

岩质高边坡岩体力学参数确定及稳定性研究

杨帆¹, 侯克鹏², 谢永利¹

(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:以云南某露天矿采场岩质高边坡工程为研究对象, 阐述了岩体力学参数在边坡稳定性分析中的重要性, 因原位试验对于坚硬岩体或极软岩体的不适用性, 对坚硬岩体, 以室内试验得出的岩石物理力学参数和岩体质量评价 RMR 评分值为依据, 并综合考虑岩体中节理裂隙、岩体结构、地下水的影响, 运用霍克-布朗 (Hoek-Brown) 强度准则将岩石力学参数进行折减修正后换算成岩体力学参数, 并与现场原位试验所得软弱岩体力学参数结果相结合得到最终岩体力学参数。在上述调查、研究基础上, 采用有限差分法 (FLAC 数值分析软件) 对现状边坡进行静态的稳定性分析, 提出合理的最终边坡角及总台阶高度, 保证矿山正常生产和经济效益的提高。

关键词:边坡; 岩体; 力学参数; 有限差分法 (FLAC); Hoek-Brown 准则

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)06-0845-09

露天矿边坡工程的复杂性和特殊性决定了边坡稳定性研究是一项难度大、综合性强、涉及面广的工作。边坡岩体力学强度参数选取的合理性直接影响到工程设计的可靠性与投资成本。一般在边坡稳定性分析中, 需要考虑的岩体力学参数有: 边坡岩体强度参数 (抗压强度、抗剪强度、抗拉强度等) 和变形参数 (变形模量、泊松比等); 另外还要考虑一些物理参数, 如岩体天然容重、含水量、边坡的坡高、坡面倾角等。

目前, 对岩体力学参数的选取方法已做了较多的研究, 也取得了一些成果。主要有以下 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。其中, 岩体的原位测试技术经实践证明, 在确定岩体力学参数方面被认为是较为精确的方法之一。以室内岩石力学试验为基础, 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, 通过 RMR 岩体质量评分系统对其适用性进行改进。这种方法量化了岩体强度、结构面产状、结构面间距、粗糙度、地下水条件, 将复杂的裂隙岩体用简单方便的方法进行定量描述。现代科技的发展、各种计算方法和技术手段的不断进步, 可采用数值分析方法解决复杂岩质边坡工程稳定问题, 考虑到数值分析计算的准确性取决于本构模型选取的正确性和岩体力学参数取值的可靠性, 所以岩体力学参数的正确选取对于整个数值模拟结果的准确性起着至关重要的作用。本文采用现场原位直剪试验与经验公式法相结合, 确定岩体抗剪强度参数, 以 FLAC2d 为研究手段, 对现状边坡进行二维静态模拟分析^[1], 提出合理的边坡最终边坡角和总台阶高度。

1 现场原位试验确定强度参数

1.1 原位测试技术及其特点^[2]

原位测试技术在工程勘察中占有重要位置。这是因为它与钻探、取样、室内试验等传统方法相比, 具有下列明显优点。

(1) 可在拟建工程场地进行测试, 不用取样。钻探取样难免会使岩土体产生不同程度的扰动。扰动原因包括取样时的应力解除、样品运输中的碰撞及制样中的扰动等。因此所测指标的工程应用价值往往

收稿日期: 2011-04-13 修改稿日期: 2011-10-11

作者简介: 杨帆 (1983-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事隧道工程及岩石力学方面研究。

“失真”。

(2) 原位测试涉及的岩土体积比室内试验样品要大的多,因而更能反映岩土的宏观结构(如裂隙、夹层等)对岩土性质的影响。

(3) 岩土的原位测试技术方法可连续进行,得到完整的土层剖面及其物理力学性质指标,是一门自成体系的实验科学。

原位测试技术的发展历史较短,对测试机理及应用的研究,有待进一步深入. 其主要缺点是难以控制测试中的边界条件,如测试周围土层的排水条件和应力条件. 原位测试技术所测出的数据与岩土的工程性质之间的关系,仍建立在大量统计的经验关系之上。

1.2 结果分析

原位直剪试验的成果整理是先将试验数据按有关公式,分别计算出正应力和剪切力及相应的正应变和剪切变形,再根据库仑定理: $\tau = \sigma \tan \varphi + c$,用最小二乘法进行线性回归,求出抗剪强度指标. 作用于剪切面上的正应力 σ 和剪应力 τ 按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad \tau = \frac{Q}{F} \tag{1}$$

式中: σ 为 作用于剪切面上的正应力,MPa; τ 为作用于剪切面上的剪应力,MPa; P 为作用于剪切面上的总法向荷载(包括混凝土包裹试体和钢板的荷载),MN; Q 为作用于剪切面上的总剪切荷载,MN; F 为试体剪切面面积, m^2 . 处理结果见表 1.

表 1 原位试验成果表
Tab. 1 Results of in-site testing

Title	Shearing resistant strength parameters		Recommend value	
	C/MPa	$\varphi/^{\circ}$	C/MPa	$\varphi/^{\circ}$
N1060-Underpart mica quartz schist	0.121 7	41.05	0.093 1	33.40
E1080-Upper part mica quartz schist	0.064 4	25.75		
N1100-Underpart mica quartz schist	0.131 0	58.49		
W1020-2 Crushing mica quartz schist	0.049 2	32.87		
Soilaggregate、Regolish	0.007 8	33.02	0.007 8	33.02
Superficial part quartz mica schist	0.097 7	35.51	0.097 7	35.51
Crush belt	0.028 0	43.04	0.028 0	43.04

(2)弹性模量和压缩模量根据试验施加的单位压力 P 和实测的岩体变形 S ,绘制 P - S 关系曲线,变形(弹性)模量用下列公式计算^[3]:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{PD(1-\mu^2)}{W} \tag{2}$$

式中: E 为岩体变形(弹性)模量,MPa. 当以总变形 W_0 代入式中计算的为变形模量 E_0 ;当以弹性变形 W 代入式中计算的为弹性模量 E ; W 为岩体变形,cm; P 为按承压板面积计算的压力,MPa; D 为承压板等效直径,cm; μ 为泊松比。

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针对近地表的风化岩层进行了大量的试验研究,为稳定性分析提供可靠的保证. 通过试验的手段为岩体质量评价及分析时岩土体的各种基本参数提供重要的依据. 研究以原位试验为主要手段分析在岩土体强度参数确定方面,原位直剪试验相比于其他现场试验方法所得结果是比较可靠的. 试验结果见表 2.

表 2 试体变形模量 M 及弹性模量 E 的试验成果

Tab. 2 Test results of sample about deformation modulus M and elasticity modulus E

Slope Position	No.	λ	Total deformation/cm	Elastic deformation/cm	Deformation modulus/MPa	Elasticity modulus/MPa
N1060	1	0.22	0.068	0.023	68.55	202.66
	2	0.22	0.054	0.033	147.74	241.76
	3	0.22	0.158	0.084	24.89	140.86
	4	0.22	0.090	0.045	159.36	318.72
N1070	1	0.18	0.159	0.100	44.43	70.64
	2	0.18	0.377	0.213	11.48	20.33
	3	0.18	1.008	0.378	11.26	30.02
N1100	1	0.22	0.126	0.039	37.35	120.67
	2	0.22	0.255	0.115	31.99	70.93
	3	0.22	0.098	0.025	123.48	484.06
	4	0.22	0.176	0.129	86.33	117.78
	5	0.22	0.280	0.123	49.14	111.87
W1020-1	1	0.20	0.097	0.035	52.67	145.98
	2	0.20	0.022	0.016	417.22	573.68
	3	0.20	0.064	0.036	207.71	369.26
	4	0.20	0.444	0.273	37.68	61.51
W1020-2	1	0.26	0.149	0.028	33.60	178.80
	2	0.26	0.369	0.036	23.17	237.46
	3	0.26	0.671	0.396	16.82	28.50
W1020-3	1	0.22	0.253	0.093	15.77	42.90
	2	0.22	0.276	0.078	24.98	88.38
	3	0.22	0.395	0.107	25.76	95.09
E1080	1	0.26	0.161	0.035	25.10	115.44
	2	0.26	0.311	0.121	25.28	64.97
	3	0.26	0.502	0.104	27.82	134.28
	4	0.26	0.466	0.286	20.92	34.09

2 经验公式法确定参数

2.1 霍克-布朗 (Hoek-Brown) 法原理

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,采用这些方法对其进行工程弱化处理,计算得出其岩体力学参数.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. Hoek 和 Brown^[4] 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和岩体破坏时极限主应力之间的关系式 (3) 式,即为 Hoek-Brown 强度准则^[5]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$
 (3)

式中: σ_1 为破坏时的最大主应力; σ_3 为作用在岩石试样上的最小主应力; σ_c 为岩块的单轴抗压强度; m 、 s 为与岩性及结构面有关的参数,均可表示为 RMR 的函数.按照最新的 Hoek-Brown 屈服准则,可表示为^[6]:

$$\left. \begin{aligned} m &= m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \\ s &= e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \end{aligned} \right\}$$
 (4)

$$GSI = RMR - 5 \quad (5)$$

式中: D 为表征岩体的受扰动程度的参数, 取值为 $0 \sim 1$ (0 代表未扰动状态); m_i 为完整岩石的 Hoek-Brown 常数; GSI 为地质强度指标; RMR 为岩体分类系统评分值见表 3。

表 3 岩体 RMR 值评价结果

Tab. 3 Evaluation results of rock mass value

Rock names	Classify parameter point-value					After amend RMR
	Compressive strength	RQD	Cleavage spacing	Cleavage state	Groundwater	
Marble	7	13	10	25	7	57
Scarn	7	12	10	25	7	56

(1) 岩体单轴抗压强度

由(3)式, 令 $\sigma_3 = 0$, 可得岩体的单轴抗压强度:

$$\sigma_{mc} = \sigma_c \sqrt{s} \quad (6)$$

对于完整岩石, $s = 1$, 则 $\sigma_{mc} = \sigma_c$, 即为岩块抗压强度; 对于裂隙岩石, $s < 1$ 。

将 $\sigma_1 = 0$ 代入方程(3)中, 并对 σ_3 求解二次方程, 可解得岩体的单轴抗拉强度为:

$$\sigma_{mt} = \frac{1}{2} \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (7)$$

Hoek 等建议岩体弹模 E_m 可用下式进行估算^[7]:

$$E_m = (1 - \frac{D}{2}) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{(\frac{GSI-10}{40})}, \quad \sigma_c \leq 100 \text{ Mpa} \quad (8)$$

$$E_m = (1 - \frac{D}{2}) 10^{(\frac{GSI-10}{40})}, \quad \sigma_c < 100 \text{ Mpa} \quad (9)$$

式中: 岩体弹模单位为 GPa。

(2) 岩体抗剪参数

莫尔包络线按照如下方法确定: 破裂面上的正应力 σ 和剪应力 τ 为^[8]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{8}} \\ \tau &= (\sigma - \sigma_3) \cdot \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_m}} \\ \tau_m &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将相应的 σ_1 和 σ_3 代入式(10)就能在 τ - σ 平面上得到莫尔包络线上 σ 与 τ 的关系点坐标。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:

$$\tau = A\sigma_c (\sigma/\sigma_c - T)^B \quad (11)$$

式中: A, B 为待定常数。改写上述方程, 则变换为^[9]:

$$y = ax + b \quad (12)$$

式中: $y = \ln \tau / \sigma_c$, $x = \ln (\sigma / \sigma_c - T)$, $a = B$, $b = \ln A$, $T = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$

由式(10)可知, 当 $\sigma = 0$ 时, $\tau = C_m$, 则岩体的黏聚力为

$$C_m = A\sigma_c (-T)^B \quad (13)$$

为了表征岩体非线性破坏的总体或平均内摩擦角 ϕ , 采用下式:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\tau_{\text{平均}} - C_m}{\sigma_{\text{平均}}} \right) \quad (14)$$

2.2 线性拟合法原理

目前的数值计算中大多采用 Mohr-Coulomb 强度准则,其两个重要的力学指标是材料的黏聚力和内摩擦角,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下面两种方法进行确定:

(1)在给定的主应力范围内进行线性拟合^[10]:

求出 $H-B$ 公式中的岩体常数后利用公式(2)计算与 σ_1 对应的 σ_3 (或 σ_3 对应的 σ_1),用回归分析方法得到该岩体所遵循的 $H-B$ 准则的线性表达形式: $\sigma_1 = k\sigma_3 + b$

式中: $k = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$, $b = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$

由上面二式可以反算出该岩体的黏聚力 c ,内摩擦角 φ .

(2)给定的剪应力和正应力范围内进行线性拟合

该方法采用公式(15)计算在正应力 σ_n 范围内对应的剪应力 τ ,采用线形回归的方法将其描述为: $\tau = \sigma \tan\varphi + c$,求出岩体的等效抗剪强度.

$$\left. \begin{aligned} \tau &= (\cot\varphi_i - \cos\varphi_i) \frac{m\sigma_c}{8} \\ \varphi_i &= \arctan \frac{1}{\sqrt{4h\cos^2\theta - 1}} \\ \theta &= 30 + \frac{1}{3} \arctan \frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}} \\ h &= 1 + \frac{16(m\sigma_n + s\sigma_c)}{3m^2\sigma_c} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中:

2.3 经验公式法确定参数的讨论分析

通过以上论述及计算结果可知:

(1)通过 C 值的计算结果对比分析可知(如图 2),Hoek-Brown 法所得结果相对保守,产生误差的原因是三种方法考虑的因素不尽相同,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,而给定的主应力范围内进行线性拟合法未考虑室内岩石黏聚力的影响,在使用时应与其他几种方法进行比较分析.

(2)通过 φ 值的计算结果对比分析可知(如图 3),Hoek-Brown 法及两种线性拟合法所得 φ 值比较接近.出现差异的原因表现在内摩擦角是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,其出发点仍是 Mohr-Coulomb 准则,而 Mohr-Coulomb 准则在本质上不适用于拉应力状态.可见,Hoek-Brown 法所得出的 φ 值是可行的.

上述几种经验法计算都是以 Hoek-Brown 强度准则为基础的,由于几种方法适用性、考虑因素、计算参数等条件的不同,所得计算结果应综合考虑.由表 5 可知,强度参数变化基本符合非线性莫尔包络线所反映出的规律,即在内摩擦角较小时,黏聚力就比较大.综合考虑了几种方法计算岩体强度参数的差异,本次研究采用对几种方法所得结果进行平均,并得到最终结果.抗剪强度参数计算结果见表 6.

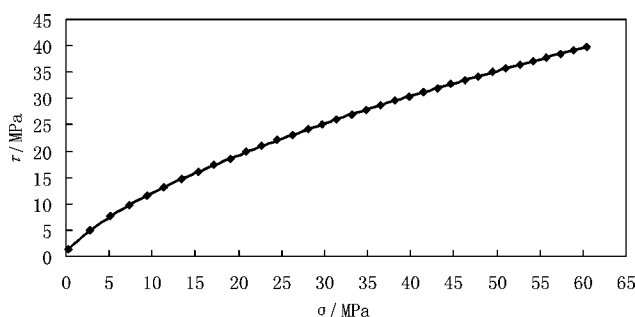


图 1 用 Hoek-Brown 法得出的莫尔强度包络线

Fig. 1 Mohr strength envelope drawn by Hoek-Brown method

表 5 几种经验法确定的岩体抗剪强度力学参数结果

Tab. 5 Some kind of emiridal method determining rock mass shearing strength mechanics parameter outcome

Items	Hoek-Brown Method		Primary stress range linear fitting farad		Given shear stress and normal stress linear fitting farad	
	C/MPa	$\varphi/^{\circ}$	C/MPa	$\varphi/^{\circ}$	C/MPa	$\varphi/^{\circ}$
Marble	0.065 8	25.25	0.247 3	22.00	0.278 9	15.99
Scarn	0.185 0	38.52	0.274 6	31.92	0.298 0	32.02

表 6 经验法参数确定值

Tab. 6 Emiridal method parameter deterministic value

Items	Rock mass single compressive strength/MPa	Rock mass single tension strength/MPa	Deformation modulus/GPa	Strength of rock mass parameter value typical value	
				C/MPa	$\varphi/^{\circ}$
Marble	1.669 8	0.027 7	5.65	0.197	21.08
Scarn	1.878 2	0.044 4	5.91	0.253	34.15

(3)大理岩 C、 φ 值

通过大理岩粘聚力及内摩擦角计算结果对比分析(如图 2、3),由大理岩所得 RMR 岩体分类评分值可知其属Ⅲ类岩体,C 值基本在 200~300 kPa, φ 值在 25°~35°之间^[11]. 经现场调查取样认为该处大理岩属中风化岩体,场区内大理岩岩体较破碎,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、赋存环境及开挖卸荷等. 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,岩体强度较低,强度参数可满足稳定计算要求.

(4)砂卡岩 C、 φ 值

砂卡岩作为成矿岩体,基本赋存在各类岩体内,受扰动及地质作用较小,其粘聚力及内摩擦角计算结果对比分析(如图 2、3),图示结果同大理岩相比较为相似.

砂卡岩所得 RMR 岩体分类评分值可知其属Ⅲ类岩体,C 值基本在 200~300 kPa, φ 值在 25°~35°之间^[11]. 与理论计算结果一致,可满足稳定计算要求.

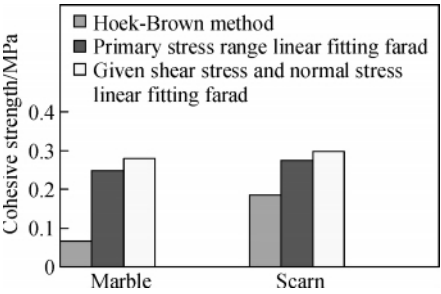


图 2 三种方法得出粘聚力比较

Fig. 2 Comparison of three methods drawing cohesive strength

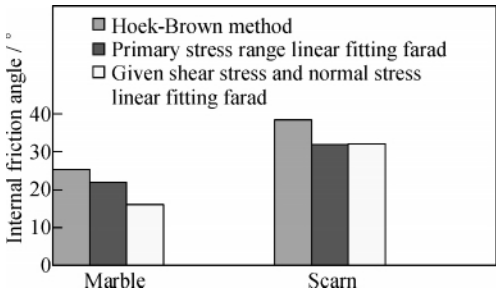


图 3 三种方法得出内摩擦角比较

Fig. 3 Comparison of three methods drawing internal friction angle

3 边坡静态稳定性分析

FLAC 全称是 Fast Langrangian Analysis of Continua,是一种显式差分程序,1986 年由美国 Itasca 公司(Itasca Consulting Group, Inc)开发. 该程序的基本原理和算法与离散元法相似,但它应用了节点位移连续的条件,可以对连续介质进行大变形分析.

在本次模拟中,为反应边坡延伸开挖后的实际情况,选择有代表性的 7 个剖面进行分析(计算彩云图见图 4~10),具体剖面参数如表 7 所示. 所取 7 个剖面,建立模型的原则采用坡角到左端边界的距离

为坡高的 1.5 倍,坡顶到右端边界的距离为坡高的 2.5 倍,且总高为 2 倍坡高,所涉及到的岩土体包括坡面覆土、石英片岩、云母片岩、大理石、砂卡岩,几种岩性的参数选取如表 8.

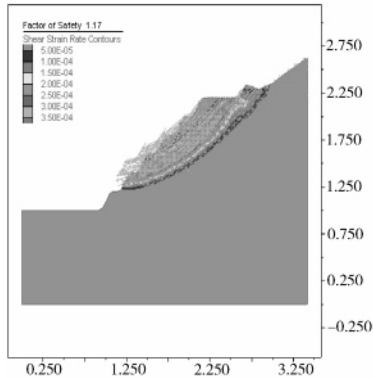


图 4 5[#]-E 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 4 The general plan of 5[#]-E safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

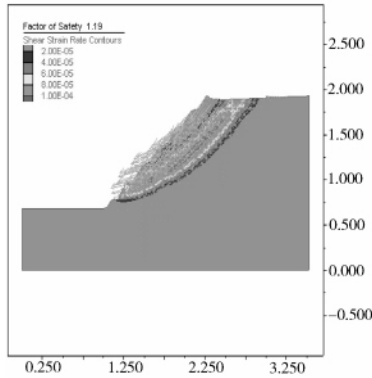


图 5 5[#]-W 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 5 The general plan of 5[#]-w safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

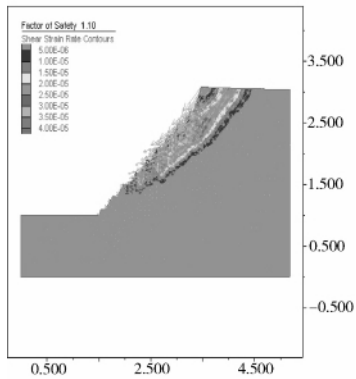


图 6 37[#]-E 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 6 The general plan of 37[#]-E safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

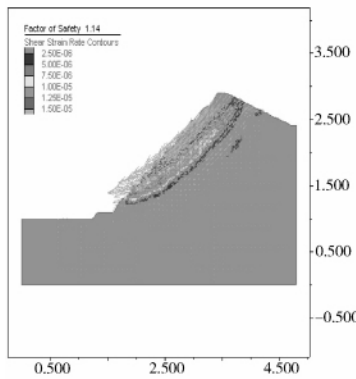


图 7 37[#]-W 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 7 The general plan of 37[#]-W safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

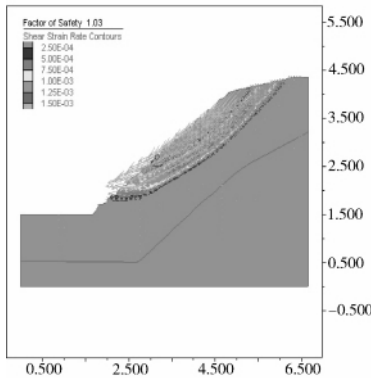


图 8 47[#]-E 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 8 The general plan of 47[#]-E safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

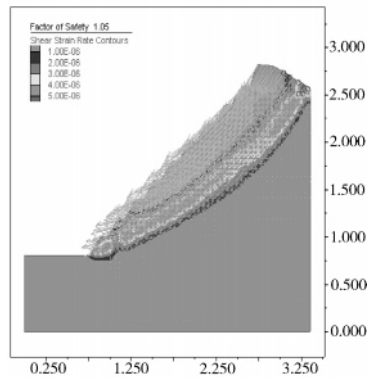


图 9 47[#]-W 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 9 The general plan of 47[#]-W safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

表 7 模拟计算结果列表

Tab. 7 Analog computation result

Position of Slope profile	Ultimate Slope Angle/°	Total height of steps/m	Safety Factor
5 # -E profile	40	162	1. 17
5 # -W profile	46	125	1. 19
27 # -W profile	45	190	1. 26
37 # -E profile	44	208	1. 10
37 # -W profile	41	188	1. 14
47 # -E profile	39	285	1. 03
47 # -W profile	46	200	1. 05

采用 FLAC 数值模拟软件,由模拟结果分析可见如下规律:

- (1)现场原位试验所得参数模拟结果如表 8,为保证矿山开采效益,允许边坡出现局部和可预见的跨塌,安全系数一般可适当降低。基于上述原因,采场边坡安全评价准则为:边坡安全系数 $F_s>1.05$ 以上,即认为是安全的, F_s 在 1~1.05 之间,认为是处于极限平衡状态, $F_s<1.0$ 时则不安全。
- (2)从所模拟的 7 个剖面看,整体边坡处于极限平衡状态;
- (3)随着边坡高度的增加边坡稳定性逐渐降低;
- (4)随着边坡角增大,边坡安全性逐渐降低;
- (5)东帮边坡安全性相比西帮较差;
- (6)影响边坡稳定的岩土介质主要为上部的云母片岩,为边坡出现滑移的主要地层,滑移界限在云母片岩和石英片岩分界面;
- (7)边坡出现的破坏主要为组合台阶式破坏和浅层破坏;
- (8)边坡破坏形式主要为弧形破坏为主。

表 8 模拟计算最终确定的岩体力学参数

Tab. 8 Rock mass mechanics parameter ultimately determined by analog computation

Bedrock style	Density /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	Poisson ratio	Deformation modulus/Pa	Internal friction angle/°	Cohesive strength/MPa
Quartz schist	27.9	0.22	1.92e6	37.07	0.089 2
Mica schist	26.0	0.26	0.9e6	33.40	0.093 1
Scarn	28.9	0.20	1.93e6	34.15	0.200 0
Marble	28.6	0.18	2.89e6	21.08	0.197 0
Crush belt	25.5	0.30	0.75e6	43.04	0.028 0
Dislocation	18.5	0.35	/	21.80	0.010 0
Soil layer	15.8	0.35	/	5.90	0.041 0

4 结 语

- (1)本研究采用多种方法对采场岩体力学参数进行了工程处理.结果表明,因岩体中结构弱面的存在以及其他因素的影响,使得岩体强度及变形模量较相应的岩石低得多。
- (2)对于软弱岩体受取样扰动大等因素的制约,现场原位试验与传统方法相比在场地的选取、连续性、经济性、反映实际岩土结构的准确性都有其明显的优势.对于该类岩体采用原位试验测定其力学强度参数是一种可靠的手段。
- (3)因采用现场试验获得坚硬岩体力学参数,存在人工开挖试坑、剪切条件约束等困难,上述研究认为利用经验公式法确定参数基本可以满足稳定性计算的要求。
- (4)稳态的数值模拟所表现出的规律,可以指导矿山的经济开采,并可预测高边坡的稳定性,预防滑坡发生。

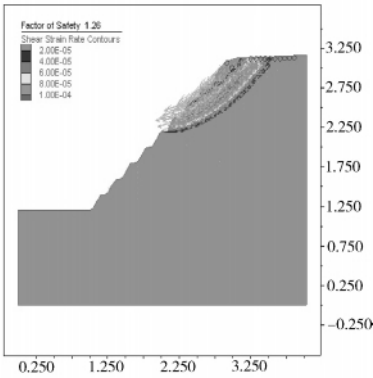


图 10 27# -W 安全系数、剪应变、速度矢量和弹塑性区总图

Fig. 10 The general plan of 27# -W safety factor, shearing strain, velocity vector, elastoplasticity region

参考文献 References

- [1] 董倩,朱正伟,刘东燕.崩塌堆积体的渐性破坏及稳定性分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010,42(3):358-363.
DONG Qian,ZHU Zheng-wei,LIU Dong-yan. The progressive failure and stability analysis for avalanche deposit slope[J]. J. Xi'an Uni. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(3): 358-363.
- [2] 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.
SHI Lin-ke,SUN Wen-huai,HAO Xiao-hong. Geotechnical engineering in-site test[M]. Zhengzhou: University of Zhengzhou press, 2003.
- [3] GB/T50266-99.工程岩体试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.
GB/T50266-99, Standard Test Method for Engineering Rock Mass[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [4] HOEK E, BROWN E T. Underground excavation in rock[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [5] HOEK E. Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1990, 27(3): 227-229.
- [6] 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]. Non-ferrous Metal, 2002, 54(4): 16-18.
- [7] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown经验强度准则的修正及应用[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.
- [8] 侯克鹏.矿山地压控制理论与实践[M].昆明:云南科技出版社,2004.
HOU Ke-peng. mine control of ground pressure theory and practice[M]. Yunnan: Yunnan science and technology press, 2004.
- [9] 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.
- [10] 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:自然科学版, 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: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 456-459.
- [11] 李建林.卸荷岩体力学[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
LI Jian-lin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China waterpower press, 2003.

Research on methods to determine mechanical parameters and stability of rock mass from high rock slope

YANG Fan¹, HOU Ke-peng², XIE Yong-li¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: With an open pit mining of the Yunnan high rock slope engineering field as a research object, the paper described the mechanical parameters of rock slope stability and the study of importance of the in situ test for hard rock or soft rock does not apply nature of hard rock. Laboratory experiments with the mechanical parameters of rock and rock mass quality rating is based on RMR. Considering the fractured rock mass, rock mass structure, the impact of groundwater, the use of Hawk-Brown (Hoek-Brown) rock strength criterion parameters will be amended and converted into a reduced rock mass parameters are derived. In situ testing and on-site mechanical parameters of soft rock from the combination of the final results of rock mechanics parameters. In the survey, based on research using the finite difference method (FLAC numerical analysis software) on the status of static slope stability analysis, a reasonable final slope angle and the total step height is obtained to ensure normal production and economic benefits of mining to improve.

Key words: slope; rock mass; mechanical parameters; FLAC; Hoek-Brown criterion

Biography: YANG Fan, Candidate for Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-13891980132, E-mail: 14899777@qq.com