

A REPEDEZETT KŐZETTES SZILÁRDSÁGI PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSÁRA ÉS REPEDEZETT KŐZETKÖRNYEZETBEN NYITOTT VÁGATOK UTÓLAGOS MEGERŐSÍTÉSÉRE IRÁNYULÓ KUTATÁSOK A MISKOLCI EGYETEM BÁNYÁSZATI ÉS GEOTECHNIKAI TANSZÉKÉN

Somosvári Zsolt – Debreczeni Ákos

Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Tanszék, bgtda@uni-miskolc.hu

Összefoglalás: A Miskolci Egyetem Bányászati és Geotechnikai Tanszékén folyó kutatások közül kettőt ragadtunk ki és ismertetünk röviden. A kőzettestből vett kőzetmintákon, ép kőzeten elvégzett laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálatok a kőzettömböt és nem a tagolt, repedezett, sokszor anizotróp kőzettömeget, kőzettestet jellemzik. Földalatti üregnyitáskor az üreg kőzetköpenyében lejátszódó feszültségváltozások, alakváltozások és elmozdulások, maga az üregállékonyság viszont a tagolt, repedezett kőzettest kőzetmechanikai- geomechanikai tulajdonságainak a függvénye. A Miskolci Egyetem Bányászati és Geotechnikai Tanszékén (témavezető prof. SOMOSVÁRI) kifejlesztettünk egy komplex mérési és kiértékelési eljárást, amely a fent jelzett probléma megoldására alkalmas. Tanszékünkön 1991-től kezdve foglalkozunk a témakörrel. A kialakított módszer alapja a rugalmassági modulus (E), amely laboratóriumban és „in situ” állapotban is mérhető statikus terheléssel és szeizmikus (geofizikai) módszerrel is. A Vértesi Erőmű Rt. felkérte a Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Tanszékét, hogy működjön közre a vágatkörnyezet injektálással történő megerősítésére irányuló fejlesztésekben. A cikk második részében erről a kutatásról adunk rövid összefoglalást.

kőzettest, repedezettség, szilárdság, üregállékonyság, injektálás, megerősítés

1. Kőzetmechanikai kutatások a Miskolci Egyetemen

A Miskolci Egyetem Bányászati és Geotechnikai Tanszék (régii nevén a Bányaműveléstani Tanszék) kutatási tevékenységének elválaszthatatlan részei a föld alatti üregek tervezésével, kihajtásával és megtartásával kapcsolatos kőzetmechanikai kérdések. A földkéregben üreget nyitni és ott dolgozni mindig számtalan veszélyt rejtő nagy odafigyelést és természetesen széleskörű ismereteket igénylő feladat. Nem is vállalkoztak elődeink ilyen feladatra, csak akkor, ha a föld mélyének számunkra nélkülözhetetlen ásványkincseit kellett kitermelni azaz kibányászni. A társadalom szükségleteinek kielégítéséhez nélkülözhetlenné vált a bányászkodás. Kezdetben elsősorban a színes-nemes fémek érceinek és a sónak a bányászata, majd más fémek érceinek, tüzelőanyagoknak, építőanyagoknak és egyéb ásványoknak a bányászata vált nélkülözhetlenné. A bányászat korabeli jelentőségét mi sem mutatja jobban, mint az hogy már 271 évvel ezelőtt 1735-ben Selmezbányán bányaiskolát alapítottak a bányászati ismeretek racionális alapokra helyezése érdekében.

Az üregek állékonyságának és a szükséges biztosítás megítélésének kérdésében sokáig csak a tapasztalatokra lehetett támaszkodni. A mechanikai tudományok fejlődése új

lehetőséget teremtett, az üregállékonysági kérdéseket is mechanikai alapokon kezdték vizsgálni. A magyar kőzetmechanikai kutatásokat Esztó Péter, Zambó János és Richter Richárd munkássága alapozta meg. Az elmúlt évtizedekben tanszékünkön gyakorlatilag minden a mélyművelésű és külszíni bányászattal és egyéb funkciójú földalatti üreggel összefüggő kőzetmechanikai kérdésben folyt kutatás. Ezek a következők:

- üregek nyitásának kőzetmechanikai kérdései,
- üregek biztosításának kőzetmechanikai kérdései,
- pillérméretezés,
- bányászati tevékenységek következtében létrejövő felszínmozgások,
- bányakárok,
- maradó kőzetfalak és laza kőzettömegek egyensúlya (rézsű- és töltésállékonyság),
- laboratóriumi mérések,
- in situ vizsgálatok,
- kőzet-víz rendszerek, vízszintsüllyedés okozta felszínmozgások,
- kőzet-gáz rendszerek, kőzet- és gázkitörések mechanizmusa,
- alagút-építés következtében létrejövő felszínmozgások.

Ezen rövid beszámoló keretében két területet emelünk ki a közelmúlt kutatásából:

- a repedezett kőzettest szilárdsági tulajdonságainak meghatározására kifejlesztett módszert (ME módszer), és
- erősen repedezett kőzetkörnyezetben hajtott vágatok injektálással történő utólagos megerősítését.

2. Kőzettest minősítés ME módszerrel

2.1 A repedezett kőzettest (kőzetmasszívum) és a kőzettömb

A diszkontinuitások közötti térséget elfoglaló kőzet a kőzettömb. A diszkontinuitásokat is magába foglaló nagyobb kiterjedésű kőzettömeg, kőzetmasszívum, a tagolt, repedezett kőzettest.

A kőzettest a földtani formáció része, amely földtani és települési szempontból is homogén, ugyanakkor anizotrópiája jelentős lehet. A kőzettest anizotrópiája származhat a keletkezés körülményeiből. Pl. magmás földtani formációban a kihülés során tagoltsági rendszer alakul ki, elválások, diszkontinuitások jönnek létre legtöbbször egymással párhuzamosan. A magmás kőzetek tömeges településűek és általában homogén eloszlású tagoltsági rendszerrel rendelkeznek kőzettesteik.

A kőzettest anizotrópiája a tagoltságon kívül származhat kőzettanilag anizotróp kőzettömböktől is. A kőzettest lehet homogén, szabályos (pl. gránit) és szabálytalan tulajdonságváltozású.

A tagoltsági felületek a kőzettesteket a kőzettömbök sorára osztják. A kőzettömb a tagolatlan kőzettest. A magmás kőzetek elválási rendszerei pados, lemezes, oszlopos, gömbös, vagy szabályos hatlapú típusúak, ennek megfelelő a kőzettömbök alakja. A

kőzettömbök és a tagoltsági felületek a kőzettestek építőelemei. A kőzettömb magmás kőzeteknél a kihülési elválások közötti kőzetdarab.

A kőzettestből vett kőzetmintákon, ép kőzeten elvégzett laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálatok a kőzettömböt és nem a tagolt, repedezett, sokszor anizotróp kőzettömeget, kőzettestet jellemzik. Földalatti üregnyitáskor az üreg kőzetköpenyében lejátszódó feszültségváltozások, alakváltozások és elmozdulások, maga az üregállékonyság viszont a tagolt, repedezett kőzettest (kőzetmasszívum) kőzetmechanikai- geomechanikai tulajdonságainak a függvénye.

A tagolt, repedezett kőzettest (kőzetmasszívum) geomechanikai tulajdonságait egyrészt

- a kőzettestet felépítő kőzettömbök kőzetmechanikai tulajdonságai, másrészt
- a kőzettest diszkontinuitásai, tagoltsági felületei, azok állapotai befolyásolják.

A befolyásolás mértékének az aránya a különböző szilárdságú, rugalmassági modulusú kőzetkörnyezetben más és más. A tagolatlan laza, igen kis szilárdságú kőzeteknél (agyagok, homokok ...) a laboratóriumi vizsgálatok eredményeit elfogadjuk a kőzettest jellemzőiként, mert itt a kőzettömb maga a kőzettest. Összeálló kőzetek esetében a kis szilárdságú, kis rugalmassági modulusú (agyagmárgák, ...) kőzetek esetében is közelítőleg elfogadhatók a kőzettest jellemzésére a laboratóriumi vizsgálatok eredményei, ha nem tipikusan töredezett, repedezett kőzetről (pl. kőszén) van szó.

A nagyobb szilárdságú, de különösen a nagy, vagy igen nagy szilárdságú összeálló kőzeteknél nélkülözhetetlen a kőzettest tagoltságának, diszkontinuitásának beható tanulmányozása, a kőzettömbök, mint alapelemek kőzetmechanikai tulajdonságainak megismerése, a laboratóriumi mérések mellett. Ezt annál is inkább ki kell hangsúlyozni, mert a laboratóriumban sokoldalú műszeres méréseket végezhetünk, az eredményeknek fizikai tartalmuk van. A diszkontinuitások számbavételére szolgáló mérőszámok viszont sok szubjektivitást tartalmaznak, sokszor megállapodásokon alapulnak.

A laboratóriumi kőzetmechanikai mérések az ép (intact) mintatest származási helyére, a kőzettömbre jellemző eredményeket adnak. Célszerű már a laboratóriumi mérési eredmények alapján osztályozni a kőzeteket, hiszen igen nagy skálán mozognak, nagyságrendi eltérést is mutatnak, mind az egytengelyű nyomószilárdság (σ_c), de különösen a rugalmassági (Young) modulus (E) értékei. Ezek alapvető kőzetmechanikai paraméterek, amelyeket laboratóriumban megfelelő gyakorisággal mindig meg kell mérni a kőzettömb jellemzése érdekében.

A laboratóriumi mérések szerint a rugalmassági modulus arányos az egytengelyű nyomószilárdsággal. Ezért a rugalmassági modulus – egytengelyű nyomószilárdság hányados is jellemzi a kőzetminőséget.

A rugalmassági modulus általában két nagyságrenddel nagyobb mennyiség mint az egytengelyű nyomószilárdság, ezért általában GPa-ban fejezzük ki értékét.

Az E és σ_c laboratóriumi meghatározása mellett elengedhetetlen a kőzet egytengelyű húzószilárdságának (σ_t) meghatározása is. A kőzetek húzószilárdsága mindig kisebb az

egytengelyű nyomószilárdságnál, $\sigma_t < \sigma_c$. Az egytengelyű nyomószilárdság-húzószilárdság hányadost Brinke-féle számnak nevezik,

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} > 1$$

A Brinke-féle szám nagysága általában $B \cong 5 - 35$ közötti érték és a kőzetminták mikrorepedezettségének mértékére utal. A mikrorepedezettség az egytengelyű nyomószilárdságot kevésbé befolyásolja, míg a húzószilárdságot jelentősebben csökkenti, ezért a mikrorepedezettség növekedésével a Brinke-féle szám értéke növekszik. Ezért érdemes ezt a paramétert is számba venni.

Régi törekvés a kőzetmasszívum diszkontinuitásainak jellemzése. Geomechanikai szempontból az RQD (Deere, 1964) mutató bizonyult elfogadott és ma is használt egyik repedettség-jellemzőnek 0-100 %-os skálájával. Később összesen 6 paraméter alapján az RMR (Bieniawski, 1976) mutató is széles körben elterjedt 0-100 pontos skálájával. Ez a mutató is lényegében a kőzettömbre vonatkozó egytengelyű nyomószilárdság, ezért az RMR-t a kőzettest általános minősítésére gondolták használni Olyan irányban is elfajult aztán az irodalomban nyomon követhető kutatás, hogy csak a repedettség fontos és csupán repedettség alapján próbálták a repedetett kőzettest mechanikai jellemzőit megbecsülni, a kőzettömbökre vonatkozó laboratóriumi vizsgálatok nélkül.

A repedetett kőzettest kőzetmechanikai alapokon álló, elvileg helyes értékelését Hoek-Brown (1980) munkásságától számíthatjuk. Ez az értékelés laboratóriumi triaxiális nyomószilárdság vizsgálatokon alapul. Meghatározza a kőzettömbre jellemző tönkremeneteli határgörbét. Aztán az RMR mutató figyelembevételével a σ_1 - σ_3 síkon (igaz eléggé szubjektív módon) a kőzettömbre vonatkozó határgörbét a repedetett kőzettestre redukálja. Később (1994) az RMR repedettségi mutatót a GSI repedettségi mutatóval helyettesítették. A GSI valóban a repedettséget jellemző mennyiségi és minőségi szempontból is.

Elvileg ez a módszer teljesen helyénvaló, hátránya viszont, hogy eredményei közvetlenül mérésekkel nem ellenőrizhetők, mert a repedetett kőzettest szilárdsági paraméterei (c_{mass} , ϕ_{mass} , $\sigma_{c_{mass}}$...) nem mérhetők meg.

2.2 Kőzettest minősítés ME módszerrel (ME BÁNYÁSZATI ÉS GEOTECHNIKAI TANSZÉK, 1994)

Tanszékünkön 1991-től kezdve (1994-ig OTKA kutatás keretében) foglalkozunk a témakörrel. A kialakított módszer alapja a rugalmassági modulus (E), amely laboratóriumban és „in situ” állapotban is mérhető statikus terheléssel és szeizmikus (geofizikai) módszerrel is.

A kőzettest repedettsége, tagoltsága kérdésénél nemcsak a repedések sűrűségét és állapotát jellemző mérőszámokra vagyunk kíváncsiak, hanem magára a kőzettest állapotra. Nem mindegy, hogy az adott repedettség fellazult, vagy összenyomott állapottal párosul. Ezért kívánalom a kőzettest állapotának meghatározása olyan mérési módszerrel, amely fizikai alapokon nyugszik.

A vizsgált kőzetkörnyezet természetes („in situ”) állapotának, fiziko-mechanikai állapotjellemzőinek megismerése a cél. Erre vonatkozóan általában korlátozottak a közvetlen helyszíni mérési lehetőségeink. Ugyanakkor laboratóriumban kis kőzetmintákon sokoldalú kőzetmechanikai mérések végezhetők statikus, vagy dinamikus terheléseknél. A Miskolci Egyetem Bányászati és Geotechnikai Tanszék közreműködésével (témavezető prof. Somosvári) kifejlesztettünk egy komplex mérési és kiértékelési eljárást, amely a fent jelzett probléma megoldására alkalmasnak.

Az eljárás lényege az, hogy a szokásos laboratóriumi kőzetmechanikai méréseken túlmenően laboratóriumban a vizsgált kőzeten akusztikus hullámterjedés sebesség méréseket végzünk, majd a hullámterjedési sebesség méréseket a vizsgált kőzetkörnyezet természetes állapotában is elvégezzük mintegy átvilágítva a kőzettestet.

A mérések:

- kőzetmechanikai paraméterek meghatározása laborban,
- akusztikus sebesség mérések laborban,
- szeizmikus sebesség mérések „in situ”,
- repedezettségi kőzetjellemzők (RQD, GSI),
- primer feszültségmérések a kőzettestben

együttes értékelése lehetővé teszi a természeti állapotra jellemző mechanikai kőzetparaméterek helyfüggő meghatározását.

A módszert, amelyet később ME-módszernek nevezünk el sikeresen alkalmaztuk 1994 előtt több földalatti bányászati feladat megoldásánál, majd a pécsi α -vágatban a nagyaktivitású radioaktív hulladékelhelyezésre irányuló kutatásoknál, legutóbb pedig a kis- és közepes radioaktivitású hulladékok elhelyezését célzó üveghutai gránittest értékelésénél.

2.2.1 Laboratóriumi kőzetszilárdság vizsgálatok

Laboratóriumi kőzetszilárdság vizsgálatoknál rendszerint az alábbi fajta terheléseket alkalmazzák:

- egytengelyű nyomás ($\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$), szilárdság: egytengelyű nyomószilárdság ($\sigma_1 = \sigma_c$)
- biaxiális nyomás ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = 0$), szilárdság: biaxiális nyomószilárdság [$\sigma_1 = \sigma_{cb} = f(\sigma_2)$]
- kompressziós triaxiális nyomás ($\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$), szilárdság: kompressziós triaxiális nyomószilárdság [$\sigma_1 = \sigma_{ct} = f(\sigma_2 = \sigma_3)$]
- extenziós triaxiális nyomás ($\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3$), szilárdság: extenziós triaxiális nyomószilárdság [$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma'_{ct} = f(\sigma_3)$]
- polyaxiális nyomás ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), szilárdság: polyaxiális nyomószilárdság [$\sigma_1 = \sigma_{cp} = f(\sigma_2, \sigma_3)$]
- egytengelyű húzás ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3$) szilárdság, húzószilárdság ($\sigma_3 = \sigma_t < 0$)

- ún. Brasil-húzás ($\sigma_1 \cong -3\sigma_3$, $\sigma_2=0, \sigma_3$) szilárdság: húzószilárdság ($\sigma_3 = \sigma_t < 0$)

Jelentős eltéréseket tapasztalunk a szilárdságban a belső súrlódásos mechanizmus más-más intenzitású működése miatt a nyomó-igénybevételek tartományában. Húzó-igénybevételnél nem működik a belső súrlódásos mechanizmus, ezért a legkisebb szilárdság a húzószilárdság (σ_t). Továbbá ezért lehetséges, hogy egy határig különböző triaxiális húzóterhelése ($\sigma_2 = \sigma_1 > 0$, $\sigma_3 = \sigma_t < 0$) ugyanazt a húzószilárdságot produkálják. A következő szilárdság az egytengelyű nyomószilárdság (σ_c), ahol még legkevésbé működik a belső súrlódásos mechanizmus.

A kompressziós ($\sigma_2 = \sigma_3$, σ_1) és extenziós ($\sigma_2 = \sigma_1$, σ_3) triaxiális mérési eredményekben is lényeges eltérés mutatkozik. Kompressziós triaxiális és polyaxiális mérések eredményei is jelentősen eltérnek. A σ_2 középső főfeszültségének lényeges befolyása van a szilárdságra.

2.2.2 A célszerűen alkalmazható törési határgörbék

A törési határgörbe meghatározása előtt a törési elméletben, a törési kritériumban kell megállapodni. A törési elméletek közül legelterjedtebb a világban a Mohr-féle tönkremeneteli elmélet, amely a szélső főfeszültségek (σ_1 , σ_3) alapján adja a tönkremeneteli kritériumot, a σ_2 középső főfeszültség hatását elhanyagolja. Acéloknál pl. ez az elhanyagolás nem jelentős, kőzeteknél viszont igen, ahogyan ezt a biaxiális és polyaxiális terhelések mérési eredményei bizonyítják. A σ_2 középső főfeszültség elhanyagolása viszont a biztonság javára történik, ezért kőzeteknél is jól alkalmazható a Mohr-féle tönkremeneteli elmélet.

A Mohr-féle tönkremeneteli kritérium alapján aztán számos határgörbével lehet dolgozni, különösen a nyomó-igénybevételek tartományában. A nyomó-igénybevételek tartományában a kompressziós triaxiális mérések azt mutatják, hogy a $\sigma_1 - \sigma_3$ síkon közel lineáris a változás, bár sokszor előfordul, hogy a laboratóriumi mérési eredményeket a nyomó-igénybevételek tartományában egyenestől kissé eltérő görbékkel nagyobb szorossággal lehet leírni. Ezért a Mohr-Coulomb-féle lineáris közelítés (1900)

$$\sigma_1 = \sigma_c + B_\phi \sigma_3, \quad B_\phi = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right) = \left[\left(\sqrt{\mu^2 + 1} \right) + \mu \right]^2, \quad \mu = \operatorname{tg} \Phi$$

$$\tau = c + \mu \sigma = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

mellett számos törési határgörbe egyenlet született.

A Mohr-féle törési kritérium alkalmazásakor nemcsak az lényeges, hogy a nyomó-igénybevételek tartományában a kompressziós triaxiális mérések eredményeit milyen szorossággal közelítik a tönkremeneteli határgörbék. Az is fontos, hogy a kísérletek alkalmával a tönkremeneteli felület állása hogyan egyezik a $\sigma - \tau$ síkon kijelölt felületállással. Ugyanis a $\sigma - \tau$ síkon egyrészt feszültségeket, másrészt a feszültségekhez tartozó felület-állásokat ábrázolunk. A Mohr-Coulomb tönkremeneteli

határgörbe tökéletesen visszaadja a nyomó- igénybevételek tartományában a tönkremeneteli felület állását ($45^\circ + \Phi/2$) is.

A tönkremeneteli határgörbék meghatározásához kompressziós triaxiális mérési eredményekre ($\sigma_3 = \sigma_2 < \sigma_1$) van szükség. Ezeket a mérési eredményeket ma már közepesen felszerelt kőzetmechanikai laboratóriumok is tudják produkálni. Nagyobb szilárdságú ($\sigma_c \cong 100-150$ MPa) kőzeteknél $\sigma_3 = \sigma_2 = 20-30$ MPa köpenynyomás nagyságrendet is kell tudni produkálni a triaxiális méréseknél.

A szóban forgó tönkremeneteli határgörbéken túlmenően vannak olyanok is, amelyek nem a Mohr-féle tönkremeneteli kritérium alapján állnak és mindhárom főfeszültséget ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) figyelembe veszik. Az ilyen határgörbékhez a triaxiális vizsgálatokon túlmenően biaxiális és polyaxiális vizsgálatokra ill. ezek eredményeire is szükség van. Ezeket a vizsgálati eredményeket viszont már csak igen jól felszerelt kőzetmechanikai laboratóriumok tudják produkálni. Ilyen határgörbék pl. Lade, Wiebols-Cook, Mogi, Drucker-Prager-féle határgörbék.

Ha viszont arra gondolunk, hogy a laboratóriumi mérések során akármilyen gondosan is járunk el, a kőzettömbre meghatározott tönkremeneteli határgörbe után valamilyen, mérésekkel többé-kevésbé alátámasztott becslés alkalmazása alapján jutunk a repedezett kőzettest tönkremeneteli határgörbéjéhez, akkor inkább biztonságosabb törési határgörbét célszerű alkalmaznunk.

A Mohr-Coulomb féle tönkremeneteli határgörbe összeálló kőzeteknél ($\sigma_c > 0, c > 0$) többé-kevésbé jó közelítés, szemcsés kőzetek (granulátumok) esetében $\sigma_c = 0, c = 0$ a $\sigma_1 = B_\phi \sigma_3$, ill. $\tau = \mu\sigma = \sigma \operatorname{tg} \phi$ egyenlet nem közelítés, hanem törvény, a súrlódás törvénye. Ha arra gondolunk, hogy a repedezett kőzettestben $\sigma_{c \text{ mass}}/\sigma_c \rightarrow 0, c_{\text{mass}}/c \rightarrow 0$ és a repedés-sűrűség növekedésével a belső ellenállásban egyre nagyobb szerep jut a súrlódásnak, akkor a repedezett kőzettest tönkremenetelének leírására a Mohr-Coulomb féle határgörbét célszerű alkalmazni a nagyobb nyomó-igénybevételek tartományában.

Nagyon fontos azonban a repedezett kőzettest tönkremenetelét helyesen leírni a kis nyomó-igénybevételek és a húzó-igénybevételek tartományában is, hiszen üregnyitás után a szabad üregfelület egyes szakaszain húzó-igénybevételek, vagy kis nyomó-igénybevételek jelentkezhetnek, amelyek a repedezett kőzetkörnyezetben különösen veszélyesek. A húzó-igénybevételek ($-\sigma_t \leq \sigma \leq 0$) ill. kis nyomó-igénybevételek ($0 \leq \sigma \leq \sigma_c/8$) tartományában, azaz $-\sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_c/8$ tartományban másodfokú tönkremeneteli határgörbe írja le helyesen a kőzettömb tönkremenetelét.

A nyomó-igénybevételek és húzó-igénybevételek tartományában célszerű hiperbolikus tönkremeneteli határgörbét alkalmaznunk, mert a hiperbola szárai csaknem egyenesek, így a nagy nyomó-igénybevételek tartományában jól összevethetők az eredmények a Mohr-Coulomb-féle határgörbével. A Bányászati és Geotechnikai Tanszéken olyan hiperbolikus tönkremeneteli határgörbét fejlesztettünk ki, amely a triaxiális húzószilárdság követelményeinek is megfelel.

Amikor a Mohr-Coulomb, ill. hiperbolikus tönkremeneteli határgörbét a repedezett kőzettestre alkalmazzuk, akkor $\sigma_{t\ mass}, c_{mass}, \sigma_{c\ mass}, \phi_{mass}$ paramétereket vesszük figyelembe, ahol:

$$\frac{\sigma_{t\ mass}}{\sigma_t} < 1, \frac{c_{mass}}{c} < 1, \frac{\sigma_{c\ mass}}{\sigma_c} < 1, \frac{\text{tg } \phi_{mass}}{\text{tg } \phi} < 1.$$

2.2.3 A szilárdsági paraméterek ($\phi, \sigma_c, c, \sigma_t$) redukciója

A laboratóriumban meghatározott, a kőzetblokkokra jellemző kőzetszilárdsági paraméterek redukciójánál a repedezett kőzettestre vonatkozóan olyan megoldást célszerű választani, amely megoldás „in situ” mérésekkel ellenőrizhető. A repedezett kőzettest belsejében $\sigma_{t\ mass}, \sigma_{c\ mass}, c_{mass}, \phi_{mass}$ kőzetszilárdsági paraméterek „in situ” nem mérhetők. A kőzetszilárdságokon kívül „in situ” módon csak a kőzetmasszívum statikus deformációs modulusa (E_{mass}) mérhető. Ezért ennek felhasználásával célszerű a kőzettestre jellemző szilárdsági paramétereket meghatározni. Ráadásul a mérhető E_{mass} mellett a kőzettest szeizmikus átvilágításával a hely függvényében meghatározhatók a szeizmikus rugalmassági modulus (E_{seis}) értékei is. A kőzettömb minőségét jellemzi a E/σ_c modulus viszonyszám, ennek megfelelő mérőszámot célszerű képezni a kőzettestre vonatkozóan is. Megvan tehát annak a lehetősége, hogy „in situ” mérésekkel ellenőrizhetően jussunk el a kőzettömb szilárdsági paramétereitől a kőzettest szilárdsági paramétereire, amely egy telephely értékelés végső célja geomechanikai szempontból.

A laboratóriumban $\phi, \sigma_c, c, \sigma_t$ szilárdsági paraméterek mellett a ME-módszer szerint meghatározzuk a statikus rugalmassági modulus (E) és a dinamikus rugalmassági modulus (E_d) értékét is. Továbbá lehetőség van átvilágításos szeizmikus sebesség mérésekre is, amelyek során meghatározzák az „in situ” $V_p\ mass$ ill. E_{seis} értékeit.

Bővebben kell foglalkoznunk E_{mass} kérdésével. A mérési eredmények azt mutatják, hogy általában a kőzettest deformációs modulusa $E_{mass} \cong 1-25$ GPa intervallumban változik. E_{mass} többé-kevésbé korrelál E, RMR, GSI, RQD paraméterekkel. Általában $RMR \cong GSI \cong 20-50$ intervallumban $E_{mass} \cong 1 - 10$ GPa, $RMR \cong GSI \cong 50 - 70$ intervallumban $E_{mass} \cong 2 - 25$ GPa.

Kőzetek laboratóriumi vizsgálatai azt mutatják, hogy nagy szilárdságú, igen nagy szilárdságú kőzeteknél ($\sigma_c > 110$ MPa) nagy modulus viszony-számnál ($E/\sigma_c = 500$) a laboratóriumi mérések $E > 55$ GPa rugalmassági modulusot mutatnak. Közepes és kis szilárdságú kőzeteknél ($\sigma_c = 55-110$ MPa) közepes modulus viszony-számnál (200-500) a laboratóriumi mérések $E = 11-55$ GPa rugalmassági modulusot mutatnak. Ezeknél a kőzeteknél, tehát a rugalmassági modulusok általában $E \cong 10 - 100$ GPa intervallumban változnak. Ennek megfelelően általában $E_{mass}/E \cong 0,1 - 0,5$ értékekkel kell számolnunk ($RMR \cong GSI \cong 20-70$).

Amennyiben rendelkezésünkre áll a laboratóriumi mintatesteken meghatározott dinamikus rugalmassági modulus (E_d) valamint a statikus rugalmassági modulus (E) és az „in situ” szeizmikus alakváltozási modulus (E_{seis}) értéke, akkor

$$E_{mass} < E_{seis} < E < E_d$$

vagy

$$E_{mass} < E < E_{seis} < E_d$$

Azaz

$$E_{seis} \leq E \text{ vagy } E_{seis} \geq E$$

Nagy „in situ” primer feszültségeknél a repedezett kőzettestben $E_{seis} > E$ is lehet a nagy feszültségek miatt. Általában E_{seis} értékét az „in situ” feszültségeknek megfelelően korrigálni szükséges a terheletlen állapotra annak érdekében, hogy E_d és E_{seis} összehasonlítható legyen.

Így $E'_{seis} < E < E_d$ eredményre jutunk és a

$$\frac{E'_{seis}}{E_d} = R' < 1$$

közeliítő redukciós tényező segítségével számíthatjuk a repedezett kőzettest közeliítő alakváltozási modulusát az alábbiak szerint:

$$E'_{mass} = R' E = \frac{E'_{seis}}{E_d} E$$

A repedezett kőzettestre így kapott közeliítő alakváltozási modulus (E'_{mass}) ellenőrizzük a szóban forgó rendelkezésre álló mérési eredményekkel és empirikus képletekkel és a megfelelő mértékben korrigálunk.

Laboratóriumi mérések szerint kristályos, kemény kőzeteknél ($E \cong 15-50$ GPa) általában a dinamikus és a statikus rugalmasságú modulus hányadosa $E_d/E \cong 1,5-3,0$ közötti érték, ill. $E/E_d \cong 0,33-0,67$. Másrészt a kőzetnyomás növekedés a terheletlen állapothoz képest $(V_1/V_2)^2 \cong 2$ – kétszeres változást idézhet elő szeizmikus sebesség négyzetében. Amikor „in situ” szeizmikus átvilágítással meghatározott szeizmikus alakváltozási modulus korrigáljuk $E'_{seis} \cong 0,5 E_{seis}$ értékkel is számolhatunk. Így abban az esetben is, ha $E \cong E_{seis}$, a redukciós tényező közeliítő értékének minimuma

$$R' \cong \frac{E'_{seis}}{E_d} \cong 0,10 - 0,35$$

Tekintettel arra, hogy a kőzettömb minőségére jellemző az E/σ_c ill. σ_c/E hányados, célszerűen ezt a repedezett kőzettest minőségére kiterjesztve írhatjuk, hogy

$$\frac{\sigma_{c\,mass}}{E_{mass}} = \frac{\sigma_c}{E}$$

Így a kőzettest egytengelyű nyomószilárdsága:

$$\sigma_{c\,mass} = \frac{E_{mass}}{E} \sigma_c = R \sigma_c, \quad R < 1$$

Végeredményben a redukciós tényező tehát:

$$R = \frac{E_{mass}}{E} < 1$$

A kőzetrepedezettség magát a belső súrlódási szöget alig befolyásolja, ezért nem követünk el nagy hibát, ha $\phi_{mass} \cong \phi$ értékkel számolunk, de $\Phi_{mass} < \phi$.

A repedezett kőzettestre jellemző további szilárdsági paraméterek az alábbiak szerint redukálhatók ill. számíthatók:

$$\sigma_{c\ mass} = R\sigma_c,$$

$$c_{\ mass} \cong Rc,$$

$$\sigma_{t\ mass} = R\sigma_t.$$

3. Repedezett kőzetkörnyezetben nyitott vágatok utólagos megerősítése

A bányászatban az üregek biztosítását a szükséges élettartamuk figyelembevételével tervezzük meg. Egyes bányatereknek a bányauzem teljes élettartama alatt számottevő károsodás nélkül kell állva maradniuk, (ilyenek pl. az aknák körüli térségek), míg másoknak csak néhány hónapon keresztül kell biztosítani a termelés lehetőségét akár igen jelentős konvergencia megengedése mellett (ilyenek lehetnek pl. a fejtésindító vágatok). Az üregek rendeltetésének és tervezett élettartamának megfelelően kell megválasztani, hogy mely kőzetkörnyezetben (rétegben) kerüljenek kihajlásra (pl. a fejtésre kerülő kőzetben, a fedükőzetben vagy a fekükőzetben) ill. milyen legyen a biztosításuk. Ha az üreg konvergenciája (tönkremenetele) a szükséges élettartalma alatt meghaladja az elviselhető mértéket akkor azokat át kell építeni, pótbiztosításokat kell beépíteni vagy a kőzetkörnyezetet kell megerősíteni pl. injektálással. Minden ilyen pótlólagos munka jelentős többletköltséggel jár, így kihat az üzem gazdaságosságára.

A Vértesi Erőmű Rt. azzal bízta meg a Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Tanszékét, hogy működjön közre a vágatkörnyezet injektálással történő megerősítésére irányuló fejlesztésekben. A gépészeti berendezések tervezését és kivitelezését a Szigma Mérnöki Iroda végezte.

A Vértesi Erőmű Rt. Márkushegyi Bányauzemére az ún. nyitott kapuíves, acél TH biztosítású vágatok a jellemzőek. A vágat talpa nem kerül biztosításra és a kis szilárdságú, nedvességre érzékeny, fekükőzetek miatt gyakori a talpduzzadás jelensége. A szükséges nyitott vágatkeresztmetszet érdekében ilyenkor a betüremkedett kőzetet eltávolítják, azaz talpat szednek. Többszöri talpszedés után a kőzetmozgások miatt a TH ívek elgörbülnek, tönkremennek.

A bányauzemben többféle módon kísérelték meg a vágatok élettartamának növelését. Különböző kőzetviszonyok mellett más-más megoldás a célszerű. Az eddig használt eljárások a következők:

- TH ívek sűrítése,
- kőzethorgonyzás,
- kiegészítő biztosítás (poligon, pillér, egyenes TH),
- ellenív beépítése,
- körszelvényű vágathajtás,
- íves talpszedés.

Ennek a kutatásnak a keretében főként az injektálás alkalmazásának a lehetőségét vizsgáltuk.

3.1 Az injektálásról általában

Injektálás során a kőzet hézagait töltjük ki valamilyen „idegen” anyaggal. Az injektálás célja, hogy a kőzet valamely fizikai vagy mechanikai tulajdonságát megváltoztassuk (pl. áteresztőképesség, szilárdság stb.). Az egyes injektálási módokat többféleképpen csoportosíthatjuk. Tehetjük ezt az injektálás módja, az injektálás célja, az injektált kőzet típusa, a bepréselt injektáló anyag és még számtalan szempont szerint.

Injektálni elsősorban a laza-szemcsés és az összeálló kőzeteket lehet. Különleges esetekben találkozhatunk laza kötött kőzetek injektálásával is (pl. injektálással sikeresen rögzítettek horgonyokat agyagban).

A laza-szemcsés és a repedezett összeálló kőzet injektálása nagyon különböző. A laza-szemcsés anyagok megbontva kőzetalkotó ásványi szemcsékre oszlanak. Az ilyen laza-szemcsés anyagok injektálásánál az a cél, hogy a kőzetet ásványi alkotóelemeire bontsuk és az injektáló anyagból és a kőzetszemcsékből minél homogénebb keveréket képezzünk. Az injektáló anyag kötése, azaz a keverék megszilárdulása után a kőzet több fizikai jellemzője megváltozik. Gyakorlatilag egy egészen más tulajdonságokkal rendelkező kőzetet hozunk létre. Ilyen alapozási technikát alkalmaznak pl. az építőiparban a jet-grouting eljárás során vagy hasonlóan járhatunk el, ha alagútépítés vagy aknamélyítés során laza homokot vagy kavicsot kell harántolni.

Repedezett összeálló kőzetek esetében a kőzettestet repedések osztják kőzettömbökre. A repedezett kőzetek injektálásánál az a cél, hogy a repedéseknek a kőzettömb tulajdonságait befolyásoló hatását számunkra minél kedvezőbbé tegyük. Ilyenkor nem áll módunkban a kőzettömb tulajdonságainak megváltoztatása, csak a repedésrendszer módosító hatásait tudjuk befolyásolni. Az injektálás során nem érhetünk el pl. a kőzettömb szilárdságánál nagyobb szilárdsági értékeket, csak megközelíthetjük azt.

A bányászatban az injektálást kezdetben vízkizárásra használták. Természetesen a vízkizárás mellett ilyenkor is jelentkezett az eljárás kőzetszilárdító hatása is. Elsődlegesen kőzetszilárdítási céllal a 70-es évektől injektáltak Magyarországon.

Az eredményes injektálásnak minden esetben egyik feltétele a megfelelő injektálóanyag kiválasztása, amely eredetileg folyékony halmazállapotú, és a pórusokban szilárdul meg. Ha a szilárdulás vegyi folyamat eredménye: vegyi szilárdságnak nevezik. A vegyi reakcióba lépő anyagok egyesíthetők injektálás előtt vagy injektálás után a kőzetben, az előbbi az „egyfolyadékos”, az utóbbi a „kétfolyadékos” eljárás. Hatékony vízzárásra csak „egyfolyadékos” eljárás alkalmas. A leggyakrabban alkalmazott vegyi szilárdítóanyagok [Schmieder et al.]:

- a vizes cementzagy,
- a szervesetlen szilikátok vizes oldatai,
- a szerves polimerek, pl. kétkomponensű műgyanták.

Az injektálandó zagyok, folyadékok legfontosabb tulajdonságai:

- a szilárdsági jellemzők,
- a tapadási jellemzők,
- a szilárd szemcsék mérete (zagyokban),

- a viszkozitás és
- a kötési idő.

E tulajdonságoktól függ, milyen jellegű és méretű járatok injektálhatók, és milyen lesz az injektált kőzet tulajdonsága.

Az injektálás végezhető egy ütemben vagy szakaszosan. Ha az injektálást nem közel állandó repedezettségű és szilárdságú kőzetben végezzük, egyenlőtlen nyomáseloszlású tér keletkezik, amelyben az injektálás hatósugara irányok szerint lényegesen különböző. Ilyen kőzetekben az injektált tartomány egyenlőtlen kiterjedésű és minőségű. Együtemű injektálásra leginkább homogén repedezettségű szilárd kőzetek alkalmasak. Inhomogén kőzetekben a szakaszos injektálás a gyakoribb. Az injektálás rendszerét, az anyagot és a technológiát egyaránt a kőzetviszonyok határozzák meg.

A kőzettörés veszélye miatt az injektálás nem végezhető tetszőleges nyomással. A kőzetek inhomogenitása miatt a szakaszos szilárdítás az előnyösebb. Ha a víz szivárgási sebessége 0,1 m/s-nál nagyobb, nem lehet hatékonyan szilárdítani. Ilyen nagy vízsebesség kavicsokban, konglomerátumokban fordul elő. E kőzetekben először szemcsés anyagokat kell injektálni, hogy a vízáramlás sebessége csökkenjen. Ezt követheti pl. cementzagy beadása.

Repedezett kőzetek tömítésére a repedésméretektől, a kőzet szilárdságától, a résvizek vegyi összetételétől függően kell az injektálandó anyagot kiválasztani:

- Szilárd repedezett kőzetekben, pl. mészkőben, eruptivumban kisméretű repedések tömítéséhez agyagos, betonitos zagy, nagyobb repedésekhez cementzagy használatos.
- Ha igen kis méretű repedéseket kell tömíteni, a kis viszkozitású vegyi szilárdító-tömítő anyagok jöhetnek számításba.

Inhomogén repedezettségű kőzetben – az áramlást leíró összefüggések mennyiségi következtetésekre annál kevésbé használhatók, mennél kisebb területet vizsgálunk. Ilyen esetben a hatósugár kizárólag tapasztalatokból, megfigyelőfúrásokból ismerhető meg. A fúrásokat minden esetben a repedezettség irányítottságát figyelembe véve kell telepíteni úgy, hogy egységnyi fúráshosszal a lehető legtöbb repedést harántoljuk.

Előnyös, ha az injektálási nyomás az injektálás alatti időben változatlan. Ha a nyomás periodikusan változik, az injektálás hatósugara nem az átlagos, hanem a minimális nyomásnak megfelelően alakul. Periodikus nyomásváltozásnál, ha az áramlás megszűnik, az áramlás megindításához a nyugalmi súrlódást is le kell győzni, tehát a pulzáló nyomású injektálásnál azonos hatósugár eléréséhez többletnyomás szükséges.

A bányászatban az alábbi célokra alkalmazhatunk injektálást:

- kőzetek vízvezető képességének csökkentése,
- vízbetörések elzárása,
- üregek kőzetkörnyezetének megerősítése,
- pillérek megerősítése,
- kis szilárdságú rétegek, (pl. szénrétegek) szilárdítása,
- vetők stabilizálása,

- kőzethorgonyok megerősítése.

3.2 Gyakorlati szempontok az üregek biztosításának beépítéséhez és megerősítéséhez

A biztosítószerkezet feladata, hogy az üregnyitás után kialakuló feszültséggel szemben megfelelő támasztóerőt tudjon kifejteni és így kialakuljon egy egyensúlyi állapot. Ha a vágat körüli kőzettest szilárdsága lecsökken, akkor a biztosítószerkezetnek kell nagyobb terhelést „magára vennie”. Fontos tehát, hogy a kőzettest szilárdsági paraméterei a vágathajtás következtében minél kevésbé csökkenjenek.

A kőzetrepedések kialakulása, illetve a meglévő repedések felnyílása, a kőzettömbök egymáshoz képesti elmozdulása csökkenti a kőzettest szilárdsági értékeit. A szilárdság csökkenésének mértéke tehát függ:

- az üregnyitás (fejtés) módjától,
- az alkalmazott biztosítószerkezettől és
- a beépítés körülményeitől.

A biztosítás beépítése során az alábbiakra figyelemmel kell lenni:

- a) A biztosítószerkezetet az üregnyitást követően minél hamarabb kell beépíteni, hogy az elmozdulások csökkentésével minél kevésbé romoljanak a kőzettest szilárdsági paraméterei.
- b) A kőzetkörnyezet teherviselő képességének szempontjából legjobb megoldás, ha a biztosítást már az üregnyitás előtt beépítjük. Erre csak injektálásnál és egyes kőzethorgony-típusoknál van lehetőség.
- c) Előnyben kell részesíteni azokat a biztosítószerkezeteket, amelyek közvetlenül a vágvégén beépíthetőek (kőzethorgonyzás, injektálás, TH-ívek).
- d) Biztosítani kell a kőzetkörnyezet és a teljes biztosítási rendszer minél hamarabbi együttlátását. A háttér mértékét minimalizálni kell. Fokozottan ügyelni kell a pontos szelvényalak gépi kialakítására.
- e) A teljes biztosítási rendszert minél hamarabb ki kell építeni.
- f) A vágatállékonyság szempontjából sokkal kevésbé lehet hatásos a biztosítás utólagos megerősítése, mint a pótbiztosítás és a főbiztosítás egyidejű beépítése. (Ez alól csak az utólagos injektálás lehet kivétel.)
- g) A TH-íves biztosítás megerősítésének leghatékonyabb módjai:
 - a kőzethorgonyzás,
 - az injektálás, ill.
 - ezek kombinációja.
- h) Mind a kőzethorgonyzással, mind pedig az injektálásos biztosítással egy teherviselő kőzetövet hozunk létre.
 - Ilyen esetben folyamatos rögzítésű lehetőleg engedékeny kőzethorgonyokat kell alkalmazni.
 - Az injektálásos kőzetszilárdítás hosszú távon csak akkor lehet hatásos, ha megakadályozza a repedések újranyílását. ill. új repedések későbbi kialakulását.
- i) A repedés-újranyílások megakadályozásának módjai:

- Erősen repedezett kőzettestben, ha az injektáló anyag teljesen magába tudja ágyazni a kőzetszemcséket nagy szilárdságú injektáló anyag alkalmazásával érhetjük el a kívánt célt. (Ez csak nagyon repedezett környezetben, vagy szemcsés kőzetben lehetséges. Ilyenkor igen nagy mennyiségű injektáló anyagra van szükség, így többnyire csak a cement alapú injektáló szerek jöhetnek szóba.)
- Egyéb esetekben olyan injektáló szert kell alkalmazni, amely kivételesen jól tapad a kőzetszemcsékhez és így megakadályozza a kőzet darabok (kőzettömbök) elmozdulását a repedések mentén.
- Az injektálás és a kőzethorgonyzás együttes alkalmazásával.

3.3 A Márkushegyi Bányüzemben kísérleti jelleggel alkalmazott injektálás jellemzői [Vicsai et al. 2005]

A márkushegyi injektálási kísérletek célja az volt, hogy a vágat környezetében fellazult kőzetet a repedésrendszer kitöltésével erősítsék meg. A gyorsan szilárduló injektáló anyagnak köszönhetően a létrejövő kőzetgyűrű, vagy boltív szinte azonnal újra teherviselő.

Sík, vagy térbeli vágatkereszteződéseknél a kinyitott főtérfelület a becsatlakozó vágatszakaszokkal együtt akár 100 m^2 is lehet, így az ép kőzetekre támaszkodó terhelés akkora konvergenciát idéz elő, amely beavatkozás nélkül az értékes és drágán kialakított objektum tönkremeneteléhez vezethet.

Több gyártó terméke közül a bányatárségek megerősítésére az alábbiakkal jellemezhető kétkomponensű injektáló-anyagot választották, természetesen a gazdasági lehetőségek figyelembevételével:

- egyirányú nyomószilárdság: 18 N/mm^2 ,
- húzó- és hajlító szilárdság: $12,4 \text{ N/mm}^2$,
- volumetrikus keverési arány 1:1.

A kiválasztás során fontos szempont volt:

- az alacsony kötési zsugorodás,
- az alacsony viszkozitási érték,
- a kötés után elasztikus képesség,
- a jó tapadó képesség bányabeli körülmények között (por, víz),
- a fiziológiai és környezetvédelmi megfelelés,
- az injektálóanyagnak bányabeli körülmények közötti kezelhetősége és
- az igény szerint változtatható kötési idő.

A megfelelő kötési idő külszíni injektálásoknál ez általában 0,5-1,0 perc körüli érték, a bányabeli körülményeink azonban esetenként lényegesen hosszabb 3-4 perces kötési időt tesznek szükségessé.

Az injektálási nyomás értéke átlagosan 2 MPa volt, amely a kőzet repedezettségétől függően $0,5$ és 3 MPa között változott. Márkushegyi körülmények között az elváló,

repedezett lepergő rész kb. 1,0m vastagságú, ezért a kőzetköpeny megerősítésének csak az ennél távolabbi térségben van értelme. Az injektáló pakker záró részét ennek megfelelően a vágat felületétől egy méter mélységben kellett elhelyezni. Csak nagyon töredezett zónában fordult elő, hogy 1,5m-nél távolabb kellett a lyukat lezárni és az injektálást indítani.

Minden megerősített szakaszhoz injektálási terv készült, amely a rendelkezésre álló korábbi információk figyelembevételével meghatározta az injektáló furatok kiosztását, az injektálás sorrendjét és a szükséges injektáló anyag várható mennyiségét. A fúrási háló rendszerint 1,2 x 1,2 m-es, a lyukak mélysége pedig 3,0 m volt.

3.4 További fejlesztési lehetőségek

Erősen repedezett tartományokban – tekintettel arra, hogy a márgák vízre érzékeny kőzetek, célszerű a megnézia-cementnek mint injektáló anyagnak a kipróbálását. Ezzel az anyaggal a kb. 0,3 mm-nél nagyobb repedéseket lehet kitölteni.

Erősen repedezett zónában célszerű kipróbálni a kétlépcsős injektálást. A tervezett injektáló lyukakat két csoportra kell osztani úgy, hogy az első csoport által meghatározott négyszögek súlypontjába fúrjuk a második csoport lyukait.

A két lépcsős injektálás előnyei:

- A második lyukcsoportot kedvezőbb kőzetkörülmények mellett lehet kifúrni (állékonyabb lyukak).
- A második csoport lyukait nagyobb nyomással lehet injektálni a már elkészült első injektálási sorozattal szilárdított kőzetköpeny védelmében, ezáltal nagyobb lehet az injektálás hatótávolsága.

Ha munkálatokat egy kiemelten védendő létesítmény közelében kell végezni, akkor a kőzet teherviselő képességét előinjektálással lehet megnövelni. Vágathajtás esetén ez klasszikus előinjektálást jelent, vágatbővítés esetén pedig „mélyinjektálást”. (Pakkerek célszerű alkalmazásával érhetjük el, hogy egy távolabbi kőzetövet szilárdítsunk meg, amely a felbővített szelvény kontúrján kívül fog esni.)

Hivatkozások

- Bieniawski Z.T. (1978): Detemining rock mass deformability: experience from case histories, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Gemech.* Abstr. **15**: 237-247.
- Brown E.T.; Hoek E. (1978): Trends in relationships between measured in situ stresses and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Abstr. **15**: 211-215.
- Haimson B.C. (1978): The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Abstr. **15**: 167-178.
- Hoek E.; Brown E.T. (1997): Tractical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Abstr. **34**(8): 1165-1186.
- Jaeger J.C.; Cook N.G.W. (1969): *Fundamentals of Rock Mechanics*, London: Chapman and Hall.
- Kayabasi A. et. al (2003):. Predicting the deformation modulus of rock Masses, *Int. J. Rock Mech. Min, Sci. & Geomech* Abstr. **40**. 701-710.
- Martin C.D. (2004): Stress, instability and design on underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Abstr. **40**. 1027-1047.
- Priest S.D.; Hudson, J.A. (1976): Discontinuity spacings in rock. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech.* Abstr. **13**, 135-148.
- Schmieder A.; Kesserű Zs.; Juhász J.; Martos F. (1975): *Vízveszély és vízgazdálkodás a bányászatban*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 254-273.
- Somosvári Zs. (1994): Komplex mérési eljárás geotechnikai feladatok megoldásához, *Geotechnika'94 konf. kiadványa*, 1-5.
- Somosvári Zs.; Földesi, J. (1995): Földalatti üregek állékonyságának meghatározása szeizmikus mérések alapján, *ME Közleményei, Miskolc, A. sorozat, Bányászat* **50**: 147-161.
- Somosvári Zs. (1995): A kőzetkörnyezet diszkontinuitásainak befolyása a geotechnikai feladatok megoldásánál, *ME Közleményei, Miskolc, A. sorozat, Bányászat* **50**: 129-145.
- Somosvári Zs. (2006): Nagyméretű üregnyitások biztonsági kérdései, *ME Közleményei, Miskolc, A. sorozat, Bányászat* **68**: 39-52.
- Vicsai J.; Németh L.; Kovács T. (2005): A vágatok környezetének injektálással történő megerősítése, *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat*, **138**(3): 2-7.