

A töréses tönkremenetel keletkezésének és fejlődésének azonosítása rideg kőzetek laboratóriumi mérése során

Investigation of the crack initiation and propagation on the brittle rocks in laboratory tests

Deák Ferenc

MVM PaksII Atomerőmű fejlesztő Zrt., deakf@mvmpaks2.hu

Kovács László

Kőmérő Kft., kovacsolaszlo@komero.hu

Vászárhelyi Balázs

PTE, Pollack M. Műszaki és Inf. Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tsz. vasarhelyib@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Jelen cikk a Bábaapáti Nemzeti Radioaktív hulladék-tárolót befogadó kőzettest monzogranit és monzonit laboratóriumi kőzetmintáin kétirányú nyúlásmérő bélyeges deformációméréssel elvégzett egytengelyű nyomószilárdság mérések új szempontú mérési módszerét és értelmezését mutatja be. A mérések során a rideg tönkremenetel jellegzetes károsodási szakaszait és azok határértékeit a felvett terhelés – deformáció (σ - ϵ) diagram specális kiértékelésével határoztuk meg. A laboratóriumi kőzetmintákon így meghatározott határértékek nagy fontossággal bírnak, hiszen a vizsgálatból egyrészt megállapítható, hogy igazán ép kőzetmintával dolgoztunk-e. Az ép minták adatainak további kiértékelésével következtethetünk a kőzettest rideg károsodásának folyamatára is, ami új lehetőségeket teremt az üregnyitás során, illetve azt követően a kőzetköpenyben bekövetkező tönkremeneteli folyamatok kvantitatív elemzésére. A Bábaapáti kis és közepes radioaktív hulladék-tároló projektet az RHK Kft. (Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.) irányítja.

ABSTRACT: The goal of this paper is to present the new analysis method of the uniaxial compressive tests, carried out on monzogranite and monzonite rock samples from the Bábaapáti Radioactive waste repository. During the laboratory tests both horizontal and vertical strain were measured by strain gauges with the stress and the data continuously were analyzed. The limit of crack closure, initiation and propagation (both stable and unstable) were determined. These parameters are very important for the safety tunnel design in brittle rocks.

Kulcsszavak: Egytengelyű nyomószilárdság, CI, CC, CD, Bábaapáti

Keywords: Uniaxial compressive test, crack closure, crack propagation, Bábaapáti

1 BEVEZETÉS

A rideg anyagok károsodásával kapcsolatos legelfogadottabb tapasztalati elméletet tömören az 1. ábra szemlélteti. Az ábrán Derek Martin (1993) egy Lac du Bonnet gránit mintán végzett triaxiális kísérlet adatait ábrázolta és ezen mutatja be a rideg, mikro-repedezéssel károsodó anyagok károsodási folyamatának jellemző szakaszait. A szakaszok elkülönítéséhez megbízhatóan mérni kell az axiális és laterális irányú deformációkat és hasznos mérni az akusztikus emissziót is. Ez utóbbit a mikrorepedések megjelenése eredményezi, pontosabban ezek a mikrorepedés kinyílásakor a lokális feszültség-relaxációt kísérő hangeseeményekkel hozható összefüggésbe. A kísérlet során ezek számát vagy intenzitását mérhetjük. Az ábrán a jobb oldali alsó grafikon felső részén az ϵ_a tengelyirányú deformáció függvényében az

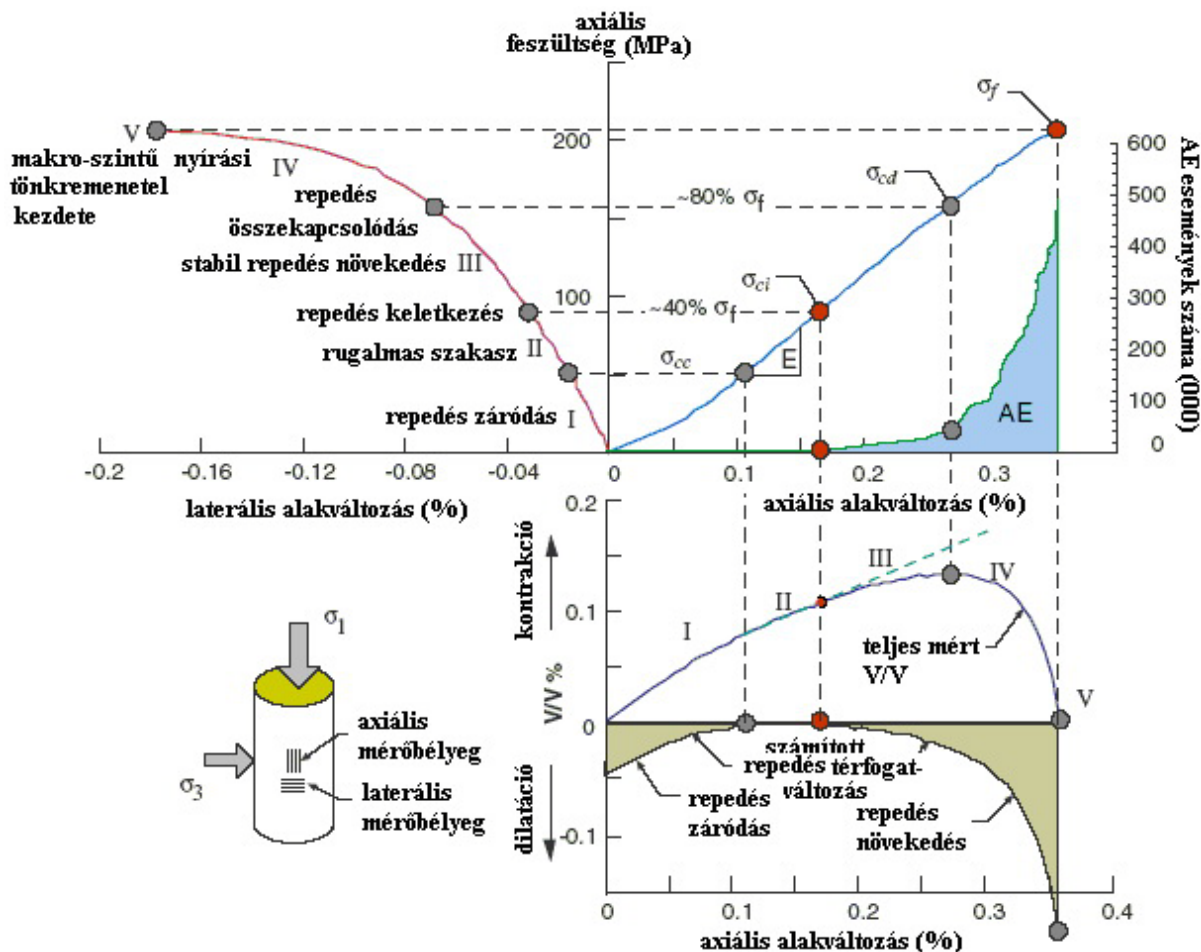
$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_l \quad (1)$$

teljes térfogatváltozást láthatjuk. Ebből a rugalmas deformációnak köszönhető térfogatváltozás levonásával adódik az

$$\varepsilon_{CV} = \varepsilon_V - \varepsilon_{EV} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cv} = \varepsilon_v - \frac{1-2\nu}{E} \sigma_a \quad (3)$$

repedéstérfogat, vagy más néven *dilatáció*. Itt ν a Poisson-tényező, E a Young-modulus, σ_a pedig a tengelyirányú (axiális) feszültség. Egytengelyű összenyomás esetén a tönkremenetelig négy szakaszt különböztethetünk meg.



1. ábra. Rideg anyagok károsodásának összefoglalása Martin és Chandler (1993) szerint (ábra Cai 2010-ből). Gránit triaxiális összenyomásakor a tengelyirányú deformáció függvényében a teljes és repedéstérfogat változása (lent) és a feszültség (jobbra fent), illetve az oldalirányú deformáció függvényében a feszültség (balra fent). A kék terület az mikrorepedezésre jellemző akusztikus emisszió intenzitás adatok (beütésszám) láthatóak. A mérést a baloldalt alul látható sématis ábra mutatja.

1.1 I. szakasz: Mikrorepedések záródása (CC határérték)

Terheletlen állapotból a repedéstérfogat csökkenésének befejeződéséig tart. A feszültség-axiális deformáció görbe konvex, a minta térfogata növekszik, de kevésbé, mint a rugalmas összenyomódás miatt kellene. A mikrorepedések záródása nem jár zajjal, azaz akusztikus emisszió gyakorlatilag nincs. A tartomány határát a repedészáródási határfeszültség (σ_{cc}) jellemzi.

1.2 II. szakasz: Lineárisan rugalmas tartomány (CI határérték)

Az a terhelési szakasz, ahol a repedéstérfogat állandó marad. A feszültség mind az axiális, mint a laterális deformáció függvényében lineáris, hangkibocsátás nincs. A tartomány felső határát a repedésnyílási határfeszültség (σ_{ci}) jellemzi.

1.3 III. szakasz: Stabil repedésterjedés tartománya (CD határérték)

A repedéstérfogat csökkenésének kezdetétől, illetve az akusztikus emisszió megindulásától a teljes térfogatváltozás maximumáig tart. A feszültség az axiális deformáció függvényében lineáris, a laterális deformáció függvényében viszont már nem. A tartomány határát a károsodási határfeszültség (σ_{cd}) jellemzi. Más kísérletek azt mutatják, hogy a feszültség növelését a tartomány határain belül megállítva a károsodás folyamata megállítható, azaz a repedezés a feszültséget állandó szinten tartva nem folytatódik, az anyag hosszabb idő alatt sem megy tönkre. Innen a tartomány elnevezése.

1.4 IV. szakasz Instabil repedésterjedés tartománya (UCS)

Ez a szakasz a teljes térfogatváltozás maximumától a tönkremenetelig tart. Rideg anyagoknál a tönkremenetel gyors, nincs képlékeny, illetve puhuló átmenet. A feszültség az axiális deformáció függvényében gyakorlatilag a tönkremenetelig lineáris marad. A laterális deformáció függvényében viszont egyre inkább a vízszintes felé hajlik, amit a mintatengelyre merőleges felületirányú repedések kinyílásával szokás magyarázni. Ebben a tartományban a mikropedések összeolvadása és nagyon erőteljes akusztikus emisszió figyelhető meg. A feszültség növekedését megállítva és állandó értéken tartva a tönkremenetel előbb utóbb bekövetkezik.

Megjegyezzük, hogy a fenti tartományok megkülönböztetése csak az axiális és laterális deformációk egyidejű és pontos mérésével lehetséges. Ez a károsodási folyamat nincs teljesen elméleti modellel alátámasztva, ezért több ponton hipotetikus. Bonyolultabb anyagviselkedést ír le még Ván et al., és Ván (2001).

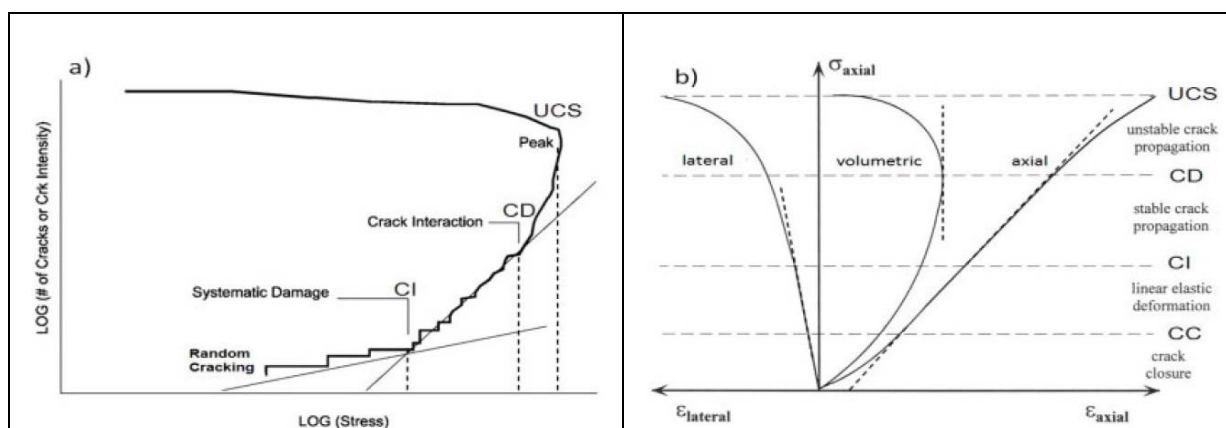
A fentebb említett elmélet alapján tárgyalható a közetmechanikában nagy fontossággal bíró „spalling” (lepattogzás vagy kipergés) jelensége is.

Az ISRM Comission on Spalling Prediction (Bizottság a lepattogzás előrejelzésére) elhatározta, hogy szabványosítja az eljárást a laboratóriumi egytengelyű nyomószilárdság méréseknél, valamint az alagúthajtás esetében. Az ISRM EUROCK2010 konferencián Diederich és Martin (Diederich et al. 2010) mutatták be az ajánlásukat, összefoglalva eddigi tapasztalataikat, ugyanakkor a szabványosítás előtt ajánlást tettek az azt megelőző további kutatásokra. Az ISRM EUROCK2012 konferencián már ezen ajánlások figyelembe vételével újabb összefoglaló cikk jelent meg (Perras et al. 2012). Végül jelen cikk szerzői a Bátaapáti projekt eredményeit röviden az ISRM EUROCK2013 konferencián mutatták be, igazolva a módszer szükségességét az alkalmazott kutatásokban (Deák et al. 2013).

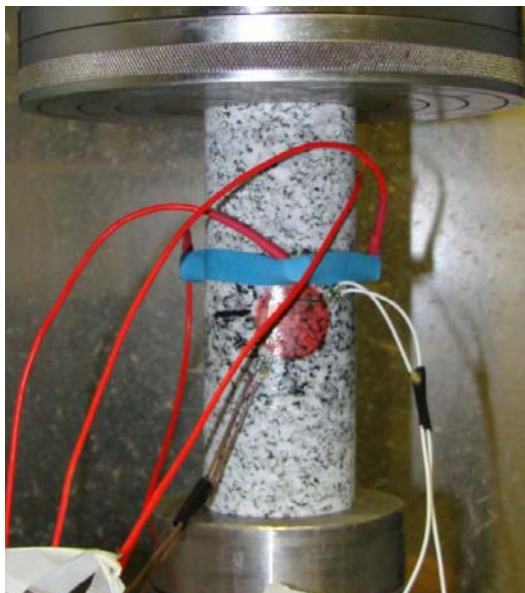
Az említett munkáknak az alagutak tönkremenetelére vonatkozó megfontolásait az EDZ zónákat tárgyaló cikkünkben fejtjük ki bővebben.

2 A MÉRÉSEK KIVITELEZÉSE ÉS ÉRTÉKELÉSE

Laboratóriumi mérések során a CC, CI és CD határértékek meghatározására legnagyobb biztonsággal a mérőbéllyegek és az akusztikus emissziók vételére szolgáló transzducerek együttes használatával van lehetőség (Diederich et al. 2012 és Ghazvinian et al. 2011) (2. és 3. ábra).

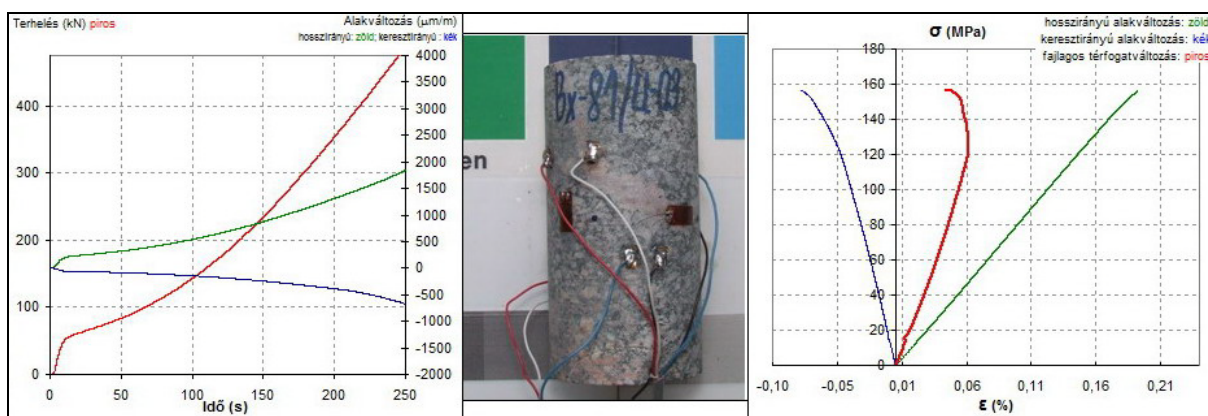


2. ábra. Tönkremenetel észlelése a) akusztikus emissziók és b) alakváltozás mérések felhasználásával (Diederich et al. 2010)



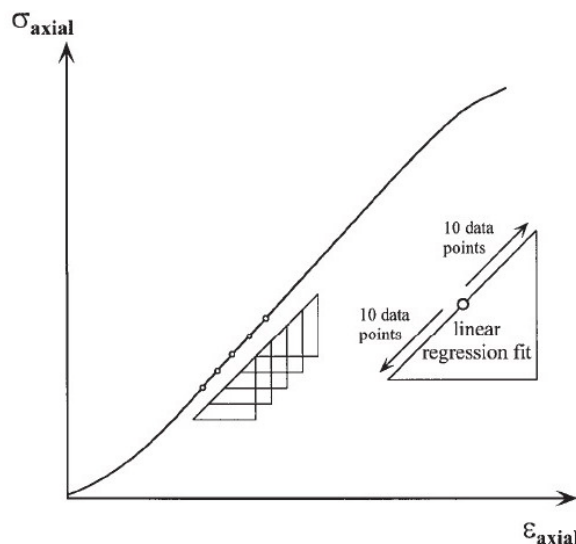
3. ábra. Gránit mintatest előkészítve UCS (egytengelyű nyomószilárdság) mérésre akusztikus emisszió érzékelőkkel és hossz- és keresztirányú nyúlásmérő bélyegekkel (Ghazvinian et al. 2011)

Az ajánlások alapján a Kőmérő Kft. Kőzetmechanikai laboratóriumában korábban elkészült mérőbélyeges UCS mérések közvetlenül alkalmasnak bizonyultak arra, hogy azok eredményeit a fentiek szerint újraértékeljük. Mivel a tesztek során nem történtek akusztikus emisszió mérések, a számításokat az axiális és laterális irányban elhelyezett nyúlásmérő bélyeg-párok adatsorai alapján végeztük el (4. ábra). Az újraértékelés eredményeként nem csak a CC, CI és CD határértékek voltak számíthatók, hanem az elméletileg csak a lineárisan rugalmas tartományban értelmezhető Poisson-szám és Young-modulus értékeket is pontosabban, immár valóban a II. jelű szakaszra állapíthattuk meg.



4. ábra. A Kőmérő Kft. laboratóriumában mért elvégzett mérőbélyeges UCS (egytengelyű nyomószilárdság) mérés eredményeinek megjelenítése (bal oldalon: a teszt során mért erő- és deformációértékek idősorai; középen: a vizsgált mintatest fotója; jobb oldalon: σ - ϵ , illetve σ - ϵ_v diagram)

Az eredmények újraértékelése során a számításokat az Excel program segítségével automatizáltuk. Eberhardt és Martin (Eberhardt et al. 1998, Diederich et al. 2010 és Martin 1993) útmutatásait használva a következő módon számoltuk ki a határértékeket: a CC határértéket a hosszirányú alakváltozás lineáris szakaszának alsó pontjánál, a CI határértékét a keresztirányú alakváltozás lineáris szakaszának felső értékénél határoztuk meg. Az említett lineáris szakaszokat a CC esetben mozgó pont regresszióval, a CI esetben a legkisebb négyzetek módszerével és mozgó pont regresszióval („moving point regression” – 5. ábra) határoztuk meg. A mozgó pont regressziót alkalmazva a tapasztalatok alapján ezeknél a vizsgálatoknál átlagosan 5%-os regressziós intervallumot érdemes használni (Eberhardt et al., 1998), ezért mi is így jártunk el.



5. ábra. A mozgó pont regressziós technika alkalmazása a UCS méréseknél (Eberhardt et al. 1998)

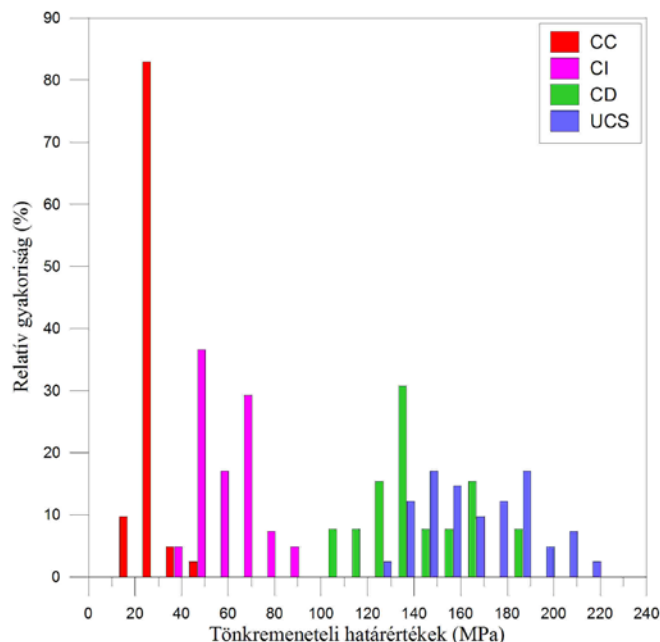
A CD határértéket a $\Delta V/V$, azaz a fajlagos térfogatváltozás maximális értékénél jelöltük ki. A mérőbélyeges mérések közül nem volt mindegyik alkalmas a feldolgozásra. Az adatok szűrése során első körben felhasználtuk azt a mérési jegyzőkönyvbe is minden mérés során bevezetett információt, mely a tönkremenetel képének szabályosságát, vagy az esetleges mintatestbeli hibákat (pl. már a teszt előtt is meglévő diszkontinuitás a mintán) írja le. A próbafuttatások során ugyanis azt tapasztaltuk, hogy eleve csak a „szabályos”, illetve „közel szabályos” minősítésű törésképpel jellemzett minták esetében kaphatjuk meg a megfelelő határértékeket, a többi esetben az algoritmus nem volt megfelelően végigfuttatható, illetve irreális értékeket adott. Ebből adódott az a felismerés, hogy az eljárás kifejezetten alkalmas azoknak a kőzetmintáknak a kiszűrésére, amelyekből valóban intakt (a kőzetmátrixra jellemző) kőzetmechanikai paraméterek nyerhetők.

A fentiek miatt a „szabályos”, illetve „közel szabályos” törésképet produkáló minták adatait importáltuk az automatizált .xls fájlba, és végül ezekből is csak azokat az adattáblákat használtuk fel a továbbiakban, amelyekből az automatikus eljárással sikerült tökéletesen kiszámítani a CC, CI és CD határértékeket. Az így kapott eredmények esetében megállapíthatjuk, hogy a szűrés utáni adattáblák ténylegesen az ép (intakt) mintatestekre vonatkoznak, hiszen ezek diagramjain végigvezethető a bemutatott elméleti mechanikai viselkedés, és a számítási folyamat során a szükséges határértékek megállapítása is maradéktalanul sikerült.

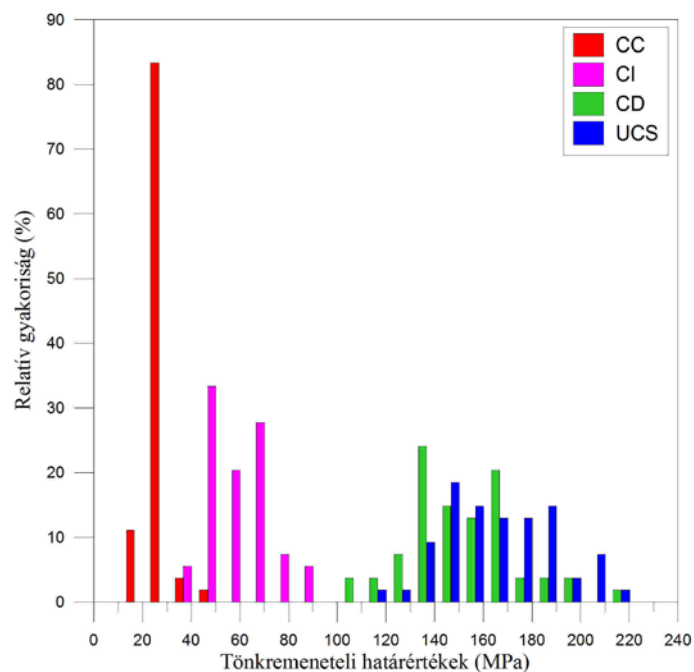
Az említett határértékek számításánál 208 db mérőbélyeges mérést vizsgáltunk át, melyekből az automatikus algoritmussal 55 mérés bizonyult megfelelőnek a CC, CI és CD határértékek meghatározására. (Ebből 36 db monzogránit, 11 db monzonit, míg a többi hibrid mintatest volt.) A felhasználható mérések számának ilyen mértékű csökkenését a következők indokolják: ahhoz, hogy a határértékeket meghatározhassuk, a mérőbélyegeknél folyamatosan működniük kellett, ha nem is a törés pillanatáig, de legalább a CD határértékig. Ez a követelmény csak kevés mintatest esetében teljesül, mivel a bélyegek – általában a laterális helyzetűek – az megnyíló, majd összekapcsolódó repedések következtében már a mintatest tönkremenetele előtt megsérülnek.

3 AZ EREDMÉNYEK

A kapott adatokon eloszlásvizsgálatot végeztünk. A monzogránit és a monzonit mintatestek esetében ezek eredményeit a 6. és 7. ábra mutatja be.



6. ábra. A határértékek eloszlásvizsgálata az intaktnak tekinthető monzogranit minták esetében



7. ábra. A határértékek eloszlásvizsgálata az intaktnak tekinthető monzonit minták esetében

Az eredmények összefoglalását a következő táblázatok tartalmazzák. Az eloszlásvizsgálatok és a külföldi szakirodalmak alapján az átlag értékek használatát javasoljuk a határértékek megállapításánál:

1. táblázat. Mérőbélyeges UCS mérések újraértékelésének összefoglaló eredményei monzogranit mintatestek esetében (36 minta)

Határértékek	CC	CI	CD	UCS
Átlag (MPa)	24,45	52,14	145,60	165,11
Szórás	4,50	10,65	17,09	19,25
UCS %-ában	14,81	31,58	88,18	-

2. táblázat. Mérőbélyeges UCS mérések újraértékelésének összefoglaló eredményei monzonit mintatestek esetében (11 minta)

Határértékek	CC	CI	CD	UCS
Átlag (MPa)	24,22	53,30	134,25	163,72
Szórás	3,27	13,67	28,74	14,22
UCS %-ában	14,79	32,55	82,00	-

Az eredmények összehasonlíthatóságának érdekében néhány külföldi projekt gránitos mintatestekre vonatkozó táblázatait mutatjuk be:

3. táblázat. Onkalo gránit-pegmatit eredményei (Siren et al. 2011)

Határértékek	CC	CI	CD	UCS
Átlag (MPa)	-	55	108	108
Szórás	-	-	-	-
UCS %-ában	-	50,13	100,00	-

4. táblázat. AECL URL (Kanada) rózsaszín gránit (pink granite) eredményei (Eberhardt et al. 1998)

Határértékek	CC	CI	CD	UCS
Átlag (MPa)	47,50	82	157	207
Szórás	5,8	7,4	19,8	20,0
UCS %-ában	22,99	39,45	76,14	-

5. táblázat. Helyszínmegjelölés nélkül közölt, gránitokra vonatkozó eredmények (Perras et al. 2012)

Határértékek	CC	CI	CD	UCS
Átlag (MPa)	-	124	206	246
Szórás	-	16,0	17,0	23,0
UCS %-ában	-	50,41	83,74	-

4 ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott külföldi kutatások eredményei alapján elmondhatjuk, hogy a Mórágai Gránit kapcsán számított határértékek szórásai alacsonyak, ugyanakkor a meghatározott határértékek UCS csúcser-tékéhez viszonyított százalékos eloszlása hasonlóan alakul a bemutatott többi eredményhez. Kisebb eltérés a CC és a CI értékek alakulásánál látszik. Ezek közül a CI-re Diederich et al. 2010 megemlíti, hogy általában a UCS érték 35-50%-a között, míg az 1. ábra alapján a CD értéke a UCS csúcs (peak) értékének a 80 %-a körül szokott alakulni.

Összesítve az eredményeket azt látjuk, hogy a monzogranit az egytengelyű nyomószilárdság mérések-nél rideg anyagként viselkedik (a CD és a törés közötti szakaszban fedezhető fel némi „folyás”, vagy képlékenységre utaló nyom). A monzonit az aprószemcsés szerkezetének köszönhetően a töréses tönk-remenetel előtt képlékenyen deformálódik, mely szakasz valamivel nagyobb, mint a monzogranit ese-tében.

Ugyancsak szembeötlő, hogy az elméletileg várható tönkremeneteli képet maradéktalanul produkáló minták esetében az átlagos értékek lényegesen (a monzogranitok esetében közel 30 MPa-lal) maga-sabbak, mint a teljes kiválasztott populációból kapott, az előző fejezetben bemutatott értékek. Az ala-csony szórással adódó UCS-értékek arra engednek következtetni, hogy ezzel a módszerrel valóban az intakt granitoid kőzetek valós anyagállandóként is értelmezhető adatait kaptuk meg.

A fent említett határértékek (CC, CI, CD) meghatározása után iteratív módon, a szakirodalom (Eberhardt et al. 1998 és Martin 1993) által előírt tartományban automatikusan számítottuk az Young-modulus és a Poisson-szám módosított értékeit (a Young-modulust a CC és CI határértékek között, a Poisson-számot pedig a keresztirányú alakváltozás lineáris tartományában). Mivel normál esetben e paraméterek számítása során a deformációs görbék lineáris szakaszainak kijelölése szemrevételezés-sel, és nem pedig automatizáltan történik, kisebb eltérések előfordulhattak a kétféle módszerrel meg-határozott értékek között. Ezek azonban nem bizonyultak olyan mértékűnek, ami miatt módosítani kellett volna a tervezéshez megadott alapparaméterek karakterisztikus értékeit (Kovács et al. 2012).

A Bátaapáti NRHT térségeiből származó kőzetmintákon végzett méréseknek a bemutatott új módszer-rel történő kiértékelése teljesen megbízható új adatrendszer hozott létre, ami a régi, teljes mérési adatrendszerrel együtt értelmezve rendkívül hasznos új információkkal szolgált a kőzetek valós tönk-remeneteli viselkedésének megismerésében. A módszer további csiszolását nagyban elősegíthetik a mérőbéllyekkel egy időben használt AE érzékelők.

IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- Cai, M. (2010): Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter mi of Brittle Rocks, *Rock Mech. Rock Engng.*, **43**(2): 167-184.
- Deák F., Kovács L., Vásárhelyi B. (2013): *Modeling the Excavation Damaged Zones in the Bataapáti radioactive waste repository*. Rock Mechanics for resources, energy and Environment – Kwasniewski and Lydsba (eds), Taylor & Francis Group; 603-608.
- Diederich M. S., Martin C. D. (2010): *Measurement of spalling parameters from laboratory testing*. Rock Mechanics in Civil and environmental Engineering – Zhao, Labiouse, Drudt & Mathier (eds) – EUROCK2010, ISRM, Taylor & Francis Group, London, 323-326.
- Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S. (1998): Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. NRC Canada, *Canada Geotech J.* **35**: 222-223.
- Ghazvinian E., Diederich M., Archibald J. (2011): *Challenges related to standardized detection of crack initiation thresholds for lower-bound or ultra-long-term strength prediction of rock*. Pan-Am CGS Geotechnical Conference 8 p.
- Kovács L., Mészáros E., Deák F., Somodi G., Máté K., Jakab A.; Vásárhelyi B.; Geiger J.; Dankó Gy., Korpai F., Mező Gy., Darvas K.; Ván P., Fülöp T., Asszonyi Cs. (2012): *A Geotechnikai Értelmező Jelentés (GÉJ) felülvizsgálata és kiterjesztése*. Kézirat – Kömérő Kft. Pécs, 2012. december. RHK Kft. Irattár, RHK-K-032/12., 312 p.
- Martin C. D. (1993): *The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground opening*. Ph.D. thesis, p 278.
- Perras M., Langford C., Ghazvinian, Diederich M. (2012): *Numerical delineation of excavation damage zones: From rock properties to statistical distribution of the dimensions*. EUROCK2012, ISRM, Stockholm 14 p.
- Siren T., Martinelli D., Uotinen L. (2011): *Assessment of the potential for rock spalling in the technical rooms of the Onkalo*. Working Report 2011-35, POSIVA OY, June 2011, 39 p.
- Ván P., Vásárhelyi B. (2001): *Second law of thermodynamics and the failure of rock materials*, In: E Elsworth, J.P. Tinucci, K.A. Heasley (szerk.) Proc. 38th U.S. Rock Mechanics Symposium, DC Rocks 2001, Balkema 767-776.
- Ván P. (2001): Internal thermodynamic variables and failure of microcracked materials, *J. Non-equilib. Thermodyn.* **26**(2): 167-189.