

A cikk célja a már Magyarországon is bemutatott Hoek-Brown törési elmélet általánosított alakjának hazai bevezetése. Ez az általánosított alak figyelembe veszi a fejtés vagy robbantás alatt bekövetkező töredezettségváltozást is. Az elmélet szervesen illeszkedik a Bieniawski féle RMR osztályozáshoz, mivel a Hoek-Brown törési elméletben használt Geológiai Szilárdsági Index (GSI) értéke azzal megegyezik. Számos alagút és sziklarézsű vizsgálata alapján Hoek-Brown és a Mohr-Coulomb törési elméletek bizonyos határon belül átszámolhatóak, így lehetőség van a kőzettest súrlódási szögének és a kohéziójának az ismeretére is. A gyakorlati tapasztalatok alapján, a Hoek-Brown törésemélettel a kőzettest törési határállapota jobban felírható, mint az eddigi hagyományos módszerekkel.

Bevezetés

A kőzettömbök és kőzettestek törési határállapotának modellezésére fejlesztették ki az ún. *Hoek-Brown* törési kritériumot, amely a rideg kőzetek határgörbéjének modellezésére és a kőzetkörnyezet feszültségállapotának számítására már a gyakorlatban is – főleg az alagútépítésben – nagyon elterjedt. Az empirikus alapokon felállított elméletet a gyakorlat igazolta, mert jobban lehet azzal a valós állapotot modellezni, mint a hagyományos *Mohr-Coulomb* elmélettel. A *Hoek-Brown* törési állapot segítségével, bizonyos határok között, lehetőség nyílik a kőzettest súrlódási szögének és kohéziójának a számítására is [1].

A geológiai megfigyeléseket is figyelembe véve (főleg a kis szilárdságú és töredezett kőzetek esetén) szükségessé vált az ún. Geológiai Szilárdsági Index (GSI) bevezetése. Számos cikkben mutatták be a gyakorlati alkalmazását. A GSI értékileg megegyezik a *Bieniawski* által bevezetett RMR tényezővel [2, 3, 4].

A szerzők felismerték azt a problémát, hogy mind az alagútépítésnél, mind a külszíni kőbányászatnál (sziklarézsűknél) a fejtés (mely lehet akár robbantásos, akár géppel végzett) a kőzetkörnyezet károsodásával jár, melynek hatására az előre számított szilárdsági értékek megváltoznak (csökkennek). Ezért a kőzetkörnyezet károsodásának a figyelembevételére a *Hoek-Brown* törési elméletet továbbfejlesztették [9], bevezetve a károsodási értékeket (mely 0 és 1 közötti, felvétele szubjektíven történik). A cikk célja ezen elmélet bemutatása, mely szerves folytatása a szerző által már előzőekben bemutatott, a *Hoek-Brown* törési elmélet alapjait összefoglaló tanulmánynak [10]. A terminológiában kőzettömbnek (kőzetblokknak) nevezzük a tagolatlan térbeli egységet, míg kőzettestnek az azonos kőzettömbökből álló, de diszlokációt (tagolófelületet, töréseket, stb.) tartalmazó térelemet. Természetesen a számítási modellel csak kőzettestet lehet modellezni.

A Hoek-Brown kritérium ép kőzetekre

Hoek és Brown (1980) rideg kőzetek triaxiális vizsgálata után megszerkesztve azok törési határgörbéjét, a következő empirikus egyenletet írták fel [1]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_{\text{ép}} \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0,5} \quad (1)$$

Ahol σ_1 és σ_3 a főfeszültségek, σ_c az egyirányú nyomószilárdság és $m_{\text{ép}}$ az ép kőzet ún. Hoek-Brown állandója, melynek meghatározása triaxiális kísérletekkel történik. Az egyirányú nyomószilárdság függvényében az általuk bevezetett állandók és a főfeszültségek között az összefüggés:

$$y = m s_c x + s_c \quad (2)$$

$$\text{ahol } x = s_3 \text{ és } y = (s_3 - s_1)^2,$$

n számú triaxiális mérés esetén (ennek minimális száma 5) a következőképpen számolhatók ki a fenti anyagállandók:

A határszilárdság (s_c):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum y}{n} - \frac{\left[\sum xy - \left(\sum x \sum y / n \right) \right] \sum x}{\sum x^2 - \left(\left(\sum x \right)^2 / n \right)}} \frac{\sum x}{n} \quad (3)$$

az ép kőzetnek Hoek-Brown állandója ($m_{\text{ép}}$):

$$m_{\text{ép}} = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[\frac{\sum xy - \left(\sum x \sum y / n \right)}{\sum x^2 - \left(\left(\sum x \right)^2 / n \right)} \right] \quad (4)$$

illetve a mérés hibája (mely a próbatest számának növelésével tart az 1 felé, és törekedni kell, hogy ez az érték 0,9-nél nagyobb legyen):

$$r^2 = \frac{\left[\sum xy - \left(\sum x \sum y / n \right) \right]^2}{\left[\sum x^2 - \left(\sum x \right)^2 / n \right] \left[\sum y^2 - \left(\sum y \right)^2 / n \right]} \quad (5)$$

Az 1. táblázat fontosabb kőzeteknek adja meg a Hoek-Brown állandóját ($m_{\text{ép}}$). Ezek az értékek nagyban függnek a kőzet mállottsági viszonyától is: ugyanannak a kőzetnek üde állapotban a Hoek-Brown állandója akár kétszerese is lehet, mint a mállotté. Természetesen a táblázat nem pótolja a laboratóriumi vizsgálatokat, melyekkel a fenti állandók pontosabban meghatározhatók.

Általánosított Hoek-Brown kritérium

Míg az (1) egyenlet csak ép kőzet törési görbéjének meghatározására használható, addig a gyakorlatban igény van a tagoltságokkal, törési felületekkel, diszlokációkkal rendelkező kőzetestek törési határgörbéjére is. Belátható [5], hogy amennyiben a tagolófelületek száma

több mint 3, abban az esetben a kőzettest (mechanikai értelemben) már homogénnek tekinthető. Hoek [9] az (1) egyenlet általános formájának a következőt adja meg, mely módosítás a Hoek és Brown [4] alapján történt:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (6)$$

ahol a fentebb bemutatott állandókon kívül a következőket definiálják:

$$m_b = m_{ep} \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (7a)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (7b)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (7c)$$

Ezen tényezőkben a D függ a károsodás mértékétől (értéke abban az esetben, ha nincs károsodás: 0, míg nagy mértékű roncsolódás esetén 1). Hoek [9] cikkében számos példában mutatja be a D tényezőjének felvételét, mely szubjektív tényezőként nem mérhető. Az 1. mellékletben az ajánlott károsodási értékeket néhány példán keresztül mutatjuk be.

Az egyenletekben szereplő GSI tényező (értéke 0 és 100 közötti) megfelel a Bieniawski [3] féle RMR értéknek. Meghatározásra terepi megfigyelésen alapul, ahol a kőzettest szerkezete és a tagolófelületek állapota alapján történik az osztályba sorolás, ahogy azt az 1. ábrán közreadjuk.





A kőzettest egyirányú nyomószilárdsága a kőzettömb szilárdságának ismeretében tehát, a (6) egyenlet alapján ($s_3 = 0$):

$$s_c = s_{ci} s^a \quad (8)$$

valamint a húzószilárdság értéke (feltételezve, hogy a biaxiális húzás esetén $s_1 = s_3 = s_t$. Hoek [2] bebizonyította, hogy rideg anyagok esetén a biaxiális és egyirányú húzószilárdság megegyezik):

$$\sigma_t = -\frac{s \sigma_{ci}}{m_b} \quad (9)$$

A fenti egyenletek alapján meghatározott főfeszültségek ismeretében lehetőség van a normál- és nyírófeszültség számítására is:

<p style="text-align: center;">GEOLÓGIAI SZILÁRDSÁGI INDEX (GSI)</p> <p style="text-align: center;">SZERKEZET</p>		<p style="text-align: center;">TAGOLÓFELÜLET ÁLLAPOTA</p> <p style="text-align: center;">NAGYON JÓ, Nagyon érdes és üde felülettel,</p> <p style="text-align: center;">JÓ, Érdes kissé mállott vagy vasfoltos felülettel.</p> <p style="text-align: center;">TÜRHETŐ, Sima és/vagy mérsékeltlen mállott és átalakult felülettel.</p> <p style="text-align: center;">GYENGE, Simára kopott v. erősen mállott felületek v. szögletes törmelékkel kitöltött réteg</p> <p style="text-align: center;">NAGYON GYENGE, Sovány agyaggal kitöltött simára kopott és erősen mállott felületek</p> <p style="text-align: center;">CSÖKKENŐ FELÜLETI MINŐSÉG ▽</p>				
 <p>BLOKKOS - nagyon jól összekapcsolódó ép kőzettest, mely kockatömböket tartalmaz, melyeket 3 orthogonális diszkontinuitás szabdal</p>	<p style="text-align: center;">80</p> <p style="text-align: center;">70</p>					
 <p>NAGYON BLOKKOS - összekapcsolódó, részlegesen töredezett kőzettest, melyet 4 vagy annál több diszkontinuitás szabdalja</p>	<p style="text-align: center;">60</p> <p style="text-align: center;">50</p>					
 <p>BLOKKOS/TÖREDEZETT - töredezett és/vagy gyűrűs szögletes kőzettömbökből álló kőzettest, melyet számos diszkontinuitás szabdal</p>	<p style="text-align: center;">40</p> <p style="text-align: center;">30</p>					
 <p>SZÉTESŐ - rosszul összekapcsolódó, erősen töredezett kőzettest, mely érdes és kopott törmelékekből áll</p>	<p style="text-align: center;">20</p> <p style="text-align: center;">10</p>					

1. ábra: A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) meghatározása és értékei

1. ábra A Geológiai Szilárdsági Index (GSI) meghatározása és értékei

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \frac{d\sigma'_1/d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (10)$$

illetve,

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (11)$$

ahol,

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b (m_b/\sigma_{ci} + s)^{a-1} \quad (12)$$

A deformációs modulus meghatározása

A kőzettest deformációs modulusának számítására az eredeti képletet [4] a következőképpen módosították:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{((GSI-1)/40)} \quad (13)$$

Az egyenletben szereplő D tényező megegyezik a fentebb meghatározottal.

Mohr-Coulomb kritérium

Mivel a geotechnikai/mérnökgeológiai gyakorlatban a *Mohr-Coulomb* törési határállapot használata az egyik legerjedtebb, ezért szükségessé vált a fentebb bemutatott elmélet alapján is a súrlódási szög és a kohézió meghatározásra. A kőzettest súrlódási szöge (ϕ') és kohéziója (c') a következőképpen – fentebb már definiált állandókkal – számítható ki:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (14)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n} \right] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}} \quad (15)$$

ahol $s_{3n} = s_{3n \max} / s_{ci}$

A $s'_{3n \max}$ érték a környezeti nyomás felső értéke, melynél a *Hoek-Brown* kritérium a *Mohr-Coulomb* törési kritériummá átszámolható, minden kőzetenél különböző, melyet a következőkben mutatunk be.

A meghatározott súrlódási szög (ϕ') és kohézió (c') ismeretében a nyírási szilárdság (τ) és a normálfeszültség (s) közötti kapcsolat a jól ismert egyenlettel írható fel:

$$l = c' + \tan \phi' s \quad (16)$$

Valamint a főfeszültségek közötti kapcsolat [10]:

$$\sigma_1' = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_3' \quad (17)$$

A kiszámított anyagállandók segítségével lehetőség van a kőzettest szilárdságának a meghatározására is:

$$\sigma_{cm}' = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (18)$$

illetve a kőzetblokk és a *Hoek-Brown* anyagállandók ismeretében:

$$\sigma_{cm}' = \sigma_{ci}' \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (19)$$

A $s_{3\max}'$ meghatározása

A (14) és (15) egyenletekben definiált $s_{3\max}'$ tényező értékének meghatározása különbözik alagutaknál és sziklarézsúknél, ezért külön-külön mutatjuk be azokat.

Alagutaknál:

Több száz eredményt feldolgozva, mély vezetésű alagutaknál, a helyszínen mért kőzettestszilárdság ismeretében *Hoek* [9] a következő összefüggést adta meg:

$$\frac{\sigma_{3\max}'}{\sigma_{cm}'} = 0,47 \left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma H} \right)^{-0,94} \quad (20)$$

ahol s_{cm}' a kőzettest szilárdsága a (19) egyenlet szerint kiszámolva, γ a kőzettest egységnyi súlya és H az alagút felszín alatti mélysége.

Abban az esetben, ha az alagút mélysége kisebb, mint az átmérőjének háromszorosa, a felszíni süppedések következtében a fenti egyenlet nem használható.

Sziklarézsuíket vizsgálva a (20) egyenlet a következőképpen módosult:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \quad (21)$$

ahol H a sziklarézsuí magassága.

1. táblázat

Néhány kőzet Hoek-Brown állandója ($m_{\text{ép}}$)

Üledékes kőzetek	$m_{\text{ép}}$	Magmás kőzetek	$m_{\text{ép}}$	Átalakult kőzetek	$m_{\text{ép}}$
agyagkő	3,4	andezit	18,9	amfibolit	31,2
anhydrite	13,2	bazalt	17	amfibolitos gneisz	31
szén	8-21	dácit	17	augén gneisz	30
breccsa	20	diabáz	15,2	gránit gneisz	30
dolomit	10,1	diorit	27	gneisz	29,2
gipszkő	16	gabbró	25,8	zöldkő	20
grauwacke	18	gránit	32,7	márvány	9,3
homokkő	19	granodiorit	20	mika gneisz	30
iszapkő	9,6	monzonit	30	mika pala	15
konglomerátum	22	norit	21,7	fillit	13
kréta	7,2	obszidián	19	csillámpala	4-8
mészkő (mikrites)	8,4	riolit	20	milonit	6
mészkő (pátitos)	10	szienit	30	talk pala	10
		tufa	15	kvarcit	23,7

Köszönetnyilvánítás

Az OTKA F 043291 és T 034603 számú kutatások tették lehetővé a cikk megírását, valamint a szerző köszönetét fejezi ki *Evert Hoek* professzornak, hogy segítséget nyújtott elméletének megismeréséhez.

Irodalom

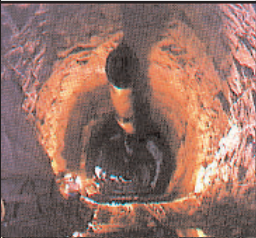

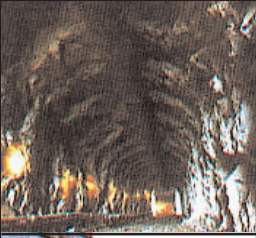
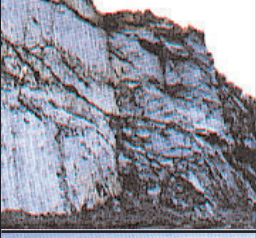

- [1] *Hoek, E. & Brown, E.T.*: Underground excavations in rock. London, Inst. Min. Metall. (1980)
- [2] *Hoek, E.*: Strength of jointed rock masses. 23. Rankie Lect., Geotechnique, 33: 187-223. (1983)
- [3] *Bieniawski, Z.T.*: Engineering rock mass classification, 251 p. Wiley (1989)
- [4] *Hoek, E. & Brown, E.T.*: Practical estimates of rock mass strength. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., 34: 1165-1186. (1997)
- [5] *Hoek, E.*: Practical Rock Engineering. www.rocscience.com (2000)
- [6] *Hoek, E.; Marinos, P. & Benissi, M.*: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation. – Bul. Engng. Geology & Env. 57: 151-160. (1998)
- [7] *Marinos, P. & Hoek, E.*: GSI: A geologically friendly for rock mass strength estimations. – In: Ervin, M.C. (Ed.) GeoEng 2000 Melbourne, CD-ROM. (2000)
- [8] *Marinos P. & Hoek E.*: Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. – Bul. Engng. Geology & Env. 60: 85-92. (2001)

[9] Hoek, E.; Carranza-Torres, C. & Corkum, B.: Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. Proc. 5th North American Rock Mech. Conf. Toronto, 267-271. (2002)

[10] Vászárhegyi B.: Új eredmények a kőzet- és talajmechanikában: a Hoek-Brown törési határállapot és a Geológiai Szilárdsági Index (GSI) bemutatása – Közlekedési és Mélyépítéstudományi Szemle. 51: 424-431. (2001)

1. melléklet

A kőzettest többlet-töredezettségének (károsodásának) változása fejtés-robbantás hatására [9]

A kőzettípus megjelenése	A kőzettípus leírása	Ajánlott D érték
	Nagyon jó minőségű ellenőrzött robbantás vagy alagútfúró géppel (TBM) történő fúrás eredményeként az alagút körüli kőzettest minimális károsodása.	D=0
	Rossz minőségű kőzettestben (nincs robbantás) gépi vagy kézi fejtés eredményeként a környező kőzettest minimális károsodása. Duzzadás esetén, amikor a talp karakteresen megemelkedik, károsodás jelentkezhet, hacsak időleges megtámasztást nem alkalmaznak.	D=0 D=0,5 Nincs alsó megtámasztás
	Kemény kőzetben nagyon rossz minőségű robbantás számos lokális károsodást okozhat, mely akár 2-3 m mélységű is lehet a környező kőzettestben.	D=0,8
	Sziklarézsú robbantása: a kép bal oldalán jól kivitelezett, míg a jobb oldalán rosszul kivitelezett robbantás eredménye látható.	D=0,7 Jó minőségű robbantás D=1,0 Rossz minőségű robbantás
	Nagy külszíni bányáknál robbantásos fejtés hatására bekövetkező károsodás, melynél a fejtés következtében bekövetkezett terheléscsökkentést is figyelembe kell venni. Néhány puhább kőzet esetén, hasítással történő fejtés esetén a károsodás mértéke csökkenthető	D=1,0 Robbantásos jövesztés esetén D=0,7 Mechanikai jövesztés esetén