

# 多重影响因素下的边坡稳定性评价方法及应用

陈建宏,王凯,钟福生

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

**摘要** 在边坡稳定性评价方法基础上,分析了边坡稳定性评价方法的某些缺陷,讨论了影响边坡稳定性的因素,并对影响边坡稳定性的几类指标进行分析和归类。从地质条件、自然环境、工程设计等角度考虑,建立了一种考虑多重影响因素并结合层次分析法(AHP)和模糊数学的边坡稳定性评价方法,利用该方法对某露天矿山边坡进行了稳定性评价。新分级体系下的边坡稳定性分级结果表明,中区和南区下盘边坡是潜在不稳定区域,需要进一步分析,而上盘边坡的稳定性明显好于下盘边坡的稳定性,这与CSMR的分级结果相近,验证了指标分类的合理性以及该评价方法的可行性。

**关键词** 边坡稳定性评价;地质因素;环境因素;工程因素

**中图分类号** P642, TD854

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.20.002

## Approach and Application of Rock Slopes' Stability Assessment Under the Comprehensive Effect of Multiple Factors

CHEN Jianhong, WANG Kai, ZHONG Fusheng

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

**Abstract** Based on the method of slope stability assessment, the disadvantages of the slope stability assessment method has been analyzed. The factors of approach for evaluating rock slopes' stability have been proposed, and the factors that affecting the slope stability have been analyzed and categorized. They have been categorized into three groups, which are geological factor, environmental factor, and engineering factor. Based on these, a new approach for evaluating rock slopes' stability under the comprehensive effect of multiple factors combining Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy mathematics has been set up. A certain open-pit's rock slope has been evaluated by this approach. The results under the new classification system of slope stability classification showed that the central and southern district of footwall slope was potentially unstable areas, which need further analysis. Moreover the slope stability of the hanging wall was much better than the footwall, which was similar with CSMR classification results. The results showed that the factors' categorization was rational and the assessment was valid.

**Keywords** slope stability assessment; geological factor; environmental factor; engineering factor

### 0 引言

边坡稳定性评价在工程上具有重要的实用意义和经济意义。传统的边坡稳定性评价方法主要有极限平衡法和数值计算法<sup>[1]</sup>。近几年,边坡稳定性评价方法取得了很大的突破,先后涌现出许多方法,如模糊综合评价法<sup>[2-5]</sup>、可靠度评价方法<sup>[6,7]</sup>、灰色系统评价法<sup>[8,9]</sup>以及神经网络评价方法<sup>[10,11]</sup>等。然而这些方法都存在着各自的局限性,有的还处于研究和探索阶段,只能作为一种参考和补充;有的边坡稳定性评价方法评

价指标体系还不够完善,产生的误差较大。目前边坡稳定性评价指标都是在岩体质量分级的基础上引入了结构面性质和边坡几何结构这两个工程因素,使之可以用来评价边坡稳定性,但对触发边坡失稳的环境因素没有涉及。笔者在传统评价方法考虑因素之外,加入了自然环境因素,并在工程设计因素中引入了坡面形态系数的定义,在施工因素中加入了开挖强度,基于此,提出了考虑多重影响因素并结合层次分析法和模糊数学的边坡稳定性评价方法。

收稿日期:2013-02-25;修回日期:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(50774092);高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200449);湖南省博士生科研创新项目(1960-71131100061)

作者简介:陈建宏,教授,研究方向为采矿工程、矿业经济与系统工程,电子信箱:cjh@263.net

### 1 构建层次模型及权重向量的计算

层次分析法 (AHP) 是由美国学者 Saatty<sup>[12]</sup> 提出的决策问题建模方法。AHP 将涉及一个决策问题的众多影响因素进行分类和层次化, 构建层次模型。对同一层次各个影响因素进行两两比较, 从而确定某一因素在该层次内的重要性程度 (即权重)。在得出所有因素的权重后进行总排序, 为决策者提供决策依据。

根据上述讨论, 构建边坡稳定性评价的层次模型如图 1 所示。综合 SMR 法的边坡稳定性分级标准, 确定边坡稳定性分级指标。AHP 确定各因素权重分为 5 个步骤如下。

(1) 构建层次模型, 如图 1 所示。

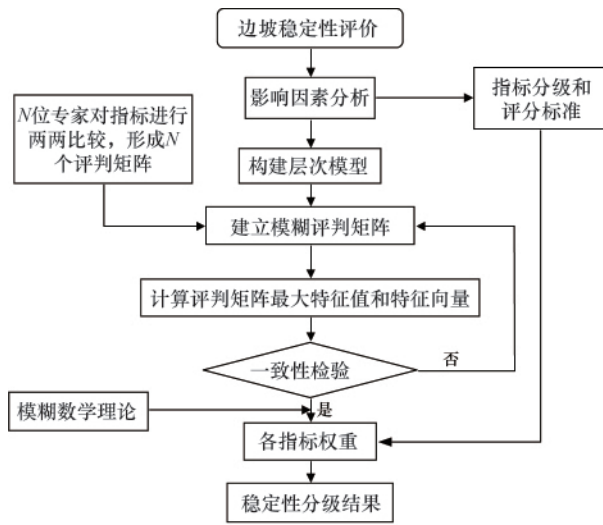


图 1 边坡稳定性评价流程

Fig. 1 Flow chart of slope stability evaluation

(2) 对指标集的所有元素依次进行两两比较, 得出相对重要性程度  $\beta_{ij}$ , 从而构造评判矩阵  $B$ 。

$\beta_{ij}$  的确定需要依据比较标度正确选取, 可参照文献[12]选取。假设有  $N$  位专家对指标集进行评判, 则可以形成  $N$  个评判矩阵, 第  $k$  位专家的评判矩阵为

$$B_k = \begin{bmatrix} \beta_{11k} & \beta_{12k} & \cdots & \beta_{1nk} \\ \beta_{21k} & \beta_{22k} & \cdots & \beta_{2nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{m1k} & \beta_{m2k} & \cdots & \beta_{mnk} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\beta_{ij} = 1/\beta_{ji}$ ,  $\beta_{ii} = 1, 1 \leq k \leq N$ 。

(3) 根据式(3)~式(5)构造三角模糊数。三角模糊数代表了所有专家对某个指标的最悲观值、最可能值、最乐观值的估计, 用模糊数学思想描述一个指标值的浮动范围, 如图 2 所示。图中,

$$\alpha_{ij} = [\alpha_{ij} \quad \delta_{ij} \quad \gamma_{ij}] \quad (2)$$

$$\alpha_{ij} = \min(\beta_{ijk}) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

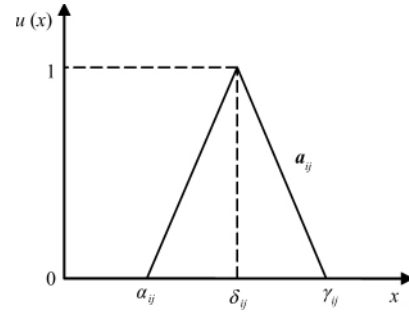


图 2 三角模糊数

Fig. 2 Triangular fuzzy number

$$\delta_{ij} = \left( \prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = \max(\beta_{ijk}) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中,  $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$ ;  $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9], \forall i, j=1, 2, \dots, m$ 。 $\alpha_{ij}$  为在  $N$  个专家的比较中第  $i$  个指标和第  $j$  个指标相比较的重要性程度值的最小值,  $\delta_{ij}$  为最可能值,  $\gamma_{ij}$  为最大值。它们共同组成一个模糊数集, 表示指标  $i$  与指标  $j$  相比较的重要性程度范围。

(4) 利用三角模糊数将第(2)步形成的  $N$  个确定性评判矩阵形成 1 个模糊评判矩阵  $A$ , 共表达式为

$$A = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (\alpha_{12}, \sigma_{12}, \gamma_{12}) & \cdots & (\alpha_{1m}, \sigma_{1m}, \gamma_{1m}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\sigma_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1, 1, 1) & \cdots & (\alpha_{2m}, \sigma_{2m}, \gamma_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (1/\gamma_{1m}, 1/\sigma_{1m}, 1/\alpha_{1m}) & (1/\gamma_{2m}, 1/\sigma_{2m}, 1/\alpha_{2m}) & \cdots & (1, 1, 1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5) 利用几何平均法计算各指标的模糊权重向量。首先在模糊评判矩阵中选取第  $i$  个行向量按照式(6)计算出模糊几何平均数, 共得到  $m$  个模糊几何平均数, 然后再按照式(7)计算出第  $i$  个指标的模糊权重, 其表达式为

$$Z_i = [\alpha_{i1} \otimes \alpha_{i2} \otimes \cdots \otimes \alpha_{im}]^{1/m} \quad (7)$$

$$W_i = Z_i \otimes [Z_1 \oplus Z_2 \oplus \cdots \oplus Z_m]^{-1} \quad (8)$$

式中,  $\otimes$  表示模糊数相乘,  $\alpha_1 \otimes \alpha_2 \equiv (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ ;  $\oplus$  表示模糊数相加,  $\alpha_1 \oplus \alpha_2 \equiv (\alpha_1 + \alpha_2, \delta_1 + \delta_2, \gamma_1 + \gamma_2)$ 。最后计算出的所有指标权重可形成一个模糊权重向量, 即

$$W = [W_1 \quad W_2 \quad \cdots \quad W_m] \quad (9)$$

### 2 多重影响因素分析

在上述模型的各个阶段, 影响因素分析和层次确定是最为重要的。影响边坡稳定性评价的因素多而复杂, 各类边坡稳定性评价方法的参评因素、评价标准都不相同, 对同一个评价对象不同的评价方法可能会有不同的评价结果<sup>[13]</sup>。基于现场调查、文献回顾和辅助数据的收集, 将影响边坡稳定性因素归类为自然环境因素、工程设计因素、地质因素、工程与地质的相互作用因素及施工因素 5 种类型。

### 2.1 自然环境因素

原有边坡稳定性评价方法没有考虑边坡所处环境的影响因素。实践证明,当地的自然环境,如降水、边坡失稳记录、地震等是触发边坡失稳的一个重要因素。丁慧彦<sup>[4]</sup>考查了多起地震诱发边坡失稳的历史事件,将触发边坡失稳的最小震级定为 4.7 级。当地的边坡失稳记录,如某区域内年发生边坡失稳破坏的频率亦是需要考虑的。因此,可用地震活动性、降雨量和当地边坡失稳记录作为衡量自然环境因素的 3 个指标,评分标准见表 1。

表 1 自然环境因素评分标准

Table 1 Score standards of natural environment factor

地震活动性	评分	年平均降雨量/mm	评分	边坡失稳记录	评分
无地震记录	3.0	<200	4	极少记录	3
弱活动区	2.5	200~500	3		
中等活动区	2.0	500~800	2	每年有 1~2 起失稳记录	2
较强活动区	1.0	800~1100	1	每年有 3~5 起以上记录	1
强烈活动区	0	>1100	0	每年有 5 起失稳记录	0

### 2.2 工程设计因素

随着边坡工程的进一步发展,工程设计因素开始被关注。工程设计因素大体分为边坡高度、坡面角、坡面形态。在工程设计中,公路边坡和露天矿山边坡,边坡表面的形态一般为折线形。边坡前端坡面较陡,边坡后端较缓,这样有利于边坡的稳定性。在边坡角和边坡高度相同的情况下,边坡形态的不同会导致稳定性不一致。引入坡面形态这一指标有助于更好地评价边坡稳定性。为了定量衡量坡面形态,采用坡面形状系数  $\nu$  作为指标描述边坡,表明形状变化量占边坡总体面积的比例,定义为

$$\nu = \frac{S_2 - S_1}{S_{\Delta ABC}} \quad (10)$$

式中,  $S_1$  为坡面内凹面积,  $S_2$  为坡面外凸面积,  $S_{\Delta ABC}$  为边坡总体面积。  $\nu < 0$  时,表明坡面内凹占优势;  $\nu = 0$  时,表明坡面凹凸平衡;  $\nu > 0$  时,表明外凸占优。内凹占优对边坡稳定有利,外凸占优对边坡稳定不利。

实际情况中,边坡表面形态变化量所占比例较小,在露天矿边坡中,坡面形状系数一般在 -0.2~0.2 之间。可以设置一系列标准值量化  $\nu$  对边坡稳定性的影响。图 3 为坡面形态系数的定义示意图。

综合以上影响工程因素的指标,对边坡高度、坡面形态、边坡角进行量化,设置标准评分值,见表 2。

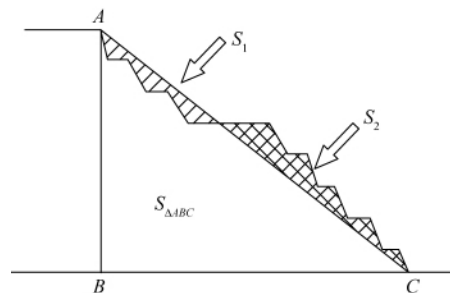


图 3 坡面形态系数的定义

Fig. 3 Definition of slope form coefficient

表 2 工程因素评分标准

Table 2 Score standards of engineering factor

边坡高度/m	评分	坡面形态	评分	边坡角/(°)	评分
<100	4	<-0.2	2.0	<30	4
100~200	3	-0.1~-0.2	1.5	31~45	3
200~300	2	-0.1~0.1	1.0	46~60	2
300~400	1	0.1~0.2	0.5	61~75	1
>400	0	>0.2	0	75~90	0

### 2.3 地质因素

传统边坡稳定性评价方法主要考虑的因素是地质因素<sup>[5]</sup>,地质因素分为两类:① 岩体及其组合形式;② 结构面的条件。岩体对边坡的影响主要通过岩石坚固程度、完整性程度、风化程度体现。坚硬岩石容易形成高边坡,软岩边坡稳定性通常较差。所以在描述岩体对边坡稳定性影响的时候采用 3 个指标:岩石的单轴抗压强度 (UCS),岩体风化程度,岩石的质量指标 (RQD),相应的评分标准见表 3。

表 3 地质因素—岩体质量评分标准

Table 3 Score standards of geological factor-rock mass quality

RQD/%	评分	UCS/MPa	评分	风化程度	评分
90~100	4	>200	3.0	未风化	3.0
75~90	3	100~200	2.5	微风化	2.5
50~75	2	50~100	2.0	弱风化	2.0
25~50	1	25~50	1.0	强风化	1.0
<25	0	<20	0	分解	0

坚硬致密的岩石所构成的边坡,其稳定性往往由结构面所控制,这些结构面包括断层、节理组、层理组等。结构面强度是影响边坡稳定性的一个重要因素,它由结构面的表面形态、充填胶结特性、张开度、连续性等决定。结构面性质本身就具有一定的强度特征,所以在考虑结构面这一影响因素时,不再考虑结构面性质本身,而是从表征它的抗剪切强度的指标入手,指标名称及其评分标准见表 4。

表 4 地质因素-结构面评分标准

Table 4 Score standards of geological factor-structural plane

裂隙水	评分	连续性	评分	张开度/mm	评分	充填物/mm	评分	粗糙度	评分
干燥	2.0	很低连续性	2.0	<0.1	2.0	硬质充填<2.5	2.0	16~20	2.0
潮湿	1.5	低连续性	1.5	0.1~1.0	1.5	硬质充填 2.5~5	1.5	12~16	1.5
湿润	1.0	中等连续性	1.0	1~2.5	1.0	无充填物	1.0	8~12	1.0
含静态水	0.5	高连续性	0.5	2.5~5	0.5	硬质充填>5	0.5	4~8	0.5
流动的水	0	很高连续性	0	>5	0	软弱充填物	0	0~4	0

2.4 工程和地质的相互作用因素

结构面产状对边坡的影响需要结合坡面的产状一起考虑,考察结构面产状的指标有结构面倾角、结构面倾角与边坡角的差值、结构面与坡面走向的差值,具体评分标准见表 5。

表 5 地质与工程相互作用因素评分标准

Table 5 Score standards of geological and engineering interaction factor

平行度/ $(^\circ)$	评分	倾角/ $(^\circ)$		评分	结构面倾角/ $(^\circ)$	评分
		$\beta_j - \beta_s$	$\beta_j + \beta_s$			
>30	4	>10	<110	0	<20	4
30~20	3	10~0	110~120	1	20~30	3
20~10	2	0	>120	2	30~35	2
10~5	1			3	35~45	1
<5	0	<0			>45	0

2.5 施工因素

同样在施工时,引入开挖方式影响因素时只是简单的按照爆破作业方式进行划分,没有考虑开挖强度的影响。引入开挖方式的调整外,还考虑开挖量的影响,引入开挖强度指标,其定义表达式为

$$\omega = \frac{S_w}{S_w + S_{\Delta ABC}} \quad (11)$$

式中, $S_w$ 为边坡开挖量, $S_{\Delta ABC}$ 为边坡开挖后剩余量,开挖强度指标定义如图 4 所示。开挖强度指标描述了开挖量在整个边坡中所占的比例。施工因素的评分标准见表 6。

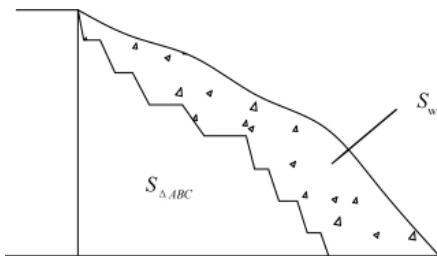


图 4 开挖强度的定义

Fig. 4 Definition of excavation intensity

表 6 施工因素评分标准

Table 6 Score standards of construction factor

开挖强度	评分	开挖方式	评分
<0.2	4	自然边坡或人工开挖	6
0.2~0.4	3	预裂爆破	4
0.4~0.6	2	光面爆破	2
0.6~0.8	1	常规爆破	1
0.8~1.0	0	无控制爆破	0

基于以上原因,将影响边坡稳定性因素归为自然环境、工程设计、地质、工程与地质的相互作用和施工因素 5 种类型, $X_1(0.0495)$ , $X_2(0.1275)$ , $X_3(0.5493)$ , $Y_1(0.4)$ , $Y_2(0.6)$ , $X_4(0.1925)$ , $X_5(0.0752)$ 并将其细分为 19 个参数,其分类见表 7。

表 7 边坡稳定性评价的多重影响因素和权重

Table 7 Comprehensive effect of multiple factors and weights of slope stability evaluation

自然因素 $X_1$	工程因素 $X_2$	地质因素 $X_3$		地质与工程相互作用因素 $X_4$	施工因素 $X_5$
		岩体 $Y_1$	结构面 $Y_2$		
边坡失稳记录	边坡高度	岩石质量指标	粗糙度	结构面与边坡走向夹角	开挖强度
年平均降雨量	边坡角	风化程度	连续性	结构面倾角	

每个类型又采用不同的指标和评分进行描述,并赋予相应的分级权重  $W_b$ ,评分权重  $W_a$ ,对不同指标进行加权求和即可得出总评分,用于最终的稳定性评价。根据前面分析的几大类影响因素,对所有影响因素下每个指标进行标准化,设置合理评分值(表 1~表 6),建立一套新的边坡稳定性分级体系。新体系中每个影响因素由若干指标组成,每个指标分配

有相应的评分分段,指标分值的总和为 10 分。将所有影响因素 | 的总评分乘以相应权重,参见表 8 即可得出边坡的稳定性评级。

表 8 岩质边坡稳定性评价分级标准

Table 8 Classification standard of rock mass slope stability evaluation

$W_b$	$W_a$	稳定性	破坏规模	描述
A	8~10	稳定	无	岩体质量非常好,边坡设计合理,能长期维持稳定
B	6~8	较稳定	有小范围滑塌的可能性	岩体质量较好,边坡设计合理,部分区域需要加固
C	4~6	一般	有大范围滑塌的可能性	岩体质量一般,受地质条件影响设计时无法避开不利因素,需要加固
D	3~4	差	发生大范围滑塌可能性很大	岩体质量较差,大规模加固或者修改设计
E	0~3	极差	会大规模平面滑动	岩体质量很差,设计不合理,需要重新设计边坡

### 3 工程应用

兰伯特角铁矿矿区位于西澳的皮尔巴拉地区,此矿区南北长约 8km,由东至西宽度范围变化大,从 400m 至 2km 不等,矿坑总面积约为 223km<sup>2</sup>。最大边坡高度出现在矿坑中部和南部,西部最大边坡高度为 410m,东部最大边坡高度 375m。上

盘和端部最终边坡角为 52°~53°,下盘最终边坡角一般随矿体自然倾角 43°~45°。地区气候为半干旱热带气候,年平均降雨量 314mm。对矿区北、中、南 3 个区域选取典型剖面进行评价。按照第(1)~(5)步骤所描述的方法,得到 1 个一级模糊评判矩阵,见表 9。

表 9 模糊评判矩阵

Table 9 Fuzzy evaluation matrix

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Z_i$
$X_1$	1,1,1	1/5,1/3,1/2	1/7,1/6,1/5	1/6,1/5,1/3	1/4,1/3,1	1/4,1/3,1/2
$X_2$	2,3,5	1,1,1	1/7,1/6,1/5	1/4,1/2,1	1,3,4	2/3,1,4/3
$X_3$	5,6,7	5,6,7	1,1,1	3,5,6	5,7,8	7/4,25/6,33/7
$X_4$	3,5,6	1,2,4	1/6,1/5,1/3	1,1,1	2,3,5	1,10/7,2
$X_5$	1,3,4	1/4,1/3,1	1/8,1/7,1/5	1/5,1/3,1/2	1,1,1	1/3,1/2,5/6

根据式(8)计算得出的模糊权重向量为

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0275 & 0.0440 & 0.0915 \\ 0.0675 & 0.1273 & 0.2384 \\ 0.3454 & 0.5624 & 0.8536 \\ 0.1056 & 0.1930 & 0.3779 \\ 0.0383 & 0.0734 & 0.1504 \end{bmatrix} \quad (12)$$

求得模糊权重分量的几何均值,即为包含确定性值的权重向量,有

$$W = [W_1 \quad W_2 \quad W_3 \quad W_4 \quad W_5] =$$

$$[0.0495 \quad 0.1275 \quad 0.5493 \quad 0.1975 \quad 0.0752] \quad (13)$$

地质因素下仅有两个二级指标,直接根据专家经验问卷得出其权重:岩体 0.4,结构面 0.6。

对 3 个剖面的边坡按照表 1~表 6 的标准进行评分,得出 6 个边坡的评分值,每个指标下的评分乘以对应的权重,即为边坡的总评分。例如北区上盘  $W_a = 0.0495 \times 8.0 + 0.1275 \times 4.5 + 0.5493 \times (0.4 \times 9.0 + 0.6 \times 7.0) + 0.1975 \times 8.0 + 0.0752 \times 6.0 = 7.28549 \approx 7.3$ 。表 10 列出了各边坡在新分级体系下的评分值和分级结果。

表 10 新分级体系下的边坡各指标评分值

Table 10 Slope index score of the new classification system

边坡区域	评分						$W_a$	$W_b$
	自然环境	工程设计因素	岩体质量	结构面条件	结构面产状	施工因素		
北区上盘	8.0	4.5	9.0	7.0	8.0	6.0	7.3	B
北区下盘	8.0	6.8	6.3	6.5	7.0	6.0	6.6	B
中区上盘	8.0	3.3	8.2	7.0	7.0	5.0	6.8	B
中区下盘	8.0	4.8	5.0	6.0	4.5	5.0	5.3	C
南区上盘	8.0	3.5	8.5	7.0	6.5	5.0	6.7	B
南区下盘	8.0	5.2	5.7	6.5	4.5	5.0	5.7	C

#### 4 结论

(1) 新分级体系下的边坡稳定性分级结果表明,中区和南区下盘边坡是潜在不稳定区域,需要进一步分析,而上盘边坡的稳定性明显好于下盘边坡稳定性,这与CSMR的分级结果相近。

(2) 边坡的稳定性评价方法是从岩体分级的研究中发展而来的,目前多数稳定性评价方法更注重地质因素的影响研究,而对触发边坡失稳的自然环境因素分析较少,对工程因素的分析也并不完善。

(3) 影响边坡稳定性因素多且复杂,不同的专家学者对于每个评价因素的影响程度意见不一。多重影响因素的考虑在具体情况中要根据实际情况进行修正。例如对于大型开挖边坡,需要考虑开挖强度和开挖方式的影响,使其能够更广泛地适用于各种不同类型边坡的稳定性评价。

#### 参考文献 (References)

- [1] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 16-62.  
Zhao Mingjie, He Chunguang, Wang Duoyin. Slope engineering treatment technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 16-62.
- [2] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡治理决策的模糊层次分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1117-1120.  
Xie Quanmin, Xia Yuanyou. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1117-1120.
- [3] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于AHP的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2627-2632.  
Huang Jianwen, Li Jianlin, Zhou Yihong. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2627-2632.
- [4] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 490-495.  
Li Zhangming. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 490-495.
- [5] Liu Y C, Chen C S. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment[J]. Engineering Geology Journal, 2007, 89(1-2): 129-143.

- [6] 林立相, 徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 235-239.  
Lin Lixiang, Xu Hanbin. Journal of Mountain Science, 1999, 17(3): 235-239.
- [7] Chowdhury R N, Xu D W. Rational polynomial technique in slope-reliability analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(12): 1910-1928.
- [8] 陈新民, 罗国煜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638-641.  
Chen Xinmin, Luo Guoyu. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 638-641.
- [9] Sah N K, Sheorey P R, Upadhyaya L N. Maximum likelihood estimation of slope stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(1): 47-53.
- [10] 马洪生, 胡卸文. 神经网络在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(1): 49-53.  
Ma Hongsheng, Hu Xiewen. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(1): 49-53.
- [11] Wang H B, Xu W Y, Xu R C. Slope stability evaluation using back propagation neural networks [J]. Engineering Geology Journal, 2005, 80(3-4): 302-315.
- [12] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- [13] 鲁光银, 朱自强, 李华, 等. 公路隧道岩体质量分级的模糊层次分析法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(2): 368-374.  
Lu Guangyin, Zhu Ziqiang, Li Hua, et al. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2008, 39(2): 368-374.
- [14] 丁慧彦, 王余庆, 孙进忠, 等. 地震崩滑预测方法及其工程应用研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 475-480.  
Ding Huiyan, Wang Yuqing, Sun Jinzhong, et al. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(4): 475-480.
- [15] 沈良峰, 张永红, 廖继原. 边坡稳定性分析预测的综合指标模型[J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 30-33.  
Shen Liangfeng, Zhang Yonghong, Liao Jiyan. Building Science, 2003, 19(3): 30-33.

(责任编辑 赵业玲)

#### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。