

爆破扰动下露天矿边坡岩体力学参数确定

赵国彦, 刘东锐, 董陇军

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 在矿山巷道工程和边坡工程稳定性分析中, 岩体力学参数选取会对结果产生重大影响。通过现场大型原位试验方法可以确定出符合工程实际的岩体力学参数, 但存在工程浩大、费用高昂, 受到多种环境和技术条件限制。一般采用 Hoek-Brown 准则对室内岩块试验获得的力学参数进行工程处理, 常用的 Hoek-Brown 准则在处理边坡岩石力学参数都是忽略爆破震动对露天矿边坡的影响, 而爆破扰动是影响稳定性和岩体力学参数的主要因素。利用非线性方程来表征受扰动修正系数 K_m 、 K_s 与完整性系数 K_i 之间的关系, 建立了 Hoek-Brown 准则经验参数 m_b 、 s 的一种改进取值方法。以新疆东戈壁露天矿东边坡为例, 采用 Hoek-Brown 准则爆破扰动下的修正公式及前人公式进行分析计算, 结果表明, 由该方法确定的介于扰动和未扰动之间的岩体力学参数更符合实际。

关键词 爆破扰动; 岩体力学参数; Hoek-Brown 准则的修正公式; 工程应用

中图分类号 TD05

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.03.003

Determination of Mechanical Parameters of Slope Rock Masses Under Blasting Disturbance

ZHAO Guoyan, LIU Dongrui, DONG Longjun

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The selection and the determination of mechanical parameters are closely related with the stability analysis of laneway and slope in mining engineering. The spot test method to obtain mechanical parameters of rock mass based on the engineering practice is restricted by many environment conditions and technique conditions and is also very costly. Because the blasting disturbance is the most important factor influencing the slope stability for a practical open-pit slope, it should be taken into consideration in the determination of mechanical parameters of slope rock mass. In general, this factor is often ignored in the Hoek-Brown standards for processing the results of indoor rock testing in line with the actual conditions. To address this problem, the nonlinear equation is applied to obtain the relationship between the modified coefficient under disturbance and the integrity coefficient. In this paper, the modified expressions of Hoek-Brown strength criterion, in consideration of the blasting disturbance, are applied to the east slope of the East Gebi open-pit. It is shown that the method in this paper gives good results.

Keywords blasting disturbance; mechanics parameters of rock masses; the modified expressions of Hoek-Brown strength criterion; engineering application

0 引言

岩体力学参数的确定是边坡工程稳定性分析、支护设计的基础工作, 是进行岩石工程数值分析的主要参数, 直接影响数值分析结果^[1-2]。露天矿边坡岩体力学参数受其内部各种结构面及地应力的影响, 在影响因素中, 爆破震动是导致其力学行为与室内岩石力学实验存在较大差别的主要原因^[3]。不同爆破规模产生的爆破扰动不同, 导致其在岩体中损伤积

累效应不同, 岩体力学参数弱化程度不同^[4]。如何在考虑爆破扰动的情况下, 获取较贴近工程实际的岩体力学参数, 是岩石力学与爆破工程界亟待解决的主要问题之一。

目前, 在岩体力学参数的确定方法中, Hoek-Brown 强度准则被认为是能全面反映岩体结构特征对岩体强度的影响且发展较完善的方法^[5,6]。其缺陷在于仅给出无扰动和扰动两种极端状态下的岩体力学参数的确定公式, 对一般状态下

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2012-11-26

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿与岩土工程稳定性及灾害控制, 电子信箱: 337112919@qq.com.

(如,爆破扰动下)的岩体强度参数确定,适用性有待探讨。这就需要原始 Hoek-Brown 公式中的经验参数进行修正,使其适用于一般状态下岩体力学参数的确定。国内众多学者给出了不同的观点。张建海等^[7]将原有参数进行平均化处理,对其进行了修正,但处理较为简单,在复杂条件下不适用。闫长斌等^[8,9]引入完整性系数,对其进行修正,虽较贴近实际,但简单认为 K_v 与 K_m, K_s 呈线性相关。陈昌富等^[10]在闫长斌的基础上,认为 K_v 与 K_m, K_s 呈正弦关系,对其进行修正,但其只针对特定的岩体,并不一定适用所有岩体。综合分析可得, K_v 与 K_m, K_s 可能符合某种对应关系,更适合实际岩体情况。

在前人研究的基础上,利用非线性方程表征受扰动修正系数 K_m, K_s 与完整性系数 K_v 之间的关系,建立了一种 Hoek-Brown 准则经验参数 m_b, s 的改进取值方法,具有很强的实际意义。

1 边坡岩体力学参数确定

边坡岩体力学参数包括岩体的抗压强度、抗拉强度、岩体变形模量及岩体抗剪变形参数等。这里根据 Hoek-Brown 准则及其修正公式,进行边坡岩体力学参数确定。

Hoek-Brown 准则是在格里菲斯理论的基础上,经过大量的非线性岩石实验提出的,公式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b \sigma_3 + s \sigma_c^2)^\alpha \quad (1)$$

式中, σ_1, σ_3 分别为岩体破坏时的最大、最小主应力, MPa; σ_c 为岩石单轴抗压强度,可由室内测得, MPa; m_b, s 为与岩体本身性质相关常数,可基于公式(8)~(17)确定; α 一般取 0.5。

由公式(1)可得,岩体抗压强度、抗拉强度的确定公式如下:

$$\text{抗压强度: } \sigma_{cm} = \sqrt{s} \sigma_c \quad (2)$$

$$\text{抗拉强度: } \sigma_{tm} = \frac{1}{2} \sigma_c (m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s}) \quad (3)$$

闫长斌^[8,9]考虑到爆破开挖对岩体的影响,提出确定岩体变形模量的修正式,当 $\sigma_c > 100\text{MPa}$ 时,采用式(4)

$$E_m = \frac{1+K_v}{2} 10^{(RMR-10)/40} \quad (4)$$

当 $\sigma_c < 100\text{MPa}$ 时,采用式(5)

$$E_m = \frac{1+K_v}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (5)$$

Hoek-Brown 准则对应的莫尔库伦准则可得,岩体抗剪强度指标公式为

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{|\sigma_{cm} \sigma_{tm}|} \quad (6)$$

$$\varphi = \arccot \frac{\sigma_{cm} - \sigma_{tm}}{2\sqrt{|\sigma_{cm} \sigma_{tm}|}} \quad (7)$$

式中, c 为内黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, $^\circ$ 。

1.1 RMR 和 GSI 确定

Hoek 和 Brown 提出结合 Bieniawski 提出的 RMR 和 GSI 岩体质量评价方法,直接对参数 m_b, s 进行选取。

RMR 确定公式如下。

扰动岩体:

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right) \\ s = \exp\left(\frac{RMR-100}{6}\right) \end{cases} \quad (8)$$

未扰动岩体:

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \\ s = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中, m_i 是完整岩体的 m_b 值,可由文献[9]中查到。

GSI 确定公式如下

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (10)$$

s, α 按下式选取:

当 $GSI > 25$ (岩体质量较好) 时,

$$\begin{cases} s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \\ \alpha = 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

(11)

当 $GSI < 25$ (岩体质量较差) 时,

$$\begin{cases} s = 0 \\ \alpha = 0.65 - \frac{GSI}{200} \end{cases} \quad (12)$$

式中, D 为岩体扰动程度; m_i 同式(8); α 同式(1)。

1.2 张建海修正公式确定

张建海等^[7]认为,对于坝基、坝肩部位岩体、地下洞室的围岩应属于介于扰动和未扰动之间的岩体。并提出以下公式确定:

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\frac{RMR-100}{21}\right) m_i \\ s = \exp\left(\frac{RMR-100}{7.5}\right) \end{cases} \quad (13)$$

1.3 闫长斌修正公式选取

闫长斌等^[8,9]基于爆破作业对岩体质量的弱化效应提出了如下修正公式:

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\frac{RMR-100}{K_m}\right) m_i \\ s = \exp\left(\frac{RMR-100}{K_s}\right) \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} K_m = 14(K_v + 1) \\ K_s = 3K_v + 6 \end{cases} \quad (15)$$

式中, K_v 为完整性系数; K_m 为 m_b 的修正系数; K_s 为 s 的修正系数。其采用 K_v 表征岩体的受扰动程度, K_m, K_s 为在完整性系数 K_v 时 Hoek-Brown 准则 m_b, s 的修正系数。

完整性系数 K_v 是进行岩体分级的重要指标之一,且其能较好地反映岩体扰动程度。因此,参考规范《工程岩体分级标准》(GB50218—94)^[15],建立了岩体完整程度与受扰动程度之

间的对应关系,见表1。

表1 岩体完整程度与受扰动程度对应关系

Table 1 Relation table of rock mass integrity level and disturbance degree

岩体完整性系数/ K_v	完整程度	扰动程度
>0.75	完整	未(或微)扰动
0.75~0.55	较完整	轻(或中)度扰动
0.55~0.35	较破碎	扰动
0.35~0.15	破碎	严重扰动
<0.15	极破碎	极度扰动

1.4 陈昌富修正公式确定

陈昌富等^[10]认为, K_v 与 K_m 、 K_s 成正弦关系,提出了以下修正公式:

$$\begin{cases} m_i = \exp\left(\frac{RMR-100}{K_m}\right) m_i \\ s = \exp\left(\frac{RMR-100}{K_m}\right) \end{cases} \quad (16)$$

其中,

$$\begin{cases} K_m = 21 + 7\sin[(K_v - 0.5)\pi] \\ K_s = 7.5 + 1.5\sin[(K_v - 0.5)\pi] \end{cases} \quad (17)$$

1.5 本文改进公式

综合分析可得,对于Hoek-brown准则中经验参数的确定, RMR 和 GSI 系统对于极端状态下的岩体有较好效果;张建海等^[7]提出的公式仅适合简单条件下的岩体;闫长斌等^[8,9]修正公式根据爆破震动的积累效应,对反复爆破的岩体具有良好的适用性,对首次爆破岩体适用性有待探讨;陈昌富等^[10]在闫长斌的基础上,将其正弦化,需要进一步深化。在陈昌富及闫长斌等^[8,9]的基础上,利用以下非线性方程表征 K_m 、 K_s 与完整性系数 K_v 之间的关系:

$$\begin{cases} K_m = 7\{\cos[\pi(1-0.5K_v)] + 1.5\} \\ K_s = 3\cos[\pi(1-0.5K_v)] + 14 \end{cases} \quad (18)$$

考虑到 K_m 、 K_s 与完整性系数 K_v 间的高度非线性关系,通过对闫长斌等^[7-10]公式进一步修正得到上述公式。实际工程应用表明,相比于前人公式,其更贴近与工程实际。

2 工程实例

2.1 工程背景

东戈壁露天矿东边坡工程地质特征如下:走向 150° ,倾角 48° 。分布范围内分布有 $F_1 \sim F_5$ 五条断层,其中对边坡稳定

性有影响的有 F_1 、 F_3 、 F_4 和 F_5 。其产状分别为: $F_1, 85^\circ < 83^\circ$ (走向<倾角,下同); $F_3, 270^\circ < 65^\circ$; $F_4, 80^\circ < 78^\circ$; $F_5, 45^\circ < 60^\circ$ 。存在节理裂隙,总体产状为 $40^\circ < 45^\circ$ 。裂隙多为闭合型裂隙,裂隙面上多见氧化铁质、绿泥(帘)石化、薄膜状钙质及少量的薄膜状、浸染状辉钼矿,局部裂隙被方解石、石英岩脉充填。线裂频率多在5~15条/m。边坡主要由变质泥质砂岩、变质泥质泥岩、变质砂岩和斑状花岗岩组成。

2.2 岩石质量评价

计算 m_b 、 s 值需要用 RMR 和 GSI 对边坡岩石进行质量评价。现场取样进行室内岩体力学测试,主要测定岩石的抗压强度、抗拉强度、泊松比等参数^[13]。结合已有原位试验数据,得其边坡岩石力学参数见下表2。

表2 主要岩石物理力学指标

Table 2 Major rock physical and mechanical indices

岩石名称	抗压强度/MPa		抗剪强度		比重	含水率/%	普氏硬度系数
	已有	测得	φ	c /MPa			
变质砂质泥岩	61.7	35.4	$40^\circ 32'$	10.2	2.72	0.2	8.3
变质泥质砂岩	64.8	64.8	$40^\circ 39'$	11.2	2.73	0.5	6.8
变质砂岩	59.4	63.2	$42^\circ 37'$	12.7	2.73	0.3	7
斑状花岗岩	46.8	40.2	$40^\circ 16'$	17.9	2.63	0.3	11.7

根据现场原位测试测得,边坡各岩石的 RQD 值见表2。由表1和 RQD 值及文献[13],并根据边坡实际情况,计算边坡各岩石的 RMR 值,结果见表3^[11]。根据实际岩石情况,并结合文献[14],确定岩石的 GSI 评价值为65。

表3 岩石 RMR 和 RQD 值

Table 3 The RMR and RQD value

岩性	RMR	RQD
变质砂质泥岩	60	68
变质泥质砂岩	70	76
变质砂岩	62	83
斑状花岗岩	64	92

2.3 m_b 、 s 参数确定

根据东露天矿东边坡的实际岩体条件,结合表4^[12]得,完

表4 不同类型岩石的 m_i 近似值

Table 4 Approximate values of m_i for various types of rocks

不同类型岩石	m_i 近似值
充分发育的结晶解理的碳酸盐岩石(白云岩、石灰岩、大理岩)	7
泥质岩石(泥岩、页岩和板岩(垂直于解理))	10
强烈结晶、解理不发育的砂质页岩(砂岩和石英岩)	15
细粒、多矿物火成结晶岩(安山岩、辉绿岩、玄武岩和流纹岩)	17
粗粒、多矿物火成岩和变质岩	25

整岩体的 m_b 值,即 $m_i=15$ 。

以上述数据为基础,分别采用 Hoek-Brown 准则爆破震动下各修正公式,确定岩体参数 m_b, s 。其结果见表 5。结合文献 [7],由工程地质调查可知,变质砂质泥岩、变质泥质砂岩、变

质砂岩和斑状花岗岩的完整性系数见表 5。

2.4 岩体力学参数确定

根据上节 m_b, s 计算结果,结合公式(2)~(7),计算爆破扰动下东边坡岩体力学参数见表 6。

表 5 各公式确定 m_b, s 值

Table 5 The m_b, s values based on the formulas

岩石名称	张建海		闫长斌			陈昌富		本文改进	
	m_b	s	K_v	K_m	K_s	K_m	K_s	K_m	K_s
变质砂质泥岩	2.233	0.072	0.316	0.009	0.003	1.461	0.038	0.002	0.026
变质泥质砂岩	3.595	0.275	0.846	1.451	0.030	4.977	0.501	0.502	0.065
变质砂岩	2.456	0.095	0.725	0.497	0.010	3.389	0.169	0.099	0.032
斑状花岗岩	2.701	0.123	0.982	1.306	0.018	4.145	0.274	0.456	0.038

表 6 东边坡岩体力学参数

Table 6 The rock mechanical parameters for the eastern slope

计算方法	岩体力学参数	岩石名称			
		变质砂质泥岩	变质泥质砂岩	变质砂岩	斑状花岗岩
闫长斌改进公式	抗压强度/MPa	1.94	11.22	6.32	5.39
	抗拉强度/MPa	-1.79	-1.32	-1.22	-0.55
	变形模量/GPa	9.28	17.62	16.26	14.90
	内黏聚力/MPa	0.93	1.93	1.39	0.86
	内摩擦角/(°)	45.00	31.56	36.42	30.08
张建海改进公式	抗压强度/MPa	9.50	33.98	19.48	14.10
	抗拉强度/MPa	-1.13	-4.86	-2.41	-1.80
	变形模量/GPa	9.28	17.62	16.26	14.90
	内黏聚力/MPa	1.63	6.42	3.42	2.52
	内摩擦角/(°)	31.63	33.50	32.05	32.38
陈昌富改进公式	抗压强度/MPa	6.90	45.87	25.98	21.04
	抗拉强度/MPa	-0.90	-6.40	-3.11	-2.62
	变形模量/GPa	9.28	17.62	16.26	14.90
	内黏聚力/MPa	1.25	8.56	4.49	3.71
	内摩擦角/(°)	32.65	33.26	31.72	32.11
本文改进式	抗压强度/MPa	1.26	5.32	2.66	2.00
	抗拉强度/MPa	-1.24	-0.85	-0.98	-0.22
	变形模量/GPa	9.28	17.62	14.90	14.90
	内黏聚力/MPa	0.62	1.06	0.81	0.33
	内摩擦角/(°)	45.02	34.58	41.57	30.68

3 分析比较

从表 6 的计算结果和图 1~2 比较情况可以看出,其他各种改进方法算出的结果较大,本文提出的方法计算结果较小。这是由于张建海等的改进公式,出发点仍是 Hoek-Brown 准则,考虑的影响因素比较全面,因此结果比完整性系数修正法偏低,符合实际情况。但是,该方法仅考虑了岩体介于扰动或未扰动之间的中间情况,即完整性系数 $K_v=0.5$ 时的情况,而不是根据完整性系数 K_v 的实际值进行计算。由于岩体实际的完整性系数 K_v 均低于 0.5,即岩体比较不完整,因此,

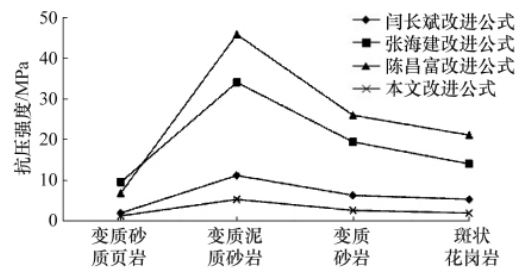


图 1 抗压强度结果比较

Fig. 1 Comparison of rock mass compressed strength

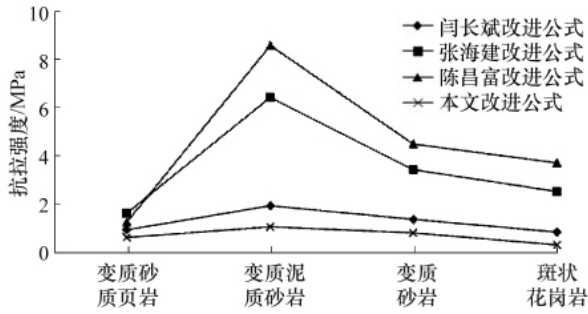


图2 抗拉强度结果比较

Fig. 2 Comparison for rock mass tension strength

张建海等^[7]的改进方法比本文提出的改进方法计算结果偏高。闫长斌等^[7,8]的修正公式简单认为 K_m, K_s 与完整性系数 K_v 之间呈线性关系,进行估算时实际完整性系数亦小于 0.5,导致得到的。

由图3中可以看出,相比于原位试验数据,本文提出的方法和陈昌富等^[10]提出的方法,更加的贴近实际。相比之下,本文提出的方法,更贴近于工程实际。

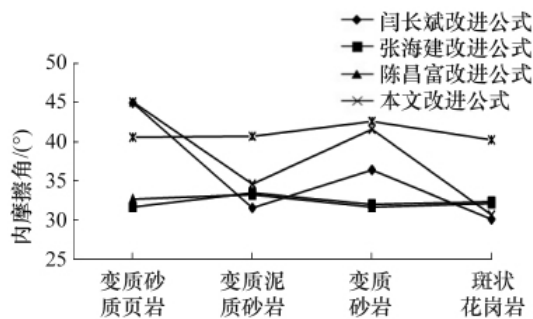


图3 内摩擦角结果比较

Fig. 3 Comparison of the friction angle

4 结论

利用 Hoek-Brown 准则进行岩体力学参数的确定是目前岩体力学参数确定的主要方法之一,但是其只分为扰动和未扰动两种情况,这给其实际应用带来限制,同时以往修正公式都存在着思路单一的缺陷。为此,本文利用非线性方程表征 K_m, K_s 与完整性系数 K_v 之间的关系,建立了本文的改进取值方法,并结合东戈壁露天矿东边坡的实际情况,进行了验证比较。分析表明,相比于前人修正公式,更贴近实际,有着更大的应用空间。

参考文献 (References)

[1] 刘业科, 曹平, 汪亦显, 等. 岩体物理力学参数测定及其工程处理方法的研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2009, 23(1): 31-35.
Liu Yeke, Cao Ping, Wang Yixian, et al. Journal of University of South China: Science and Technology, 2009, 23(1): 31-35.

[2] 巫德斌, 徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 89-94.
Wu Debin, Xu Weiya. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2005, 33(1): 89-94.

[3] 董陇军, 李夕兵, 赵国彦, 等. 露天采矿爆破振动对砌体结构破坏效应预测的 Fisher 判别模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 750-756.
Dong Longjun, Li Xibing, Zhao Guoyan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 750-756.

[4] 何满潮, 薛廷河, 彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 225-229.
He Manchao, Xue Tinghe, Peng Yanfei. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 225-229.

[5] Helgstedt A. An assessment of the insitu shear strength of rock masses and discontinuities[J]. Trans Instn Min Metall, 1997, 105(1): 37-47.

[6] Sheorey P R. Empirical rock failure criteria [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997.

[7] 张建海, 何江达, 范景伟. 小湾工程岩体力学参数研究[J]. 云南水力发电, 2000, 16(2): 26-27.
Zhang Jianhai, He Jiangda, Fan Jingwei. Yunnan Water Power, 2000, 16(2): 26-27.

[8] 闫长斌, 李国权, 陈东亮, 等. 基于岩体爆破累积损伤效应的 Hoek-Brown 准则修正公式[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2952-2964.
Yan Changbin, Li Guoquan, Chen Dongliang, et al. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2952-2964.

[9] 闫长斌, 徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4030-4035.
Yan Changbin, Xu Guoyuan. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4030-4035.

[10] 陈昌富, 朱剑锋, 周志军. HB 经验强度准则中参数 m, s 改进取值方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(11): 154-158.
Chen Changfu, Zhu Jianfeng, Zhou Zhijun. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2008, 35(11): 154-158.

[11] Hoek E. Practice rock engineering[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000.

[12] 陈光辉, 李夕兵, 董陇军, 等. 排土场与爆破荷载共同作用下的露天矿边坡稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 5(22): 113-118.
Chen Guanghui, Li Xibing, Dong Longjun, et al. China Safety Science Journal, 2012, 5(22): 113-118.

[13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[14] 韩现民, 李晓, 王红霞. 基于 GSI 的节理岩体力学参数评价 [J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(1): 19-21.
Han Xianmin, Li Xiao, Wang Hongxia. Mining Research and Derelopment, 2010, 30(1): 19-21.

[15] 水利部长江科学院. 工程岩体分级标准 GB 50218-94[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
Yangtze River Scientific Research Institute of Minister of Water Resources. Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.

(责任编辑 吴晓丽)