

# 强风化云母石英片岩力学参数确定方法

杨帆<sup>1</sup>, 侯克鹏<sup>2</sup>, 谢永利<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:**为合理、有效地确定强风化云母石英片岩的岩体力学参数,在工程经验类比法的前提下,以现场原位试验为手段,研究以霍克-布朗强度准则为基础的经验公式法获取参数的可行性。结果表明:一般边坡工程采用经验公式法确定参数是可行的,对于重要边坡工程则应以现场原位试验为主确定参数,从而为获得软弱岩体力学强度参数提供一条可靠途径。

**关键词:**岩土工程;岩体;力学参数;原位试验;霍克-布朗强度准则

**中图分类号:**U416.14

**文献标志码:**A

## Mechanical parameters determination method for strongly weathered mica-quartz schist

YANG Fan<sup>1</sup>, HOU Ke-peng<sup>2</sup>, XIE Yong-li<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to determine the mechanical parameters of rock mass on strong weathered mica-quartz schist reasonably and efficiently, under the premise of engineering experience analogy method, as a means to test in situ, the feasibility to obtain the parameters was studied by the Hoek-Brown strength criterion based on the experience formula method. The results show that the empirical formula method to determine the parameters for the general slope engineering is feasible, the in-situ-test should be done to determine parameters for the important slope engineering. So a reliable way to obtain the weak rock mass mechanical strength parameters can be found. 8 tabs, 7 figs, 9 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; rock mass; mechanical parameter; in-situ-test; Hoek-Brown criterion

## 0 引言

在边坡工程问题分析评价中,岩体力学参数是进行边坡工程稳定性评价以及保证施工安全、工程经济的最基本的工程参数。目前对岩体力学参数的选取方法已经做了较多的研究工作,也取得了一些

成果。参数的确定,归纳起来主要有 5 种方法:经验分析法、试验法、数值分析法、位移反分析法、不确定性分析法。以往对岩体力学参数确定的研究大都通过单一的数值分析反算或经验分析法,而采用原位直剪试验确定参数的研究很少<sup>[1-4]</sup>。为此,本文以云南某露天矿南采场岩质高边坡为研究对象,主要

研究坡面覆土下部强风化云母石英片岩岩体力学参数的确定。由于取样难度大,所以采用常规室内试验方法获得岩体力学强度参数值存在较大困难。通过调查可知,该处石英片岩强风化云母石英片岩具有非均质性、存在节理裂隙、所处地质环境复杂以及结构构造强风化等特点。采用现场原位直剪试验、经验公式法及工程经验类比法相结合的研究方法,以期获得较为准确的岩体力学参数值,对分析边坡是否稳定提供了重要的依据。

1 工程经验类比法确定参数范围

通过对 RMR(Rock Mass Rating,岩体质量指标)分类系统中 5 个基本参数的调查,即岩块强度、岩心质量、节理间距、节理条件、地下水,并对节理的走向和倾角的影响进行评价。由式(1)经岩体节理产状修正后得到最终的 RMR 评分值  $I_{RMR}$  及相应的岩体级别(表 1、表 2);通过分类得到岩体力学参数分布区间(表 3)。

$$I_{RMR} = \sum_{i=1}^6 R_i \tag{1}$$

式中: $R_i$  为分类系统基本参数评分值。

按以上分类方法对云母石英片岩进行评分分类。

表 1 云母石英片岩分类打分表

项 目	数值	打分
完整岩石强度	33.3 MPa	4
岩芯质量指标 RQD 值	33.1%	9
节理平均间距	9.6 cm	8
节理条件	节理面光滑,宽度小于 1~5 mm,节理连续	10
地下水	潮湿	7
总分		38

表 2 RMR 分类评分及相应的岩体级别

岩 性	云母石英片岩
RMR 分值	38
修正后 RMR 分值	33
岩体级别	Ⅳ

表 3 按总评分值确定岩体的级别

分类级别	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V
岩体内粘聚力 $c/\text{kPa}$	$>400$	300~400	200~300	100~200	$<100$
岩体摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	$>45$	35~45	25~35	15~25	$<15$

2 现场原位试验确定参数

原位试验与传统方法相比,其试验场地的选取、

连续性、经济性、反映实际岩土结构的准确性都有明显优势。但在其测试机理及应用,特别是试验结果的处理上存在不足。针对场地的选取及工况影响程度,在该处获取云母石英片岩力学参数采用原位试验是相对比较合适的<sup>[3]</sup>。所选 4 组试坑进行原位试验所得的抗剪强度曲线如图 1~图 4 所示。图 1~图 4 中, $x$  为正应力  $\sigma$ , $y$  为剪应力  $\tau$ 。

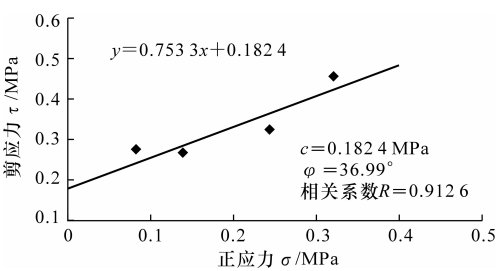


图 1 N1060 坑试体原位试验抗剪强度曲线

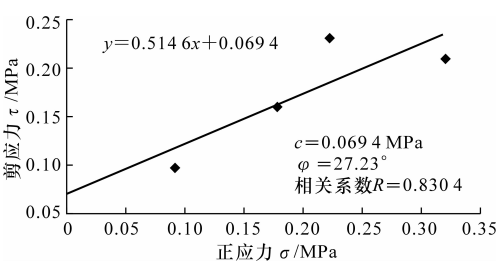


图 2 E1080 坑试体原位试验抗剪强度曲线

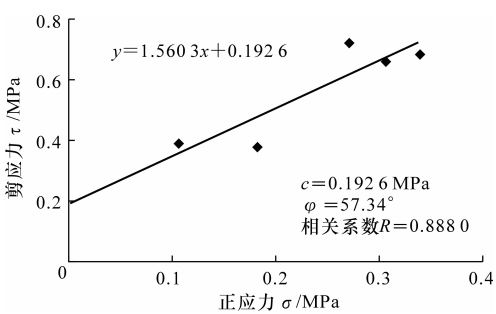


图 3 N1100 坑试体原位试验抗剪强度曲线

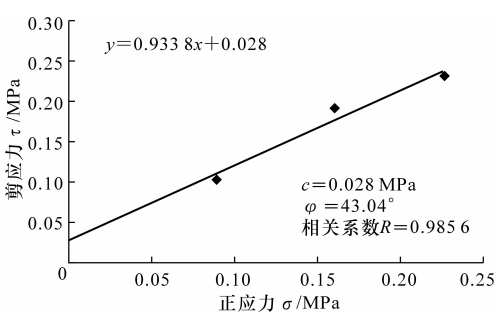


图 4 W1020-3 坑试体原位试验抗剪强度曲线

现场原位试验:通过现场调查确定比较有代表性的岩土层,采用人工挖坑,用土石袋堆载方法进行岩土体的宏观力学参数测定。由于受现场开采进度

的影响,本次现场原位试验主要对近地表的风化岩层进行了大量的试验研究。通过试验为岩体质量评价及分析岩体的各种基本参数提供依据。在采场东帮、西帮及北帮选取试验点,对岩体特征描述及分析见表 4。

表 4 岩体特征描述及分析

试验点	特征描述	备注
E1080	该试验组试样为青灰色,岩石风化、破碎严重,风化裂隙发育,岩石呈薄片状。	采用该组试验数据,计算结果可能偏于安全
N1060	该试验组试样微绿泥石化,风化程度中等,节理发育。	该试验结果可适用于中下部较坚硬岩石的计算分析
W1020-3	试验组试样为泥质片岩,位于松散破碎带交界处。	试验结果反映了近地表较破碎、但具有一定强度的云母石英片岩的特性
N1100	绿泥石化的云母石英片岩,岩石比较干燥,节理发育,倾角 45°	该组试验值较高,适宜于 1 040 m 以下石英片岩的力学分析和计算

现场原位试验所得的岩石抗剪强度值与点荷载强度,经过对比可得到以下规律(表 5)。

表 5 试验结果对比

试验点名称	抗剪强度力学指标		点荷载强度/MPa
	c/MPa	φ/(°)	
N1060-下部云母石英片岩	0.121 7	41.05	33.93
N1100-下部云母石英片岩	0.131 0	58.49	20.04
W1020-3-破碎云母石英片岩	0.049 2	32.87	21.79
E1080-中上部云母石英片岩	0.064 4	25.75	20.30
平均值	0.093 1	33.40	

(1)西帮 1020(W1020-3)平台:云母片岩与石英片岩的 2 种试验指标变化规律相同,即云母片岩强度较石英片岩小。这是因云母片岩水力特性较明显,破碎程度比石英片岩严重,强度变化规律与现场实际情况相符。

(2)北帮 1060(N1060)和北帮 1100(N1100)平台:对比云母片岩的点荷载强度,反映了岩石的风化程度对岩石强度的影响,即越接近表层的岩体强度越低。原位试验所得抗剪强度,则由于受岩体节理及破碎程度的影响,其下部较深层的云母片岩抗剪强度较低。

3 经验公式法确定参数

本次研究以室内试验得出的岩石物理力学参数和岩体质量评价RMR 值为依据,计算得出其岩体

力学参数结果。针对实际施工情况及所掌握的相关资料,以室内岩石力学试验为基础,并在综合考虑岩体中节理裂隙、岩体结构、地下水和尺寸效应影响的同时,运用霍克-布朗 (Hoek-Brown)强度准则将岩块力学参数进行折减修正后换算成岩体力学参数,以满足工程需要,从而确定具体的强度参数值。

3.1 霍克-布朗 (Hoek-Brown) 法原理

Hoek 和 Brown 在分析 Griffith 理论和修正的 Griffith 理论的基础上,通过对大量岩石三轴试验资料和岩体现场试验成果的统计分析,于 1980 年用试验法导出了岩块与岩体破坏时极限主应力之间的关系式,即 Hoek-Brown 强度准则<sup>[4]</sup>。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$

(2)

式中:σ<sub>1</sub> 为破坏时的最大主应力;σ<sub>3</sub> 为作用在岩石试样上的最小主应力;σ<sub>c</sub> 为岩块的单轴抗压强度;m、s 均为与岩性及结构面状况有关的参数,可表示为 RMR 的函数。按照最新的 Hoek-Brown 屈服准则,可表示为

$$\left. \begin{aligned} m &= m_i e^{\frac{I_{\text{GSI}}-100}{28-14D}} \\ s &= e^{\frac{I_{\text{GSI}}-100}{9-3D}} \end{aligned} \right\}$$

(3)

$$I_{\text{GSI}} = I_{\text{RMR}} - 5$$

(4)

式中:D 为岩体受扰动程度的参数,取值 0 ~ 1,0 表示未扰动状态;m<sub>i</sub> 为完整岩石的 Hoek-Brown 常数,可通过室内试验得出,也可通过类比法确定;GSI 为地质强度指标,是由 Hoek、Kaiser 和 Brown 于 1995 年建立的,用来估计不同地质条件下的岩体强度,其值用 I<sub>GSI</sub> 表示<sup>[5]</sup>。

3.1.1 岩体单轴抗压、抗拉强度

令 σ<sub>3</sub> = 0,由式(2) 可得岩体的单轴抗压强度 σ<sub>mc</sub> 为

$$\sigma_{\text{mc}} = \sigma_c \sqrt{s}$$

(5)

对于完整岩石,s = 1,则 σ<sub>mc</sub> = σ<sub>c</sub>,即为岩块抗压强度;对于裂隙岩石,s < 1。

将 σ<sub>1</sub> = 0 代入式(2),并对 σ<sub>3</sub> 求解二次方程,可解得岩体的单轴抗拉强度 σ<sub>mt</sub> 为

$$\sigma_{\text{mt}} = \frac{1}{2}\sigma_c(m - \sqrt{m^2 + 4s})$$

(6)

Hoek 等建议岩体弹性模量 E<sub>m</sub>(单位:GPa) 可用式(7) 进行估算<sup>[6]</sup>。

$$E_{\text{m}} = (1 - \frac{D}{2}) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(\frac{I_{\text{GSI}}-10}{40})} \quad \sigma_c \leqslant 100 \text{ MPa}$$

(7)

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{l_{\text{GSI}} - 10}{40}} \quad \sigma_c > 100 \text{ MPa} \quad (8)$$

3.1.2 岩体抗剪参数

莫尔包络线按照以下方法确定:破裂面上的正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + m\sigma_c/8} \\ \tau &= (\sigma - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_m}} \\ \tau_m &= (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将相应的  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  代入式(9)就能在  $\tau$ - $\sigma$  平面上得到莫尔包络线上  $\sigma$  与  $\tau$  的关系点坐标<sup>[7]</sup>。由于岩体的抗剪强度,尤其是扰动岩体的抗剪强度多为非线性关系,故 Hoek 提出了非线性关系式。

$$\tau = A\sigma_c(\sigma/\sigma_c - T)^B \quad (10)$$

式中: $\tau_m$  为岩体抗剪参数; $A, B$  为待定常数。

改写上述方程,则变换为

$$y = ax + b \quad (11)$$

式中: $y = \ln(\tau/\sigma_c)$ ;  $x = \ln(\sigma/\sigma_c - T)$ ;  $a = B$ ;  $b = \ln(A)$ ;  $T = \frac{1}{2}(m - \sqrt{m^2 + 4s})$ <sup>[8]</sup>。

常数  $A$  与  $B$  可由最小二乘法线性回归确定,即

$$\ln(A) = \sum y/n - B(\sum x/n) \quad (12)$$

$$B = \frac{\sum xy - (\sum x \sum y)/n}{\sum x^2 - (\sum x)^2/n} \quad (13)$$

拟合判定系数

$$R^2 = \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y)/n]^2}{[\sum x^2 - (\sum x)^2/n][\sum y^2 - (\sum y)^2/n]} \quad (14)$$

由式(10)可知,当  $\sigma = 0$  时,  $\tau = c_m$ , 则岩体粘聚力  $c_m$  为

$$c_m = A\sigma_c(-T)^B \quad (15)$$

为了表征岩体非线性破坏的总体或平均内摩擦角  $\varphi$ , 采用下式表示

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\tau_d - c_m}{\sigma_d}\right) \quad (16)$$

式中: $\tau_d$  为剪应力平均值;  $\sigma_d$  为正应力平均值。

3.2 线性拟合法原理

目前数值计算中大多采用 Mohr-Coulomb 强度准则,其 2 个重要的力学指标是材料的粘聚力和内摩擦角,因此有必要将 Hoek-Brown 准则转换成岩体等效内摩擦角和等效内聚力。实际工程中一般采

用以下 2 种方法进行确定。

3.2.1 在给定的主应力范围内进行线形拟合

求出 H-B 公式中的岩体常数后,就可利用式(2)计算与  $\sigma_1$  对应的  $\sigma_3$ (或  $\sigma_3$  对应的  $\sigma_1$ ),然后用回归分析方法得到该岩体所遵循的 H-B 准则的线性表达式<sup>[9]</sup>。

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + b_1$$

$$\text{式中: } k = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}; b_1 = \frac{2\cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

由此可反算出该岩体的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

3.2.2 在给定的剪应力和正应力范围进行线形拟合

该方法采用式(17)计算在正应力  $\sigma_n$  范围内对应的剪应力  $\tau$ ,然后采用线形回归方法将其描述为  $\tau = \tan(\varphi) + c$ ,就可求出岩体的等效抗剪强度。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= [\cot(\varphi_i) - \cos(\varphi_i)] \frac{m\sigma_c}{8} \\ \varphi_i &= \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{4h\cos^2(\theta) - 1}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\text{式中: } \theta = \frac{\pi}{6} + \frac{1}{3}\arctan\left(\frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}}\right); h = 1 +$$

$$\frac{16(m\sigma_n + \sigma_c)}{3m^2\sigma_c}; \sigma_n \text{ 为预估滑动面上正应力。}$$

3.3 岩体单轴抗拉和抗压强度法原理

单向拉伸和单向压缩试验所绘制的极限莫尔圆也能反映岩体的粘聚力与内摩擦角的关系。岩体单轴抗拉及单轴抗压强度所绘制的强度曲线如图 5 所示。已知岩体单轴抗拉强度  $\sigma_{mt}$  和单轴抗压强度  $\sigma_{mc}$  后(表 6),可通过几何关系求得  $c, \varphi$  值。

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{mc}\sigma_{mt}} \quad (18)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sigma_{mc} - \sigma_{mt}}{2\sqrt{\sigma_{mc}\sigma_{mt}}}\right) \quad (19)$$

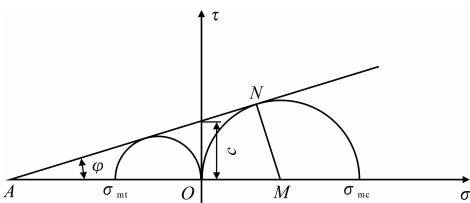


图 5 岩体单轴抗拉及单轴抗压强度的曲线

表 6 岩体单轴抗压、抗拉强度力学参数计算结果

名称	$\sigma_c$ /MPa	$m_i$	$m$	$s$	$\sigma_{mc}$ /MPa	$\sigma_{mt}$ /MPa
石英片岩	48.05	25	0.208 7	0.000 014	0.179 8	0.003 2

通过上述讨论及计算结果可得出以下结论。

(1)通过  $c$  值的计算结果对比分析可知(下页图

6),Hoek-Brown 法与岩体单轴抗拉和抗压强度法相比:两者所得片岩的  $c$  值基本一致;2 种线性拟合法所得结果基本一致,但与其他 2 种方法所得  $c$  值相差较大。产生误差究其原因有几种方法考虑的因素各异,几种方法都考虑了岩体节理裂隙密度、节理状态、地下水、RQD 和岩体的扰动程度等因素的影响,考虑的因素比较全面,但未考虑室内岩石粘聚力的影响;其原因有待进一步论证,在使用时应与其他几种方法进行比较分析。

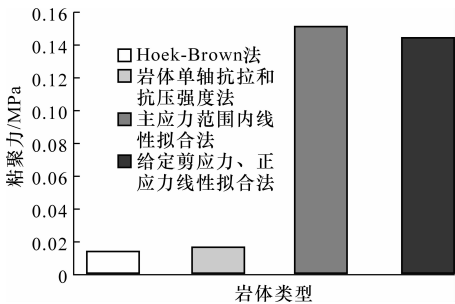


图 6 几种经验法得出的岩体  $c$  值比较

(2)由表 7 所得参数值结合工程观点来看,场区内云母石英片岩体松散破碎,对岩体工程性质起主导和控制作用的主要因素有:岩石质量、岩体完整性、风化程度、水、存在环境及开挖卸荷等。并且岩体自身是由岩块和结构面共同组成的有机复合体,则岩体本身性质的差异和受力条件的不同,使得不能得到期望的岩体参数精确值,需要进一步通过现场试验或对岩体宏观特性的统计分析来预测和估算岩体强度和变形的可能范围。

表 7 经验公式法确定岩体抗剪强度参数值

项 目	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$
Hoek-Brown 法	0.013 0	32.39
岩体单轴抗拉和抗压强度法	0.015 0	71.80
主应力范围内线性拟合法	0.150 2	25.11
给定剪应力、正应力线性拟合法	0.144 1	25.16

(3)通过计算结果对比分析可知(图 7),Hoek-Brown 法及 2 种线性拟合法所得数值比较接近,但与岩体单轴抗拉和抗压强度法相比在数值上的相对误差较大,计算结果存在差异。影响抗剪强度的因素比较多,其原因表现在内摩擦角反映了岩体介质间的摩擦特性,主要包括介质的表面摩擦力及之间的嵌入和连锁作用产生的咬合力,以及形状、密度、含水量、初始应力状态等都对计算结果有影响,所以在计算上会出现差异。Hoek-Brown 法与 2 种线性拟合法比较所得数值相差不大。

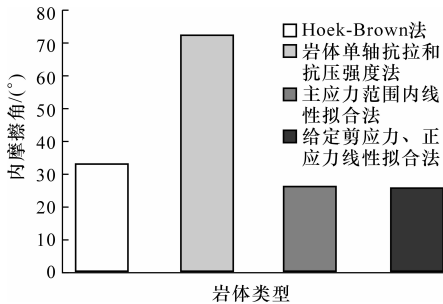


图 7 几种经验法得出的岩体  $\varphi$  值比较

经验法确定云母石英片岩强度参数见表 8。

表 8 经验法参数确定值

项 目	岩体单轴 抗压强度/ MPa	岩体单轴 抗拉强度/ MPa	变形模 量/GPa	岩体强度参数平均值	
				$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$
石英片岩	0.179 8	0.003 2	1.27	0.102	27.55

4 结 语

(1)经验法确定软弱岩体参数值时,因为岩体单轴抗拉和抗压强度法对参数值选取结果差异较大,所以不予采用。其余 3 种经验方法确定的云母石英片岩岩体抗剪强度参数值如表 8 所示。

(2)与表 5 中云母片岩原位试验所得结果相比,2 种线性拟合法所得  $c$  值偏大,但  $\varphi$  值较小,符合莫尔强度包络线的变化规律,即内摩擦角  $\varphi$  值逐渐减小,而瞬时粘聚力  $c$  值逐渐增大。结合模拟时选取参数的经验,考虑  $\varphi$  值对模拟得出的安全系数影响较为敏感, $c$  值影响较小,认为 2 种线性拟合法确定  $c$  值是可行的。

(3)经验法与原位试验所得结果相比,由于岩体风化严重, $c$  值接近分类法得到参数范围的最小值,且相对误差为 9.1%。在原位试验条件不允许的情况下,可采用经验法确定软弱岩体的粘聚力。

(4)由于 N1060 与 N1100 下部云母石英片岩内存在绿泥石化迹象,故使  $\varphi$  值过大。通过对比分析,经验法所得内摩擦角与岩体分级所得结果范围接近,故应在原位试验可行、可靠前提下,对经验法所得结果进行校验。

(5)采用上述几种经验法确定参数时,以 Hoek-Brown 方法为主,所得参数值应结合已有的试验结果进行对比,综合几种方法对最终参数的确定具有一定的参考价值。对于一般的边坡工程,采用经验法确定参数,简便、经济、快捷;重要的边坡工程就应以原位试验为主确定参数。

[J]. 公路,2002(2):39-43.

DI Gen-wang,QIAO Chao-zeng. Research of expressway asphalt pavement interlayer processing technology[J]. Highway,2002(2):39-43.

[ 3 ] 赵桂娟. 半刚性基层沥青路面基层粘结材料抗剪性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(5):90-94.

ZHAO Gui-juan. Test analysis on shear performance for interlayer bond of base and surface in semi-rigid base pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(5):90-94.

[ 4 ] West R C,Zhang J N,Moore J. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. Auburn: Auburn University,2005.

[ 5 ] 苏 凯,武建民,姚红云,等. 沥青路面层间滑移破坏分析[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(3):35-38.

SU Kai,WU Jian-min,YAO Hong-yun,et al. Analysis of cutting-slippage in asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2005,24(3):35-38.

[ 6 ] 胡卫国. 沥青路面基层层间抗剪研究[D]. 长沙:长沙

(上接第 33 页)

参考文献:

References:

[ 1 ] 杨 帆. 云南某露天矿采场边坡岩体力学参数确定及稳定性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2009.

[ 2 ] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[ 3 ] 石林珂,孙文怀,郝小红. 岩土工程原位测试[M]. 郑州:郑州大学出版社,2003.

[ 4 ] Hoek E,Brown T. Underground excavation in rock [M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

[ 5 ] 谭文辉,周汝弟,王 鹏. 岩体宏观力学参数取值的 GSI 和广义 Hoek-Brown 法[J]. 有色金属,2002,54 (4):16-18.

TAN Wen-hui,ZHOU Ru-di,WANG Peng. Taken value of the macroscopic of mechanical parameters of rock mass by the methods of GSI and Hoek-Brown [J]. Nonferrous Metals,2002,54(4):16-18.

[ 6 ] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown 经验强度准则的修正及

理工大学;2007.

[ 7 ] 高金岐,罗晓辉,徐世法,等. 沥青粘结层抗剪强度试验分析[J]. 北京建筑工程学院学报,2003,21(2):32-34.

GAO Jin-qi,LUO Xiao-hui,XU Shi-fa,et al. Test and analysis of shearing strength of bituminous membrane [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2003,21(2):32-34.

[ 8 ] 杨大田,夏文军. 动态剪切蠕变试验评价沥青路面层间稳定性[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(2):46-48.

YANG Da-tian,XIA Wen-jun. Evaluation of interlayer stability of asphalt pavement by dynamic shearing creep test[J]. Road Machinery &. Construction Mechanization,2011,28(2):46-48.

[ 9 ] 刘思峰,党辉国,方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2004.

应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2008,41(1):63-66.

SUN Jin-shan,LU Wen-bo. Modification of Hoek-Brown criterion and its application [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(1):63-66.

[ 7 ] 侯克鹏. 矿山地压控制理论与实践[M]. 昆明:云南科学技术出版社,2004.

[ 8 ] 廖秋林,李 晓,张年学,等. E. Hoek 法在节理化岩体力学参数评价中的应用[J]. 岩土力学,2005,26(10):1641-1644.

LIAO Qiu-lin,LI Xiao,ZHANG Nian-xue,et al. Application of E. Hoek method to evaluating mechanical parameters of closely jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(10):1641-1644.

[ 9 ] 王成虎,何满朝. Hoek-Brown 岩体强度估算新方法及其工程运用[J]. 西安科技大学学报,2006,26(4):456-459.

WANG Cheng-hu,HE Man-chao. Latest Hoek-Brown rock mass strength estimation method and its application[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2006,26(4):456-459.