BEKÉSZÍTÉSE

A vizsgálat alapjául szolgáló próbatestek 100 mm-es magmintából kerültek elkészítésre. A levágott, megtisztított mintát a sablonba helyeztük, úgy, hogy a nyírandó felület a lehető legvízszintesebben helyezkedjen el. A minta megfelelő helyzetét hungarocellba ágyazással biztosítottuk. Mivel tagoltságok menti nyírószilárdságot vizsgáltunk, a minta két felét a nyírási síkra merőlegesen szalaggal rögzítettük egymáshoz, amit a vizsgálat előtt eltávolítottunk a nyírási síkról. Mivel a cementhabarcs szilárdulása közben jelentős vízmennyiséget vesz fel, ezért a víztartalom változására érzékeny kőzetek esetében fóliatakarással védtük a mintát a habarcsból. Az elkészült próbatestek felületének érdességét minden esetben Barton-fésszűvel meghatároztuk, illetve fotóval dokumentáltuk a felületet a terhelés előtt és után.

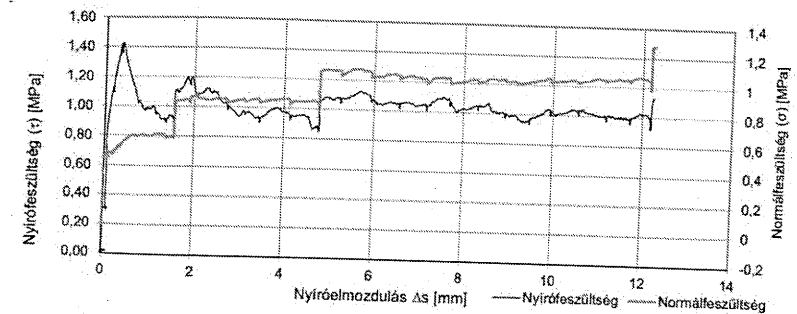
6 ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

Az ISRM 2014-es előírás alapján több kőzettípuson, eltérő érdességű felületeken végeztünk különböző közvetlen nyírószilárdsági vizsgálatokat. A vizsgálatok során a lépcsős eljárást alkalmaztuk, vagyis a konstans normál erőt a reziduális szilárdság elérése után több lépésben növeltük. A vizsgálatok során a mintát nem helyeztük vissza eredeti helyére, így a korábban ismertetett 3.a ábrához hasonló eredményeket vártunk. A vizsgálatok eredményeit a következő ábrák ismertetik.

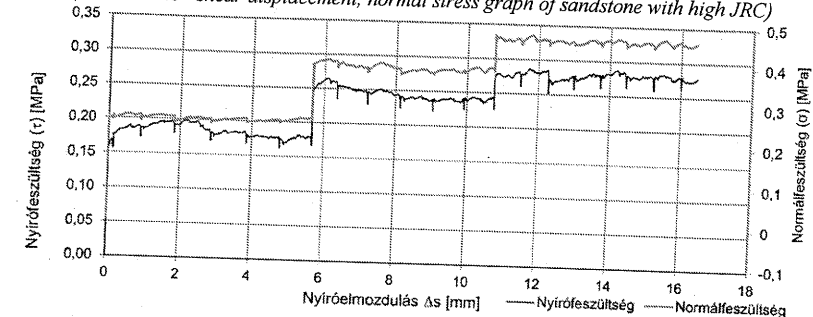
A 6. ábrán ábrázolt méréshez tartozó minta nyírási felületének JRC értéke 16 volt. A nagy felületi érdesség miatt kialakult csúcshozzáérték nem minden esetben mérhető, az az érdes felület fogazatának nyírószilárdságát jellemzi. A maximális szilárdság kialakulása után látható a reziduális szilárdsági értékek kialakulása, amelyek már a fogazott felület kisimulása utáni felületet jellemzik. A normál erőt ezek kialakulása után növeltük meg.

A 7. ábrán egy puha agyagmárgából származó, közel sík nyírási felületű minta nyírófeszültség-nyíróelmozdulás ábrája látható. A nyírt felület felületi érdessége JRC = 2 volt. A sík felület miatt, az előző mintával ellentétben itt nem tudott csúcshozzáérték kialakulni, csak a különböző normál erőhöz trtozó reziduális értékek láthatók. A 8. ábrán szintén hasonló kőzetminta vizsgálata során kapott grafikonok láthatóak. Szintén nem alakult ki maximális nyírófeszültség az alacsony (JRC = 2) felületi érdesség miatt. A második minta esetében, mivel agyagos kőzetről volt szó, lassabb terhelési sebességet alkalmaztunk, így könnyebben észlelhető volt a reziduális érték kialakulása, a normál erőt többször tudtuk növelni.

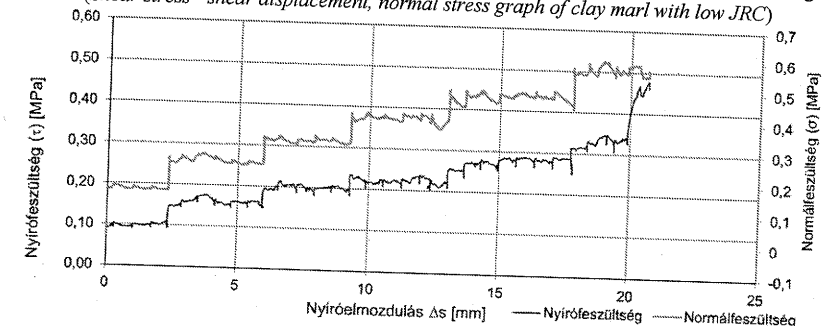
Nyírószilárdsági vizsgálat



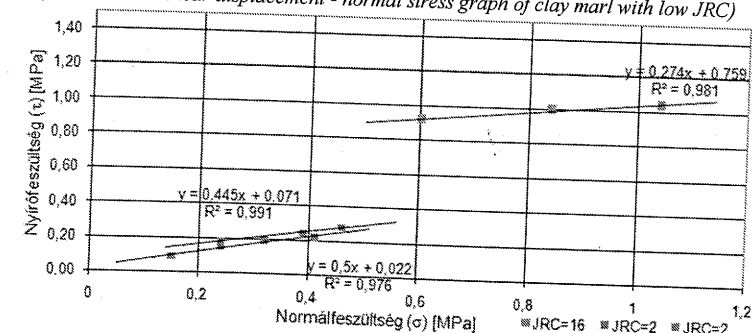
6. ábra Nagy érdességű homokkővön végzett mérés nyírófeszültség - nyíróelmozdulás - normálerő diagramja (Shear stress - shear displacement, normal stress graph of sandstone with high JRC)



7. ábra Sima felületű agyagmárgán végzett mérés nyírófeszültség - nyíróelmozdulás - normálerő diagramja(1) (Shear stress - shear displacement, normal stress graph of clay marl with low JRC)



8. ábra Sima felületű agyagmárgán végzett mérés nyírófeszültség - nyíróelmozdulás - normál erő diagramja(2) (Shear stress - shear displacement - normal stress graph of clay marl with low JRC)



9. ábra Bemutatott minták reziduális értékeihez tartozó Normálfeszültség - Nyírófeszültség értékek és a rájuk illesztett trendvonalak (Normal stress - Shear stress values and their trendlines of the presented samples)

A bemutatott minták normálfeszültség-nyírófeszültség ábráit a 9. ábra mutatja be. A 9. ábrán jól elkülönülnek a különböző JRC értékekhez tartozó reziduális feszültségpárok. A rájuk illesztett lineáris trendvonal meredeksége adja meg a reziduális belső súrlódási szöget (ϕ_r), az y tengely menti eltolódás pedig a kohéziót. Az alacsony JRC-vel rendelkező minták esetében a kohézió elhanyagolható nagyságú.

A tagoltság menti közvetlen nyírószilárdsági vizsgálat legnagyobb problémája, hogy az alacsony érdességű felületek vizsgálatakor csak reziduális szilárdságot tudunk meghatározni, valamint a durva felületek esetén is csak egy csúcshozzáérték értéket kapunk egy vizsgálat alapján, ami nem tekinthető reprezentatív értéknek a tagoltságra nézve. A maximális nyírószilárdság meghatározásához ugyanazon tagoltság mentén vett legalább öt minta vizsgálatára van szükség, ami időigényes és költséges eljárás. Ez kiküszöbölhető a Barton & Choubey (1977) által ajánlott képlettel ((1) egyenlet), amely a felületi érdesség (JRC), a tagoltság menti nyomószilárdság (JCS) és a reziduális belső súrlódási szög (ϕ_r) ismeretében adja meg a nyírószilárdságot (τ) a normálfeszültség (σ_n) függvényében.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JCR \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A mérnökgeológiai problémák esetében sokszor kiemelten fontos a tagoltság menti nyírószilárdság ismerete. Meghatározására azonban napjainkig nem készült szabványosított matematikai eljárás vagy laboratóriumi vizsgálat. A Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság ajánlása lehetővé teszi a tagoltság menti nyírószilárdság vizsgálatok egységes kivitelezését. Az egyre frissülő ajánlások jól lekövetik a vizsgálati technológiák színvonalának fejlődését, és lehetőséget adnak modernebb, alternatív vizsgálati módszerek alkalmazására. A lépcsős terhelési eljárás lehetővé teszi, hogy egy mintán több vizsgálat is elvégezhető legyen, így egyrészt csökkenthető a mintavételek száma, illetve kiküszöbölhető az alacsony mintaszámból származó elégtelen mennyiségű mérési eredmény problémája. Egy minta felhasználásával több reziduális érték is meghatározható, amelyből számítható a maximális érték, így anélkül, hogy a nagyobb mennyiségű eredmény elegendő nagyságú adathalmazt kínálhat a statisztikai értékeléshez is. A többlépcsős terhelési módszer tehát költségkímélőbb vizsgálat, ugyanis a mintavétel számának csökkentésén felül a vizsgálatokra fordítandó idő is minimalizálható, mivel a minták beépítése jóval kevesebb időt vesz igénybe a kapott eredmények mennyiségéhez képest, mint a hagyományos eljárás esetében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megírását az NTP-EFÖ-P-15-0198 számú pályázat támogatta. Köszönet az Emberi Erőforrások Minisztériumának, az Emberi Erőforrások Támogatáskezelőnek és a Nemzeti Tehetség Programnak.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Buocz, I., Görög, P., Rozgonyi-Boissinot, N., Török, Á. (2012): Közzettestek közvetlen nyírószilárdsági vizsgálata a Bataapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló közeteinek példáján bemutatva. In: Török, Á., Görög, P. (szerk.): *Kőzetmechanika és kőzetkörnyezet szerepe a radioaktív hulladéklarakok kialakításánál*, Budapest: TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., 2012. pp. 123-136.
- Gálos, M., Vásárhelyi, B. (2006): *Közzettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban*, Műszaki Egy. Kk., 144.
- Goel, R. K., Singh, B. (2011): *Engineering Rock Mass Classification*, Elsevier, 1-382.
- Hencher, S. (2012): *Practical Engineering Geology*, Spon Press, New York, 1-467.
- ISRM 1974. Franklin, J. A., Kanji, M. A., Herget, G., Ladanyi, B., Drozd, K., Dvorak, A., Egger, P., Kutter, H., rummel, F., Rengers, N., Nose M., Thiel, K., Peres Rodrigues, F., Serafim, J. L., Bieniawski, Z. T., Stacey, T. R., Muzas, F., Gibson, R. E., Hobbs, N. B., Coulson, J. H., Deere, D. U., Dodds, R. K., Dutro, H. B., Kuhn, A., K., Underwood, L. B. (1974): *Suggested Methods for Determining Shear Strength*, International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, No. 1, 131-140.
- ISRM 2014. Muralha, J., Graselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chrysanthakis, P., Yu, J. (2014): *ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version*, Springer-Verlag Wien, 291-302.
- www1: <http://homepage.usask.ca/~mjr347/prog/geoe118/images/geotoy.gif>