

基于模糊综合评判的 Hoek-Brown 强度 准则修正及应用

张良刚, 吴 立, 徐昌茂, 陈 剑

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 阐述了岩质边坡岩体力学参数研究的意义, 介绍了国内外常用的几种岩体力学参数的确定方法, 但其准确性值得商榷和论证。针对 Hoek-Brown 强度准则 D 值的确定存在的困难, 基于模糊综合评判, 对产生扰动的影响因数综合考虑, 确定了依托工程的 D 值, 工程应用表明更加接近实际情况, 并且探讨了岩质边坡的岩体以滑动面为界限划分扰动区与非扰动区的合理性, 克服了其他公式的不足。以利比里亚邦矿铁矿岩体力学参数研究为例, 分别用计算出的修正参数和其他几种方法进行计算分析对比, 结果表明所计算出的修正 D 值更能反映实际的扰动程度, 并论证了划分扰动区与非扰动区的合理性和意义, 具有重要参考价值。

关 键 词: Hoek-Brown 强度准则; 模糊综合评判; 扰动系数 D ; 扰动区

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Modification of Hoek-Brown criterion and its application based on fuzzy synthetic evaluation

ZHANG Liang-gang, WU Li, XU Chang-mao, CHEN Jian

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Firstly, the importance of study on mechanical parameters of rock mass is presented, and some methods to determine mechanical parameters are introduced, whereas their accuracy are questionable and argument. As there is difficulty in determining the disturbance factor D relayed on the Hoek-Brown strength criterion, fuzzy comprehensive evaluation is employed. Considered the factors influencing on disturbance and relevant engineering experience, the value of D is calculated accordingly, which is more corresponded to the practicality. Afterward, the rationality, that the bounds characterized by slip surface for dividing disturbed and undisturbed zone, is discussed; and it overcome deficiency of other expressions. Additionally, to further verify the reasonability and significance of such dividing, and with a practical engineering, calculation of the factor D is given using the modified and other methods respectively. According to the comparative analysis, it is shown that the former is more suitable to the disturbance degree in-situ.

Key words: Hoek-Brown strength criterion; fuzzy synthetic evaluation; disturbed factor D ; disturbed zone

1 引 言

在岩质边坡的稳定性分析与加固设计中如何获取准确的岩体力学参数一直是岩石力学工作者研究的重要课题^[1]。获得岩体力学参数的最准确方法是进行大型现场试验, 从 20 世纪 40 年代开始, 国内外先后进行了大量的大型原位试验, 我国原位试验

主要针对大型工程进行, 且试验数量有限, 难以满足样本统计分析要求。许多中小型工程因原位试验成本昂贵、操作困难甚至没有开展^[2], 目前主要以室内岩石力学试验为基础, 综合考虑岩体中节理裂隙、地下水和尺寸效应的影响, 将岩块力学参数进行修正后换算成岩体力学参数, 其代表方法主要有完整性系数 K_v 修正法、费森科方法、Gergi 方法以

收稿日期: 2013-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 41202201)。

第一作者简介: 张良刚, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事地下建筑与岩土工程方面的研究。E-mail: zhanglgcug@163.com

通讯作者: 吴立, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程方面的研究工作。E-mail: lwu@cug.edu.cn

及 Hoek-Brown 强度准则^[3]。文献[4-5]总结了现有方法,认为 Hoek-Brown 强度准则比较全面的反映了岩体结构等特征对岩体强度的影响,是发展最完善的方法。

Hoek-Brown 强度准则是 1980 年提出的,先后经过多次修改,于 2002 年形成了最新修正版。Hoek 等^[6]在 2002 版的 Hoek-Brown 强度准则中正式提出了扰动参数 D 的概念,用以表征开挖爆破等施工措施对岩体的扰动影响,然而,对 D 值的确定仅给出简单实例而无详尽的方法。国内外学者张建海等^[7]、Sonmez 等^[8]、闫长斌等^[9]都曾对受扰动岩体的 Hoek-Brown 强度准则的 D 值进行了修正,但张建海只是将原公式的系数进行了简单平均化处理,并没有考虑岩体实际的扰动程度^[10],Sonmez 法十分繁琐,不便于推广,闫长斌提出的 K_v 值表征的是完整岩石和岩体间的声波传播速度关系,而并非扰动前后岩体性质的变化关系,因此该修正公式的有效性值得商榷^[11]。本文在前人研究成果的基础上,讨论了矿山岩质高边坡施工扰动对岩体的影响以及在实际工程中应如何划分扰动区与非扰动区等问题,运用模糊综合评判^[12]方法对 Hoek-Brown 提出的 D 值进行修正,并给出了算例。

2 常用的岩体力学参数确定方法

2.1 Hoek-Brown 强度准则

Hoek 和 Brown 在分析 Griffith 理论和修正的 Griffith 理论的基础上,通过大量的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。后经修改,其 2002 版广义的 Hoek-Brown 强度准则^[13]为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \\ m &= m_i \exp \left(\frac{G-100}{28-14D} \right) \\ s &= \exp \left(\frac{G-100}{9-3D} \right) \\ a &= 0.5 + \frac{1}{6} \left[\exp \left(\frac{-G}{15} \right) - \exp \left(\frac{-20}{3} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为岩体屈服时的最大和最小主应力; σ_{ci} 为完整岩石试件的单轴抗压强度; m_i 为完整岩石的 Hoek-Brown 常数,可通过室内试验和工程类比法得出; s 为与岩体质量有关的参数; G 为岩体的地质强度指标 GSI 值,表征岩体破碎程度以及岩块镶嵌结构; D 为表征岩体受扰动程度的参数。

Hoek 和 Brown 通过分析和总结,得出了以下 4 种 D 值的取值情况,见表 1。

表 1 岩体扰动参数 D 的建议值 (Hoke et al., 2002^[14])
Table 1 Guidelines for estimating disturbance factor D
(Hoke et al., 2002^[14])

类别	节理岩体的描述	D 的建议值
A	小规模爆破导致岩体引起中等程度破坏	$D = 0.7$ (爆破良好)
B	应力释放引起某种岩体扰动	$D = 1.0$ (爆破效果差)
C	由于大型生产爆破或者移去上覆岩体而导致大型矿山边坡扰动严重	$D = 1.0$ (生产爆破)
D	软岩地区用掘挖方式开挖,因此边坡的破坏程度很低	$D = 0.7$ (机械开挖)

2.2 张建海等的改进公式^[7]

张建海等提出的公式实际上是对 1980 版的 Hoek-Brown 计算公式的修正和改进。扰动参数 D 提出以前,张建海等认为对于坝基(或坝肩)部位岩体、岩石边坡以及地下洞室的围岩应属于介于扰动和未扰动之间的岩体,并提出用如下公式来确定介于扰动和未扰动之间的岩体的 m 和 s 值:

$$\left. \begin{aligned} m &= m_i \exp \left(\frac{G-100}{21} \right) \\ s &= \exp \left(\frac{G-100}{7.5} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)与 2002 版广义 Hoek-Brown 强度准则提出的 m 和 s 值的区别在于,张建海等定量地将 D 值取为 0.5 进行处理,并没有考虑岩体实际受扰动的程度。

3 本文对扰动系数 D 的修正

3.1 扰动系数 D 的确定

在 Hoek-Brown 准则 2002 版提出以前,扰动区岩体的力学参数选取是十分困难的,而扰动系数 D 的提出很好的解决了这个难题,但扰动系数 D 值怎么考虑和定量,也是需要解决的难题。目前,部分学者采用岩体的声波传播速度对岩体的受扰动范围和程度进行评估,因为岩体的声波传播速度可以很好地表征其破碎松动程度。大量工程实践也表明,通过测定分析声波在岩体中的传播速度,可有效地评估爆破开挖等引起的岩体松动和损伤。但声波测试时数据的采集对周围环境的要求较高,操作相对复杂,岩体力学工作者通常按照 2002 版提供的经验值进行取值(见表 1)。然而,2002 版 Hoek 等提出的经验值因考虑的因素单一,所得出的 D 值具有很强的局限性,并不能全面反映真实的岩体扰动情况。为解决这一问题,本文采用模糊综合评判方法,

对 Hoek 等提出的各种情况进行分析, 计算出相应的权向量和权重, 进而求解出具有通用性的 D 值, 其计算过程如下:

(1) 建立评判因素

根据 2002 版 Hoek 等提出的 4 种指标体系, 从宏观上将评价指标体系 U 分为 $U_1, \dots, U_4$ 四个指标, 即 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$, 使得 $U = \bigcup U_i$, $U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j), (i, j = 1, 2, 3, 4)$ 。

(2) 构造判断矩阵^[15]

根据评价指标系统所确定的上下层因素之间的隶属关系, 将下一层制约因素对上一层准则因素的重要程度运用专家调查法进行两两比较, 并结合 Satty^[16] 的 1~9 标度 (见表 2), 建立各层次因素的判断矩阵。

表 2 1~9 标度的含义
Table 2 Meaning of 1 scale to 9

标度	含义
1	i 因子与 j 因子完全一样重要, 或 i 与 i, j 与 j 自身比较;
3	i 因子比 j 因子重要性略大
5	i 因子比 j 因子明显重要
7	i 因子比 j 因子重要的多
9	i 因子比 j 因子极为重要
2、4、6、8	两两因子重要性比较介于上述标度两值之间
倒数	上述重要性相反情况, 即 j 比 i 重要的情况

(3) 一致性检验

判断矩阵式是根据某些原则人为规定的, 所以往往会出现判断不一致的情况, 一个混乱的、经不起推敲的判断矩阵有可能导致决策上的失误, 当判断矩阵过于偏离一致性时, 其可靠度也就值得怀疑了^[17-18]。因此需要对判断矩阵进行一致性检验, 以便将偏差控制在允许的范围内。具体步骤:

① 计算一致性指标 CI

$$\text{计算公式: } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

② 计算平均随机一致性指标 RI

该指标由多次重复进行随机判断矩阵特征值的计算而后取算术平均数得到, 表 3 为 1~6 阶矩阵的平均一致性指标值。

③ 计算一致性指标 CR

计算公式:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

对于 1、2 阶判断矩阵总是完全一致的, 当阶数

大于 2 时, 只要 $CR \leq 0.10$, 则认为这个判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则就要修改判断矩阵使之符合要求。

表 3 平均随机一致性指标
Table 3 Mean random consistency indexes

指标	矩阵阶数					
	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26

(4) 单一准则下元素相对权重的计算

排序权向量的计算方法主要有特征根法、最小二乘法、对数最小二乘法和上三角元素法^[19]。在精度要求不高的情况下, 特征根法方便简洁, 更具实用价值, 故本文采用特征根法, 计算公式为

$$\varpi_i = \sqrt[n]{\prod_j a_{ij}}; \quad \omega_i = \frac{\varpi_i}{\sum_i \varpi_i} \quad (5)$$

式中: a_{ij} 为判断矩阵元素; ω_i 为相对权重。排序权向量 ω 即为相应的 n 个制约因素的相对权重, 即 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)$ 。

(5) 模糊评判

根据各级指标因素的排序权向量 W 以及各级指标的权重, 可计算出扰动系数 D 值。定义评判因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ 的权重 $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, 则 D 值为

$$D = A \cdot \omega = [a_1, a_2, a_3, a_4] \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 扰动区范围的确定

Hoek 等将扰动参数的概念应用于开挖面以外的所有岩体, 即认为开挖面以外的所有岩体都属于受扰动岩体, 显然过于保守, 因为在实际工程中由于开挖等造成的岩体扰动毕竟是有限的。工程实践亦表明, 采用 Hoek-Brown 准则确定的岩体强度多低于岩体的原位实验值。对于大型岩质边坡, 通过大量数值模拟计算, 可以看出边坡滑体以滑动面为分界线, 靠近临空面的岩体应力重分布较明显, 而滑动面以内的岩体最大位移较小, 且塑性区明显减小。如果对于大型岩质边坡的稳定性分析与加固设计笼统地认为边坡岩体全部为受扰动的岩体, 那么势必会减小岩体力学参数的取值, 设计时会放缓坡形角度, 从而造成成本浪费。因此, 本文建议, 对于岩质边坡, 将滑动面以外靠近临空面的岩体视为

受扰动岩体，而滑动面以内岩体视为非扰动岩体，其计算模型示意图如图 1 所示。

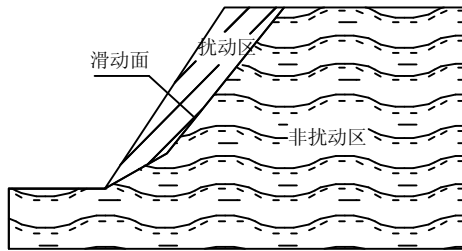


图 1 本文提出的围岩状态示意图

Fig.1 Sketch of surrounding rock presented in this paper

4 工程应用

4.1 工程概况

邦矿铁矿位于大西洋东岸的西非利比亚邦州。邦矿矿区岩浆岩主要表现为侵入活动，按照侵入时间大体可分为前寒武纪古老的侵入岩体和前寒武纪之后的侵入岩，其中前寒武纪古老的侵入岩体主要岩性为混合片麻岩、黑云母片麻岩、二云片麻岩、花岗片麻岩、花岗闪长质片麻岩、石英闪长质片麻岩、角闪石英岩等。本文仅就矿区所获取的白云母片岩、黑云母石英岩以及角闪片麻岩的岩体力学参数进行研究。根据相关的力学试验，邦矿岩石物理力学参数见表 4，同时据现场地质调查以及岩体质量评价结果，各岩体的 RMR 值见表 5。

表 4 邦矿岩石物理力学参数

Table 4 Physico-mechanical parameters of the rocks from Bone mine

岩石种类	密度 (g/cm ³)	泊松 比	抗压 强度 /MPa	抗拉 强度 /MPa	弹性 模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩 擦角 (°)
白云母片岩	2.74	0.213	58.55	6.47	18.60	9.74	66.3
黑云母石英岩	2.70	0.255	60.43	6.09	24.96	6.74	63.3
角闪片麻岩	2.99	0.264	248.00	10.79	66.77	13.33	73.7

表 7 岩体力学参数

Table 7 Results of mechanical parameters of rock mass

名称	计算公式	参数				
		抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
白云母片岩	本文修正公式	0.58	0.03	3.55	45.7	44.16
	Hoek-Brown 强度准则 ^[13]	0.51	0.03	2.56	39.5	44.07
	张建海改进公式 ^[7]	1.31	0.05	3.84	100.7	44.96
黑云母石英岩	本文修正公式	3.04	0.19	11.22	375.4	45.06
	Hoek-Brown 强度准则 ^[13]	2.77	0.18	8.21	345.9	44.87
	张建海改进公式 ^[7]	5.13	0.26	12.32	669.0	46.35
角闪片麻岩	本文修正公式	5.56	0.13	6.31	380.4	48.09
	Hoek-Brown 强度准则 ^[13]	4.94	0.12	5.94	331.2	47.52
	张建海改进公式 ^[7]	10.81	0.19	8.91	927.9	51.99

表 5 岩体 RMR 值

Table 5 RMR grade values of rock mass

岩石种类	抗压 强度	RQD	RMR 值				岩体 分类
			节理 间距	节理 条件	地下 水	节理走向和 倾向影响	
白云母片岩	7	17	10	21	7	-14	48 III
黑云母石英岩	9	20	20	26	7	-14	68 II
角闪片麻岩	13	9	14	25	4	-17	58 III

4.2 参数计算分析

本文基于模糊综合评判的计算过程为：大型矿山岩质边坡的开挖，根据相关工程经验，将 Hoek 等提出的产生岩体扰动的 4 种情况构造以下判断矩阵，见表 6。计算得到最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.0419$ 。

表 6 岩体扰动因子的判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of rock mass disturbance factors

扰动因子	A	B	C	D
A	1	1/2	1/5	2
B	2	1	1/3	2
C	5	3	1	7
D	1/2	1/2	1/7	1

注：表中 A、B、C、D 所代表的类型与表 1 中的相对应。

$$\text{一致性检验：} CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.0419 - 4}{4 - 1} =$$

$$0.014, CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.014}{0.89} = 0.0157 < 0.10, \text{故该判断矩阵的一致性可以接受。}$$

根据式 (5)，该矩阵的排序权向量 $\omega = [0.1255, 0.2010, 0.5920, 0.0815]$ 。依据表 1，该矩阵的权重 $A = [0.7, 1.0, 1.0, 0.7]$ ，则根据式 (6)，扰动系数 $D = A \cdot \omega = 0.9379$ ，根据 Hoek-Brown 强度准则可以求出相应的岩体力学参数。

同理，根据 Hoek-Brown 强度准则经验公式以及张建海等的改进公式可以求出相应的岩体力学参数分别见表 7。

4.3 参数对比分析

本文仅就对岩质边坡稳定性起重要决定性作用黏聚力和内摩擦角两个因素进行对比分析。根据表 7 的计算结果,得到如图 2、3 所示的分析对比图。

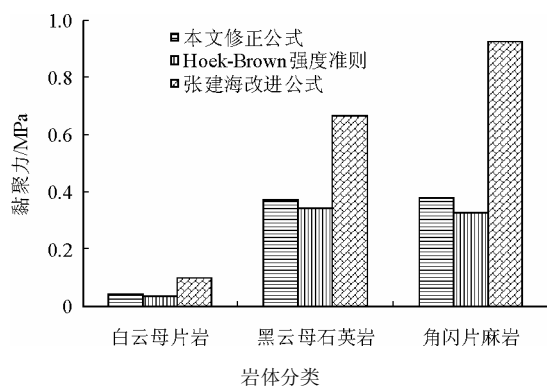


图 2 3 种岩体的黏聚力对比图

Fig.2 Comparison for cohesive forces from three modified expressions

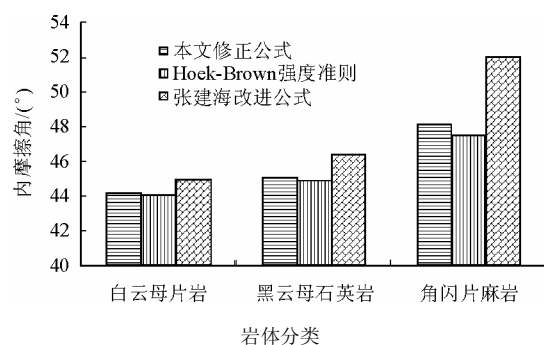


图 3 3 种岩体的内摩擦角对比图

Fig.3 Comparison for angles of internal friction from three modified expressions

从表 7 计算结果以及图 2 和图 3 对比情况可以看出, 张建海改进公式计算结果较高, Hoek-Brown 强度准则经验值计算结果偏低, 而本文提出修正公式计算结果居于二者之间。这是由于张建海改进公式出发点仍然是 Hoek-Brown 准则, 计算结果时相当于将扰动系数 D 值取 0.5 而求得的, 扰动相对较小, 没有反映实际扰动情况, 结果必然偏高, 而采用 Hoek-Brown 强度准则计算时, 依据表 1 的 4 种情况, 对于大型露天采矿边坡, 选取生产爆破 $D=1$ 进行计算, 认为岩体完全扰动, 这种计算偏于保守, 计算结果偏低, 势必会造成设计偏于保守, 造成投资成本大幅增加。本文提出的扰动系数 D 的计算方法, 综合考虑了表 1 所列出的 4 种情况, 采用模糊综合评判, 并根据邦矿铁矿的地质情况, 依据相关经验, 使计算的 D 值更加接近现场实际扰动程度, 计算结果更准确。

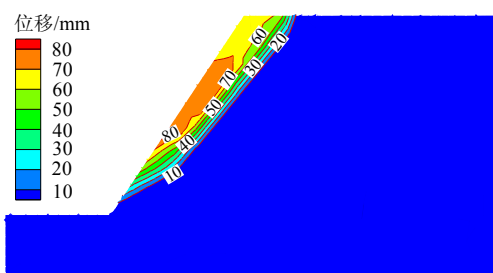
4.4 数值模拟计算分析

为了进一步说明本文提出的扰动系数 D 值的合理性以及扰动区划分的意义, 通过 FLAC^{3D} 软件对利比里亚邦矿矿区某边坡的稳定性进行数值模拟计算, 其计算结果见表 8, 图 4 为采用本文提出的 D 值、Hoek-Brown 强度准则以及张建海改进公式进行模拟计算的位移等值线图。

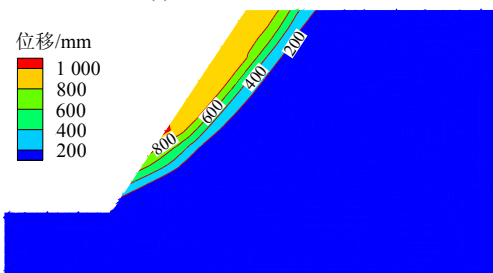
表 8 边坡稳定性分析计算结果

Table 8 Results of the analysis of slope stability

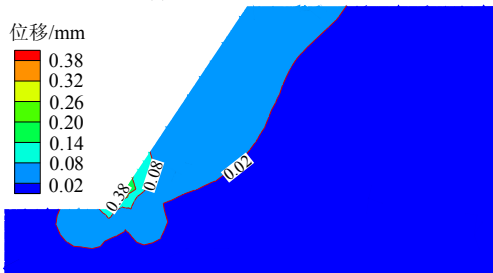
计算公式	安全系数	最大位移/m
本文修正公式	1.99	8.96×10^{-2}
Hoek-Brown 强度准则	1.89	1.07
张建海改进公式	2.05	3.84×10^{-4}



(a) 本文提出的修正公式



(b) Hoek-Brown 强度准则



(c) 张建海改进公式

图 4 位移等值线图 (单位: mm)

Fig.4 Incremental displacements(unit: mm)

从表 8 的计算结果可以看出, 采用本文修正公式计算得出的岩体参数进行模拟计算的安全系数和最大位移值介于其他两种方法之间, 因为本文提出的 D 值计算方法充分考虑了各种扰动因数, 并且稳定性模拟计算时将扰动区与非扰动区分开计算, 计算更合理。依据图 4 的位移等值线图可以看出, 在边坡稳定性模拟分析计算时, 边坡的位移基本突出

表现在滑动面外侧临空面的岩体, 且靠近滑动面的岩体塑性变形明显减小, 滑动面内侧的岩体基本上保持稳定, 也验证了前文提出划分扰动区与非扰动区的可行性。

5 结 论

(1) 影响岩体扰动系数 D 值的因素较多, 如何定量 D 值一直是一个难题。采用模糊综合评判, 可以对各种影响因素做出一个总体评价, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题, 不失为解决定量 D 值的一种途径。

(2) 采用模糊综合评判计算出的扰动系数 D 值充分考虑了产生扰动的各种因素, 更加接近岩质边坡岩体受扰动程度, 对类似的工程应用有较好的参考价值。

(3) 在岩质边坡稳定性分析过程中, 大多数学者认为开挖面以外的所有岩体都属于受扰动岩体, 显然过于保守。本文以滑动面为界限划分扰动区与非扰动区, 更接近现场工程地质情况, 计算时更具有科学性。

通过 FLAC^{3D} 软件对利比亚邦矿矿区某边坡的稳定性进行数值模拟计算, 通过分析对比, 进一步论证了本文提出的 D 值以及划分扰动区与非扰动区的合理性, 为其他类似的边坡工程提供了重要参考应用价值。

参 考 文 献

- [1] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923—1924.
YANG Ze, HOU Ke-peng, LI Ke-gang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun Tin Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1923—1924.
- [2] 符文熹, 胡静, 廖异, 等. 基于 Hoek-Brown 经验公式的岩体稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 214—215.
FU Wen-xi, HU Jing, LIAO Yi, et al. Reliability analysis of rock mass stability based on Hoek-Brown empirical formulas[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.2): 214—215.
- [3] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的三维边坡变形稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3656—3657.
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. Deformation stability of Three-dimensional slope based on Hoek-Brown criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3656—3657.
- [4] HELGSTEDT A. An assessment of the in-situ shear strength of rock masses and discontinuities[J]. **Trans. Instn. Min. Metall**, 1997, 105: 37—47.
- [5] SHEOREY P R. Empirical rock failure criteria[M]. Rotterdam: BALKEMA A A, 1997.
- [6] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的板岩强度特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3454—3455.
LIU Ya-qun, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. Study on strength characteristics of slates based on Hoek-Brown criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3454—3455.
- [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 Jian-hai, HE Jiang-da, FAN Jing-wei. Rock Mechanical Parameter Study of Xiaowan Project[J]. **Yunnan Water Power**, 2000, 16(2): 26—27.
- [8] SONMEZ H, ULUSAY R. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes assessment of the in-situ shear strength of rock masses and discontinuities[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(5): 743—760.
- [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 Chang-bin, XU Guo-yuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4030—4035.
- [10] 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—2953.
YAN Chang-bin, LI Guo-quan, CHEN Dong-liang, et al. Amended expressions of Hoek-Brown criterion based on blasting cumulative damage effects of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2952—2953.
- [11] 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.