

STABILITNÍ VÝPOČTY S VYUŽITÍM HOEK-BROWNOVA KRITÉRIA

Ing. Daniel Turanský

Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra geotechniky

Stability Analysis using Hoek-Brown Criterium

The article describes the implementation of non-linear Hoek-Brown criterium into the analytical slope stability software and compares the results with other LEM and FEM software.

Klíčová slova: Hoek-Brown, Slope Stability, Rock Stability

1. ÚVOD

V současné době je většina analytických stabilitních výpočtů založena na materiálech, které bývají popsány Mohr-Coloumbovou (MC) podmínkou porušení. Tedy hlavními vstupy pro popis materiálu jsou parametry smykové pevnosti – úhel vnitřního tření ϕ a soudržnost c . Pro zeminy je tento postup vhodný, pro horniny však bývá stanovení těchto parametrů často problematické. Jako vhodnější se jeví využití Hoek-Brownovy (HB) podmínky porušení, která umožňuje lépe vystihnout nelineární chování horninového masivu. Tento článek se zabývá testováním HB podmínky porušení pomocí ekvivalentních MC parametrů v programu GEO5 Stabilita Svahu, který je založen na analytickém řešení stabilitních úloh metodou mezní rovnováhy.

2. HOEK-BROWNOVA PODMÍNKA PORUŠENÍ

Poprvé byla HB podmínka porušení publikována v roce 1980 E. Hoekem a E. T. Brownem [1], kdy byla primárně určena pro popis chování horninového masivu tvořeného relativně zdravými horninami. S postupem času se ukázala potřeba úpravy původní HB podmínky pro horninové masivy s různým stupněm porušení, stále však bez převládajícího směru diskontinuit. Základním předpokladem tedy je, že horniny se budou chovat jako izotropní materiál, u kterého nelze předpokládat jeden hlavní směr porušení. Stejní autoři přišli v roce 1997 s vylepšením původní podmínky a zavedli tzv. generalizovanou HB podmínku porušení [2]:

$$\sigma_{1,ef} = \sigma_{3,ef} + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_{3,ef}}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

Kde:	$\sigma_{1,ef}$	větší hlavní napětí při porušení horniny
	$\sigma_{3,ef}$	menší hlavní napětí při porušení horniny
	σ_{ci}	jednoosá pevnost v tlaku neporušených kusů horniny
	m_b	redukovaná hodnota HB konstanty m_i
	s, a	konstanty závislé na vlastnostech horniny

Pro zdravé horniny je rovnice (1) zjednodušena do následující podoby:

$$\sigma_{1,ef} = \sigma_{3,ef} + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_{3,ef}}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (2)$$

Konstanty s a a nabývají v této zjednodušené podmínce hodnoty 1, resp. 0.5, místo redukované HB konstanty m_b je použita původní HB konstanta m_i .

Jednoosá pevnost v tlaku a parametr m_i by měly být stanoveny na základě triaxiálních laboratorních zkoušek při určitém rozsahu napětí. Původní testy prováděli autoři pro rozsah menšího hlavního napětí od 0 do $0,5\sigma_{ci}$ [1], tedy tento rozsah by měl být dodržen i při dalším

stanovení těchto parametrů. V případě že nejsou laboratorní testy k dispozici, uvádí autoři doporučené tabulkové hodnoty (viz Tab. 1 a Tab. 2), které by však měly být použity s maximální obezřetností a pouze v případě předběžných výpočtů [2]. V jiných případech by se mělo vždy trvat na stanovení požadovaných parametrů na základě výsledků inženýrsko-geologického průzkumu.

Tab.1: Tabulkové hodnoty jednoosé pevnosti v tlaku na základě zařazení hornin do tříd R0-R6, převzato z [2]

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely strong	> 250	> 10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100–250	4–10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50–100	2–4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25–50	1–2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5–25	†	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1–5	†	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25–1	†	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

*Grade according to Brown [6].

†Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Tab.2: Tabulkové hodnoty parametru m_i na základě geologického typu horniny, převzato z [2]

Table 2. Values of the constant m_i for intact rock, by rock group. Note that values in parenthesis are estimates

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
				(18)	—Greywacke—	
	Non-Clastic	Organic		7	—Chalk—	
					—Coal—	
		Carbonate	Breccia (20)	(8–21) Sparitic Limestone	Micritic Limestone	
				(10) Gypstone	8 Anhydrite	
		Chemical		16 Hornfels	13 Quartzite	
				(19) Amphibolite	24 Mylonites	
	Foliated*	Gneiss	33 Schists	25–31	(6) Phyllites	Slate 9
				4–8	(10) Rhyolite	(19) Obsidian
IGNEOUS	Light		Granite 33 Granodiorite (30) Diorite (28)		(16) Dacite (17) Andesite 19	
	Dark		Gabbro 27 Norite 22	Dolerite (19)	Basalt (17)	
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

*These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Parametry HB generalizované podmínky porušení (m_b , s , a) jsou nejčastěji určeny v závislosti na původní HB konstantě m_i (Tab. 2), horninové klasifikaci GSI (Geological Strength Index) a tzv. koeficientu porušení horninového masivu D . Původní vztahy byly uveřejněny již v roce 1997 [2], v roce 2002 byly některé doporučení zjednodušeny pro praktické použití autory E. Hoekem, C. Carranzou-Torresem a B. Corkumem [3].

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (3)$$

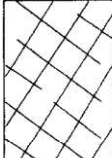



$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{(-GSI/15)} - e^{(-20/3)} \right) \quad (5)$$

Klasifikace GSI popisuje vliv struktury a množství diskontinuit zkoumaného horninového masivu. Pro neporušenou horninu bez diskontinuit je $GSI=100$, se zvyšujícím se počtem diskontinuit a horší strukturou se GSI snižuje. Orientační hodnoty lze stanovit na základě tabulkových doporučení (viz Tab. 3), nicméně je třeba mít na paměti, že GSI je založen na in-situ pozorování a jeho stanovení by proto mělo být prováděno zkušenými geology.

Tab. 3: Doporučené hodnoty GSI, převzato z [2]






Table 5. Estimate of Geological Strength Index GSI based on geological descriptions

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38.</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY ▼				
 <p>BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>		80	70			
 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>			60	50		
 <p>BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>				40	30	
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>					20	10
	<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ▼</p>					

Faktor porušení D zahrnuje vliv rozrušení horninového masivu vlastními geotechnickými pracemi (např. odstřely či exkavacemi). Pro neporušený masiv platí $D=0$, pro extrémně rozrušený $D=1$. Jisté doporučení poskytují autoři v [3] (viz Tab. 4).

Tab. 4: Doporučené hodnoty D , převzato z [3]

Table 1: Guidelines for estimating disturbance factor D

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

3. ANALOGIE S MC MODELEM

Přestože neexistuje mezi HB a MC podmínkou porušení přímá závislost, bylo v minulosti odvozeno několik vztahů pro dopočet MC parametrů na základě HB generalizované podmínky (1).

Mezi nejčastěji používané patří řešení publikované v [3], kde autoři určují MC parametry smykové pevnosti následovně:

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

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}} \quad (7)$$

4. TESTOVÁNÍ HB PODMÍNKY PORUŠENÍ V PROGRAMU GEO5 STABILITA SVAHU

Geo5 Stabilita Svahu je analytický software od české společnosti FINE, který umožňuje řešení stabilitních úloh pomocí metod mezní rovnováhy pro kruhovou i polygonální smykovou plochu [4]. Pro testování HB podmínky byla zvolena metoda Morgenstern-Price, ostatní metody byly však následně také ověřeny a poskytují výsledky srovnatelné. Metoda M-P určuje stupeň stability (FS) na základě rovnováhy sil a momentů mezi jednotlivými bloky zeminy nad smykovou plochu. Třecí síla každého bloku je pak přímo závislá na hodnotě MC parametrů na smykové ploše. Jelikož rovnice (6) a (7) zahrnují vliv hlavních napětí, bylo potřeba upravit algoritmus výpočtu tak, aby v případě použití HB materiálového modelu uvažoval program v každém bodě smykové plochy jiné parametry ϕ a c – nejenom na základě parametrů dané vrstvy, ale také na hodnotě efektivního napětí v určitém bodě.

Pro testování byla vytvořena sada 27 příkladů, které se výrazně lišily jak geometrií svahu (výška a sklon), tak i zadanými parametry horninového masivu, které se pohybovaly v celé škále použitelných hodnot m_i , D a GSI . Výsledky byly následně porovnány s výsledky z programu Slide 6.0 zveřejněnými v [5] a výsledky z programu Plaxis 2019 zveřejněnými v [6]. U všech úloh bylo dosaženo dobré shody, maximální rozdíl v dosažených stupních bezpečnosti činil maximálně 5%, průměrně se jednalo o 2,5%.

5. ZÁVĚR

Cílem bylo ověření převodních vztahů mezi HB a MC materiálovým modelem pro výpočet stabilitních úloh metodou mezní rovnováhy. Algoritmus byl testován v programu GEO5 Stabilita Svahu. Porovnání bylo provedeno pro 27 úloh, které se lišily ve všech vstupních parametrech. Výsledky byly porovnávány s dalšími programy, které používají jak analytické tak i numerické řešení. V obou případech byly výsledky ve shodě, což otevírá prostor pro další využití. Všechny výpočty byla nicméně provedeny pouze na uměle vytvořených datech, proto by měl být další výzkum zaměřen na porovnání výpočtů reálných svahů a výsledků geotechnického monitoringu.

6. PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Doc. Dr. Ing. Janu Pruškovi za cenné konzultace a společnosti FINE, jmenovitě Ing. Jiřímu Laurinovi a Ing. Janu Starému za pomoc při implementaci HB algoritmu do SW GEO5.

7. LITERATURA

- [1] Hoek E., Brown E.T.: Empirical strength criterion for rock masses, ASCE J. Geotech. Eng. 1980, 106 (GT9), s. 1013 -36.
- [2] Hoek E. a Brown E.T. "Practical estimates of rock mass strength". In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 34.8 (1997), s. 1165–1186.
- [3] Hoek E., Carranza-Torres C. a Corkum B. "Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition". In: Proceedings of the 5th North American symposium - NARMS-TAC (2002), s. 267-273
- [4] Fine spol. s r.o., 2022. URL: <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/stabilita-svahu-01/>
- [5] Yuan Wei, Wang Liyan, Zhai Xing, Tan hanhua, Peng Shu, Xue Yanyu, Wang Wei, Sun Xiaoyun & Niu Jiandong (2021) A rapid stability charts analysis method for rock slopes based on Generalized Hoek-Brown criterion, All Earth, 33:1, 98-107, DOI: 10.1080/27669645.2021.1959282
- [6] Poklopová T., Pavelcová V., Šejnoha M.: Comparing the Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure criteria in FEM analysis, Acta Polytechnica 00(0):1–6, 0000

Ing. Daniel Turanský

Pracoviště: Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra geotechniky, Thákurova 7, Praha 6, 166 29

E-mail adresa: daniel.turansky@fsv.cvut.cz