

TRIAXIÁLNA PEVNOSŤ - PARAMETRE HORNINOVÉHO MASÍVU PODĽA HOEK-BROWNOVEJ KLASIFIKÁCIE

TRIAXIAL STRENGTH – ROCK MASS PROPERTIES BY HOEK – BROWN’S CLASSIFICATION

Pavol Vavrek¹

Abstrakt

Fyzikálne a mechanické vlastnosti hornín sú používané ako vstupné dáta do geotechnických výpočtov. Ich hodnovernosť ovplyvňuje stupeň spoľahlivosti výsledkov týchto výpočtov. Príspevok sa zaoberá stanovením Hoek - Brownových parametrov masívu pomocou triaxiálnych skúšok. Skúšky boli realizované na nepravom triaxiály T-500A na vzorkách magnezitu z ložiska Jelšava. Boli použité valcové vzorky priemeru 20,5 až 35,0 mm. Hoek-Brownove parametre (m_i – materiálová konštanta, σ_{ci} – tlaková pevnosť intaktnej horniny), porušenosť obvodu výrubu tzv. disturbance faktor (D faktor) a zatriedenie horninového masívu pomocou GSI klasifikácie sú podkladom pre stanovenie vlastností horninového masívu pomocou programu RocLab.

Abstract

Physical and mechanical properties of rocks are used as input data for the geotechnical calculations. It is the accuracy of input data which largely influences the degree of reliability of output parameters of these computations. The article is focused on determining of the Hoek-Brown's parameters of rock mass with using laboratory triaxial tests. The samples of magnesite were removed from the deposit Jelšava. Laboratory tests were carried out on the specimens of a cylindrical shape with diameter from 20.5 to 35.0 mm. These results were the basis for determining the Hoek-Brown's parameters of magnesite (m_i – material constant, σ_{ci} – the uniaxial compressive strength of the intact rock material). H-B parameters, the disturbance factor D and the rock mass classification with using of rock mass index GSI (Geological Strength Index) are inputs for RocLab software which was used to calculate rock mass properties.

Kľúčové slová

Hoek- Brownove parametre, triaxiálna pevnosť, RocLab software

Keywords

Hoek – Brown's parameters, triaxial strength, RocLab software

1 Úvod

Riešenie banských geotechnických úloh analytickým spôsobom alebo matematickým modelovaním si vyžaduje v prvom rade poznanie vlastností dotknutého horninového prostredia. Fyzikálne, mechanické a pretvárne vlastnosti hornín slúžia ako vstupné informácie do výpočtu, ktorých presnosť do značnej miery ovplyvňuje stupeň hodnovernosti výstupných parametrov riešenej úlohy. Existujú v princípe tri spôsoby určenia parametrov modelovaného prostredia:

- použitie smerných normových charakteristík podľa zatriedenia dotknutých hornín,
- použitie laboratórne zistených vlastností,
- implementácia terénnych meraní do výpočtov resp. matematického modelu.

Najideálnejším prípadom je využitie terénnych meraní, ktorých nedostatkom je ale značná časová, finančná a technická náročnosť. Laboratórne skúšky zodpovedajú vo svojej podstate parametrom horninovej matérie, ktorej vlastnosti závisia od petrografického zloženia, štruktúry a textúry hmoty. Takto stanovené vlastnosti sú v porovnaní s komplexnou pevnosťou horninového masívu nadhodnotené. Rozdiel medzi útvarovou a laboratórnou pevnosťou je podmienený výskytom diskontinuít v masíve (pukliny, plochy odlučnosti apod.), čo si vyžaduje pri geotechnických výpočtoch v podmienkach skalných hornín použitie súčiniteľa štruktúrneho oslabenia k_s , ktorý sa určuje v závislosti na zistených parametroch porušenia masívu vyjadrenom indexom RQD. Pri hodnotení vplyvu porušenia masívu na stabilitu podzemných diel je potrebné vziať v úvahu aj iné faktory, napr. vplyv smeru razenia diela vzhľadom k prevládajúcim plochám porušenia masívu, vplyv rozmerov blokov horniny vo vzťahu k rozmerom podzemného diela apod. Vlastnosti horninového masívu nie sú s laboratórnymi parametrami totožné, čo je podmienené rozmermi skúšobných telies, ktorých veľkosť sa spravidla pohybuje v centimetroch. Najmenej vhodným spôsobom je použitie smerných normových charakteristík, ktorých nevýhodou je určitá všeobecnosť.

Jedným z riešení danej problematiky je využitie výsledkov laboratórných meraní (triaxiálnych skúšok) a ich implementácia na podmienky horninového masívu prostredníctvom programu RocLab od firmy RocScience, Canada, 2006.

2 Triaxiálne skúšky

Triaxiálna pevnosť je skúška, ktorá najlepšie simuluje skutočné podmienky v horninovom masíve, keďže sa teleso namáha tlakom orientovaným v troch osiach, na rozdiel od jednoosovej tlakovej skúšky, ktorej okrajové podmienky sa v horninovom masíve vyskytujú len zriedkavo.

Rozlišujeme v princípe dva typy triaxiálnych prístrojov:

- pravé – testujú sa kocky kde $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ (σ_1 – osovú napätie, σ_2, σ_3 – plášťové napätie),
- nepravé – testujú sa valce kde ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$).

Konštrukcia triaxiálnych prístrojov sa líši a to podľa použitých tvarov vzoriek. Prístroje s menšími bočnými tlakmi sú konštruované ako triaxiálne bunky, pri ktorých je osová sila vyvodzovaná bežným lisom. Triaxiálne prístroje s väčšími bočnými tlakmi sú zariadenia so samostatným vývinom bočného tlaku i osovej sily.

Pri testoch bol použitý nepravý triaxiál T- 500A (obr. 1) s vyvodzovaním bočného zaťaženia pomocou tlaku hydraulického oleja. Pri skúškach boli použité vzorky so štíhlostným pomerom $h:d = 2:1$ (h – výška skúšobného telesa, d – priemer skúšobného telesá). Skúšobné telesá boli chránené gumovou manžetou (obr. 2) proti preniknutiu oleja k skúšobnému telesu, ktorý by mohol zmeniť vlastnosti vzorky a tým ovplyvniť výsledky skúšok.



Obr. 1 Nepravý triaxiál T 500A



Obr. 2 Vzorka s ochrannou manžetou

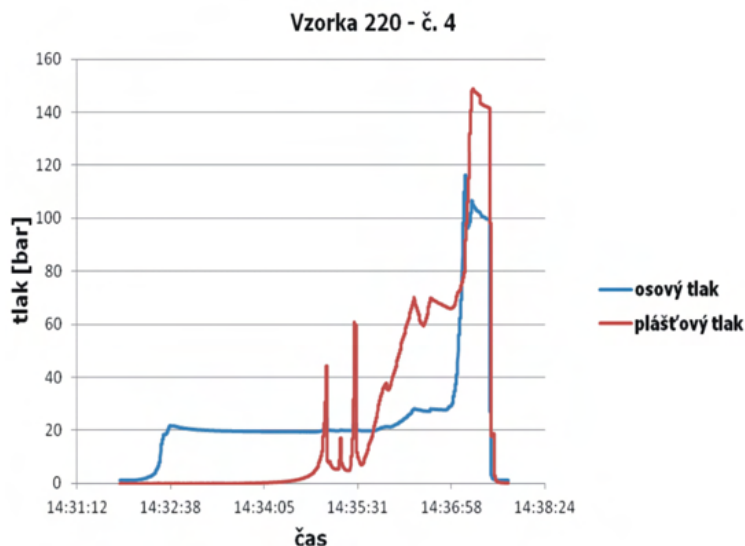
Teleso sa umiestnilo dostredne do bunky triaxiálneho prístroja. Bunka sa následne uzavrela masívnou maticou. Nastavil sa plášťový tlak P_b . Za tohto bočného tlaku sa zvyšoval osový tlak P_1 až do porušenia skúšobného telesa. Hodnoty pracovných tlakov sa automaticky zaznamenávali pomocou snímačov tlaku. Zo získaných hodnôt tlakov P_b a P_1 sa vypočítala osová sila F a osová napätie σ_1 , pri ktorých došlo k porušeniu vzorky.

Výpočet osového napätia σ_1 je realizovaný podľa nasledujúcich vzťahov:

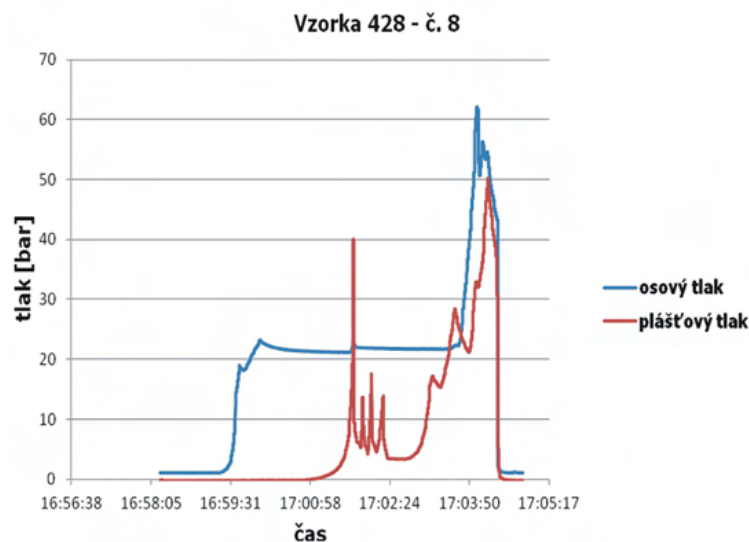
$$F = 0,0048 \times P_1 - (0,001963 - S) \times P_b, \text{ [N]} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{S}, \text{ [Pa]}. \quad (2)$$

Z kusových vzoriek magnezitu izotropného charakteru boli jadrovým vŕtaním pripravené valcové skúšobné telesá, na ktorých sa realizovali triaxiálne skúšky. Vyhodnotenie skúšok sa realizovalo pomocou záznamov testov, na ktorých sa automaticky zachytáva priebeh plášťových (červená farba) a osových (modrá farba) tlakov (obr. 3,4).



Obr. 3 Priebeh triaxiálnej skúšky vz. č.4



Obr. 4 Priebeh triaxiálnej skúšky vz. č.8

Zo záznamu sa vyhodnocovalo maximum osového tlaku a tomu zodpovedajúca hodnota plášťového tlaku. Rozmery skúšobných telies (tab. 1) sa volili vzhľadom k pracovným tlakom použitého triaxiálu. Plášťové zaťaženie skúšobných telies je

max. 50 MPa, maximálna osová sila F vyplývajúca z hydraulického tlaku vo valci prístroja a z plochy priečneho prierezu piestu je 276 kN.

Tab. 1 Výsledky triaxiálnych skúšok

Označenie vzorky	d [mm]	S [mm ²]	h [mm]	m [g]	P _b [MPa]	P ₁ [MPa]	F [MN]	σ_1 [MPa]
220 – 1	20,5	330	40,5	40,85	2,9	6,01	0,0241	73,1
220 – 2	20,5	330	41	41,63	5,08	13,27	0,0554	167,9
220 – 3	20,5	330	40,3	40,42	4,59	11,81	0,0491	149,1
220 – 4	20,5	330	40,9	41,37	7,44	11,5	0,0430	130,5
220 – 5	20,5	330	40,6	40,99	8,5	14,8	0,0572	173,2
220 – 6	20,5	330	41,9	42,00	9,77	16,5	0,0632	191,7
428 – 7	20,5	330	41,3	41,81	3,18	8,94	0,0377	114,3
428 – 8	20,5	330	40,4	40,48	3,30	6,21	0,0244	74,0
428 – 9	29,3	674	58,2	120,21	4,0	23,0	0,1052	156,1
428 – 10	23,8	444	47,0	64,41	0	4,7	0,0226	50,7
428 – 11	35,0	962	65,1	185,53	10	46	0,2108	219,1
428 – 12	35,0	962	64,0	183,3	13,0	48	0,2174	226,0

Pozn.: d – priemer vzorky, S – plocha podstavy vzorky, h – výška vzorky, m – hmotnosť vzorky, P_b – plášťový tlak v bunke, P₁ – osový tlak, F – osová sila, σ_1 – osové napätie

3 Hoek – Brownova klasifikácia

Využitie Hoek-Brownovej klasifikácie na stanovenie parametrov horninového masívu pre účely podzemného staviteľstva a baníctva je vo svete značne rozšírené ale v podmienkach Slovenska sa táto metodika využíva zriedkavo. Na základe realizácie laboratórnych testov je možné v Hoek – Brownovej klasifikácii použiť výsledky pevnosti v prostom tlaku (σ_{II}) alebo použiť výsledky triaxiálnych skúšok testovaných horninových typov.

Výsledky triaxiálnych testov sú podkladom pre stanovenie Hoek – Brownových parametrov:

- m_i – materiálová konštanta,
- σ_{ci} – prepočítaná tlaková pevnosť intaktnej horniny.

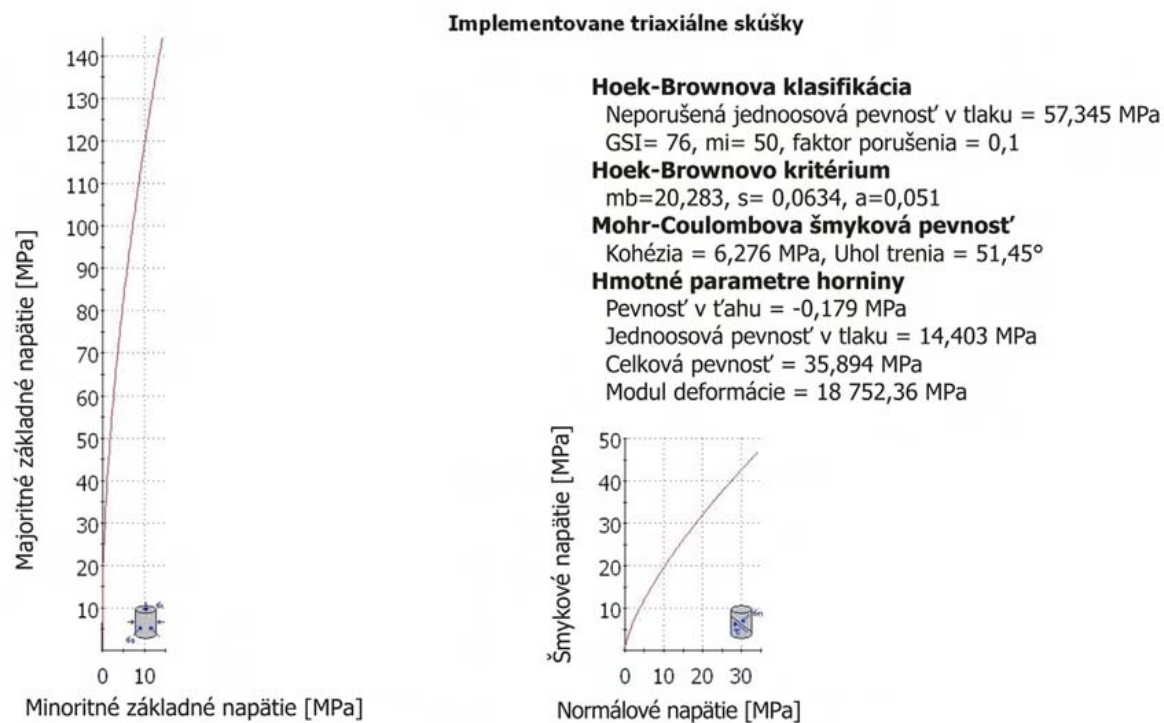
V prípade použitia σ_{II} sa materiálová konštanta m_i stanovuje odhadom, v prípade použitia triaxiálnych testov sa parametre m_i a σ_{ci} vypočítajú v programe RocLab. Hoek – Brownove parametre intaktnej horniny spolu s GSI (Index geologickej pevnosti) indexom a Disturbance faktorom D, (faktor porušenia obvodu výrubu po zábere) sú vstupom pre výpočet parametrov horninového masívu podľa Hoek – Brownovho kritéria.

Celý výpočet sa dá realizovať pomocou už vyššie spomínaného programu RocLab. Porušenie horninového masívu je zohľadnené v H–B klasifikácii pomocou GSI indexu. Stanovenie GSI indexu sa stanovuje pomocou tabuliek zatriedenia, ktoré sú k dispozícii v príslušnej literatúre, ktorú nájdete na http://www.rocscience.com/education/hoek_corner. Prvý parameter zatriedenia podľa GSI vychádza zo štruktúrnej stavby posudzovanej oblasti, druhý parameter klasifikácie GSI zohľadňuje stav povrchu diskontinuít, ktoré sú zatriedené do piatich skupín: veľmi dobrý, dobrý, priemerný, zlý, veľmi zlý povrch. D faktor sa volí v závislosti od porušenia obrysu výrubu. Pre excelentnú kvalitu obrysu výrubu sa používa hodnota $D=0$, pre veľmi zlú kvalitu hodnota $D=1$.

Ako vstupy do programu RocLab sa dajú použiť hodnoty plášťového tlaku v bunke P_b a osového napätia σ_1 z tab. 1 vyjadrujúce chovanie sa magnezitu pri trojosovom namáhaní, respektíve môžeme použiť pevnosť v prostom tlaku (σ_{II}) vyjadrujúcu správanie sa magnezitu pri jednoosovom namáhaní.

Na základe praktických skúsenosti pre podmienky magnezitového ložiska Jelšava boli použité do výpočtu tieto vstupné parametre: $D=0,1$ (veľmi dobrá kvalita obrysu výrubu banských diel a dobývek po výkone trhacích prác) a GS Index $GSI = 76$ (bloková štruktúrna stavba vytvorená systémom plôch nespojitosti, pretínajúcich sa najčastejšie v dvoch až troch smeroch s dobrým stavom povrchu diskontinuít). Výstupom programu RocLab (obr. 5) sú parametre horninového masívu, Mohr – Coulombova šmyková pevnosť a Hoek – Brownove parametre. Jediným vstupom do programu v uvádzanom prípade boli výsledky triaxiálnych testov (tab. 1).

V súčasnosti najviac používaným spôsobom riešenia geotechnických úloh je matematické modelovanie. Špecializované programové balíky pracujú najčastejšie na princípe metódy konečných prvkov (FEM) alebo metódy konečných diferencií



Obr. 5 Parametre masívu podľa Hoek -Brownovej klasifikácie

(FDM). Najčastejšie používaným materiálovo-konštitučným modelom pri úlohách z oblasti mechaniky hornín je Mohr – Coulombov model, ktorý je definovaný spravidla objemovým a šmykovým modulom, ťahovou pevnosťou, uhlom vnútorného trenia a súdržnosťou. Práve tieto vstupy do matematických modelov sa dajú získať vyššie spomínaným postupom.

Pevnosť v prostom tlaku intaktnej horniny (magnezitu) vypočítanej programom RocLab $\sigma_{ci} = 57,345$ MPa (obr. 5) veľmi dobre korešponduje s hodnotou pevnosti v prostom tlaku $\sigma_{tl} = 57,8$ MPa magnezitu, ktorá bola stanovená v laboratóriu ako priemerná hodnota z piatich skúšobných telies pre horizont 482 m n. m. na ložisku Jelšava (Bauer a kol., 2012). Pri pevnostných skúškach sa používali valcové telesá s priemerom $d=63,5$ mm, pri pevnosti v prostom tlaku sa dodržiaval štíhlostný pomer $h:d=2:1$. Veľmi vysoká hodnota materiálovej konštanty $m_i = 50$ (obr. 5) je pravdepodobne zapríčinená malými rozmermi skúšobných telies (tab. 1) pri triaxiálnych testoch, čo je však podmienené technickými parametrami použitého triaxiálu T-500 A. Šmyková pevnosť (kohézia) $\tau = 6,276$ MPa stanovená z triaxiálnych skúšok (obr. 5) je vo veľmi dobre korelácii so šmykovou pevnosťou $\tau = 6,349$ MPa stanovenou torznou šmykovou skúškou in situ na horizonte 400 m n. m. na ložisku Jelšava (Mužík a kol., 1979). Pri riešení geotechnických problémov na ložisku Jelšava matematickým modelovaním systémom GEM 3 (FEM) v predchádzajúcom období riešitelia používali pre magnezit modul pružnosti $E = 22\,800$ MPa (Zahoranský a kol., 1985), čo je v približnej zhode s pretvárnou charakteristikou masívu $E_{def} = 18\,752,36$ MPa stanovenou softvérom RocLab (obr. 5). Modul pružnosti E používaný v systéme GEM 3 bol stanovený odhadom, vychádzalo sa z laboratórne stanovených pretvárných parametrov magnezitu.

4 Záver

Využitie výsledkov triaxiálnych skúšok na stanovenie Hoek-Brownových parametrov a následné stanovenie vlastností horninového masívu pomocou geotechnického softwaru RocLab je jedná z možností, ktoré môžu uľahčiť rozhodovanie pri voľbe vlastností dotknutých horninových typov vstupujúcich do výpočtových postupov.

Porovnanie pevnostných a pretvárných parametrov horninového masívu získaných z triaxiálnych skúšok pomocou programu RocLab s korešpondujúcimi parametrami, ktoré používali iní autori vo svojich prácach na ložisku magnezitu Jelšava je v dobrej zhode. Otvoreným problémom ostáva vysoká hodnota materiálovej konštanty m_i stanovená z triaxiálnych testov, ktorý by sa dal vyriešiť použitím triaxiálu s vyššími technickými parametrami (vyšší plášťový tlak a osová sila) alebo použitím triaxiálnych buniek vkladných medzi tlačné čeluste lisu umožňujúcich použitie valcových vzoriek s väčším priemerom podstavy.

Literatúra

- HOEK, E. and BROWN, E.T. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186, 1995.
- HOEK, E. Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 35, No. 1, pp. 63-68, 1998.
- BAUER, V., ĎUROVE, J., VAVREK, P., BOCAN, J., ŠOFRANKO, M. *Geomechanické a geotechnické podmienky dobývania magnezitového ložiska SMZ, a.s. Jelšava – Dúbravská a Mikovská časť*. Košice, 2012, 48 s., F BERG TUKE.
- MUŽÍK, L., SKLENÁŘ, J., SKOŘEPOVÁ, J., LAPÁČEK, Z. *Určení napěťo-deformačního stavu na magnezitovém ložisku Miková*. Praha, 1979, 31 s., Ústav geologie a geotechniky ČSAV.
- ZAHORANSKÝ, G., HAUSOVÁ, Z. *Metodika vyhodnocovania tlakov a deformácií. Časť D*. Košice, 1985, 6 s., Ústav pro výzkum rud Praha, pobočka Košice.
- http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner
- <http://www.rocscience.com/downloads/freedownloads/complete/>

¹ Ing. Pavol Vavrek, PhD., Ústav montánných vied a ochrany životného prostredia, Fakulta BERG TU v Košiciach Park Komenského 19, 042 00, Košice, Slovenská Republika pavol.vavrek@tuke.sk tel. : 00421556022952