

文章编号:1674-2869(2018)04-0419-06

# 基于多判据的“三高”地区公路边坡稳定性的综合评价

姜成潼,王亚军\*,李元松,司马丹琪,何 泉

武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**高寒、高海拔、高地震烈度地区的边坡稳定性比一般地区更为复杂,评价时须考虑冻融、风化、地震等影响因素。选取模糊综合评价法、极限平衡法、数值算法、可靠度分析法计算结果作为基础指标,采用改进的层次分析法确定指标权重,根据模糊数学理论计算指标隶属度,构建多判据下“三高”地区公路边坡稳定性综合评价模型。基于该模型对乌尉高速公路 K53~K78 区段岩质边坡的稳定性进行分析,结果与 TFBQ 体系评价结论吻合,验证了该模型的正确性及合理性。

**关键词:**“三高”地区;多判据;公路边坡稳定性;模糊综合评价

**中图分类号:**U419      **文献标识码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.04.014

## Evaluation of Highway Slope Stability in High Altitude Cold and Intensity Regions Based on Multi-Criterion

JIANG Chengtong, WANG Yajun\*, LI Yuansong, SIMA Danqi, HE Quan

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The evaluation of slope stability in high altitude cold regions with high seismic intensity is more complicated, the regional engineering geological characteristics must be considered. With the results of fuzzy comprehensive evaluation, limit equilibrium analysis, reliability analysis and numerical calculation method as the basic indexes, the improved analytic hierarchy process was adopted to determine the weight of index and the membership degree of index was calculated according to the fuzzy mathematics theory, finally a multi-criteria model for comprehensive evaluation of highway slope stability in the regions was constructed. The rock slopes in the K53-K78 sections of Wu-Yu highway were evaluated by the model. The result showed that the slopes were in an unsteady state, which was similar to that by the TFBQ system, verifying the correctness and rationality of the model.

**Keywords:** high altitude cold regions with high seismic intensity; multi-criterion; highway slope stability; fuzzy comprehensive evaluation

随着我国“一带一路”倡议的推进,大批公路、铁路等基础设施建设在我国西部地区陆续开展,该类地区具有典型高寒、高海拔、高地震烈度的“三高”特征,岩土体风化强烈、高陡边坡林立,对坡体稳定状态判断受野外工作环境差、现场原位

试验难度大等诸多因素的影响。结合地区特征选择合适的边坡稳定性评价方法,对地质灾害风险评估、公路选线及滑坡防治设计具有重要的工程实际意义。

国内外学者对复杂地区边坡稳定性的评价方

收稿日期:2018-02-23

**基金项目:**武汉工程大学第九届研究生教育创新基金(CX2017037);武汉工程大学科学研究基金(K201412);湖北省教育厅科学研究指导性项目(B2016058)

**作者简介:**姜成潼,硕士研究生。E-mail:jiang\_cheng\_tong@163.com

**\*通讯作者:**王亚军,博士,教授。E-mail:yajun11616@163.com

**引文格式:**姜成潼,王亚军,李元松,等.基于多判据的“三高”地区公路边坡稳定性的综合评价[J].武汉工程大学学报,2018,40(4):419-424.

法已进行了一系列的研究工作。冯守中等<sup>[1]</sup>认为严寒地区的岩质边坡需考虑冻胀作用力的影响,在模型中设置一定的冻胀范围,采用有限条分法计算边坡安全系数;袁广祥等<sup>[2]</sup>运用刚体极限平衡法对川藏公路冰碛堆积体边坡进行稳定性分析,考虑各地震烈度下冰碛土强度特征的变化;李建峰等<sup>[3]</sup>构建了高寒高海拔地区模糊综合评判体系模型,结合模糊评价理论对该类地区岩质边坡稳定性进行分析;王掌权等<sup>[4]</sup>考虑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性,运用有限元强度折减法对黄土地区边坡稳定性进行数值分析。

上述各类方法都能在一定限度内考虑地区地质环境特殊性,得到边坡稳定性基础评价结果。但由于地质体复杂性边坡工程问题是信息不全、信息模糊问题,因此,必须引入更为综合性的评价方法才能得到相对客观的评价结论。本文提出多判据的“三高”地区公路边坡稳定性综合评价方法,将不同评价方法结果作为评价指标,采用模糊数学理论,建立多指标的边坡稳定性评价模型,集多种方法的结论于一体,有效克服传统单一判据所得结论可信度偏低的缺陷。

## 1 “三高”地区特性及评价方法的选择

### 1.1 区域特点

我国“三高”地区主要包括新疆、甘肃和青海的高山地带及青藏高原。受印度板块与欧亚大陆的碰撞和推挤,区内形成了天山、祁连山、昆仑山、阿尔泰山、喜马拉雅山等山脉,多由太古、元古、下古生界的结晶岩类构成,变质较深,岩质坚硬<sup>[5]</sup>,山高坡险,平均海拔多在2 000 m~4 000 m。由于海拔较高、气候寒冷,部分区域终年积雪覆盖,平均最暖月温度不足10℃。受大陆性气候影响,降雨量较少,蒸发量较大,空气干燥多风。地区内存在羌塘、巴颜喀拉、柴达木-陇西、塔里木等活动地块,地块边界构造运动强烈、褶皱广泛发育,活动断裂的形成对强震有控制作用<sup>[6]</sup>。根据中国地震动峰值加速度区划图<sup>[7]</sup>，“三高”地区地震动峰值加速度多在 $0.2g$ ( $g=9.806\ 65\text{ m/s}^2$ )以上。

### 1.2 边坡稳定性影响因素

1.2.1 高寒区冻融风化作用 “三高”地区日照较强,昼夜温差明显。由于温度变化大,原本存在于岩体裂缝中的降雨或融雪结冰体积膨胀,对岩石内部产生冻胀作用力,使其节理裂隙逐渐发展,向内部扩张。重复循环的冻融作用导致岩体深处破碎,整体稳定性降低,容易造成滑坡。此外,融化

的雪水侵入岩土体,使得岩石裂缝内充填物吸水饱和、土体中含水量提高发生强度软化,也是引发整体或局部滑动的诱因。风化作用使裸露基岩表面剥离、脱落,形成碎块石土层,为滑坡、崩落提供物质来源。

1.2.2 高地震烈度区地震作用 具有高烈度(地震烈度Ⅷ~Ⅸ)特点的“三高”地区地壳运动活跃。地震发生时,地震波以作用力的方式传播于岩体,产生的垂直向地震惯性力会增加边坡下滑力。岩体内部结构会受到扰动,已经存在的结构面开始松弛,强度降低,新生成的结构面还有可能使得岩体内孔隙水压力增强,导致裂缝扩展,引起岩层根部岩体破坏。

1.2.3 人类工程活动 “三高”地区的公路建设,大多需要对山体进行开挖,边坡开挖促进岩体卸荷裂隙发展,产生局部范围内的位移、变形。开挖时的扰动,容易使得山体表面破碎块石崩塌、滚落,造成次生灾害。

### 1.3 边坡稳定性评价方法的选择

模糊综合评价法能将某些无法定量描述的影响因子,如岩体风化程度(高海拔条件下岩体强、中风化特征不明显)、冻融条件(不同地形季节性温差各异、不同性质岩土体冻结温度各异)、边坡坡形等纳入边坡稳定性评价体系,更全面反映边坡实际情况;极限平衡法采用摩尔-库伦理论,满足力和力矩平衡、应力边界条件<sup>[8]</sup>,概念明确、操作简单;数值计算法理论完善,能考虑岩土体的受力特征,模拟冻融、风化作用对岩土体内部强度造成的损伤,计算精度较高;可靠度分析法以概率理论为基础,能考虑不同边坡特点,反映介质特性<sup>[9]</sup>。

由于“三高”地区自然环境脆弱、气候条件恶劣、工程地质条件复杂、野外勘察困难,对边坡的稳定性评价需要考虑多种影响因素;实际工程中又常出现现场取样困难、岩体结构面状况难以识别、岩土体力学参数无法准确测定、强度参数试验离散型较大等状况,综合应用上述常规边坡稳定性评价手段,能丰富完善边坡稳定性评价结果。同时,公路沿线边坡的稳定性评价容易受工程勘察时间紧、任务重、调查深度不足的限制,多判据方法的使用能在短期内得到一个相对快速可靠的评价结论。

## 2 多判据的边坡稳定性评价模型建立

### 2.1 因素集与评价集的确

将上述的边坡稳定性评价方法作为评价指

标,构建因素集  $x=\{x_1, x_2, x_3, x_4\}=\{\text{模糊综合评价法,极限平衡法,数值计算法,可靠度评价法}\}$ 。根据实际需要将边坡稳定性划分为5个级别,用 I、II、III、IV、V 分别表示边坡稳定、基本稳定、潜在不稳定、欠稳定、不稳定状态,构建评价集  $y=\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}=\{\text{稳定,基本稳定,潜在不稳定,欠稳定,不稳定}\}$ 。

模糊综合评价结果属于离散型指标,对其计算结果需做数量化处理,以满足评价数据统一规

范量化要求<sup>[10]</sup>,各等级分别对应的量化值为: I (0.9), II (0.7), III (0.5), IV (0.3)和 V (0.1)。极限平衡法与数值计算法计算结果皆为边坡稳定性安全系数,属于连续性指标;可靠性方法计算结果包括可靠度指标和失效概率两种形式,可靠度指标属离散型变量,失效概率是连续型变量,为便于计算分析,本文将可靠性评价结果统一为失效概率,作为连续性指标参与计算。多判据的边坡稳定性综合评价分级标准见表1。

表1 评价指标分级标准  
Tab. 1 Classification standard of evaluation index

评价指标	I	II	III	IV	V
模糊综合评价法计算结果	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
极限平衡法安全系数	>1.2	1.1~1.2	1.05~1.1	1.0~1.05	<1.0
数值计算法安全系数	>1.2	1.1~1.2	1.05~1.1	1.0~1.05	<1.0
可靠度评价法失效概率/%	<0.05	0.05~0.075	0.075~0.10	0.10~0.15	≥0.15

2.2 改进层次分析法确定权重

层次分析法根据两两比较的标度建立判断矩阵,从而表征各元素之间相对重要性大小,是模糊数学中最常用的权重确定方法。由于“三高”地区地域环境的特殊性,单一方法的评价结果无法全面界定边坡稳定状态,为合理考虑各方法计算结果权值,引入可拓学理论,用可拓比例区间代替单一精确值指标,以降低主观判断影响<sup>[11]</sup>。改进层次分析法的权重确定步骤如下:

1)构造可拓区间判断矩阵  $A=<A^-, A^+>$ ,其中  $A^-$ 、 $A^+$  分别为区间上下端点构成的矩阵,即结合实际情况,考虑不同工况下各指标的重要性程度,将层次分析法中比较判断所采用的1-9 标度中的单

值,用区间范围代替。

2)求出  $A^-$ 、 $A^+$  的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量  $X^-$ 、 $X^+$ 。

3)由  $A^-= (a_{ij}^-)_{n \times n}$ 、 $A^+= (a_{ij}^+)_{n \times n}$ , 计算  $k$  和  $m$  的值,其中  $k= \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n (1/\sum_{i=1}^n a_{ij}^+)}$ ;  $m= \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n (1/\sum_{i=1}^n a_{ij}^-)}$ , 式中  $k, m$  应满足  $0 < kx^- \leq mx^+$ , 若  $0 \leq k \leq 1 \leq m$ , 则说明可拓区间判断矩阵的一致性较好。

结合“三高”地区地质工程情况,考虑各评价方法的优缺点,参考专家意见,建立多判据下边坡稳定性区间判断矩阵,计算出各指标权重并对其进行一致性检验,见表2。

表2 边坡稳定性区间判断矩阵  
Tab. 2 Interval judgment matrix of slope stability

评价指标	模糊综合评价法	极限平衡法	数值计算法	可靠度评价法	权重	一致性检验
模糊综合评价法	(1.0,1.0)	(1.14,1.43)	(1.60,2.0)	(1.60,2.0)	0.346 2	$m=1.061\ 2$
极限平衡法	(0.70,0.88)	(1.0,1.0)	(1.20,1.60)	(1.20,1.60)	0.269 2	$k=0.935\ 7$
数值计算法	(0.50,0.63)	(0.63,0.83)	(1.0,1.0)	(0.80,1.20)	0.192 3	$0 \leq k \leq 1 \leq m$
可靠度评价法	(0.50,0.63)	(0.63,0.83)	(0.83,1.25)	(1.0,1.0)	0.192 3	检验合格

2.3 隶属度函数的选择

通常情况下,用隶属函数构成模糊集。最常用的隶属函数确定方法是模糊分析法,戒上型函数用于描述趋势向小的模糊量,戒下型函数用于描述趋势向大的模糊量,中间型函数用于描述中

间状态的模糊现象。本文对于定量指标选用岭型隶属函数计算隶属度;对于定性指标量化后,选用梯形隶属函数计算隶属度<sup>[12]</sup>。计算公式见表3。式中  $a、b、c、d$  分别表示评价集的上下界限,  $x$  表示参数实际值。

表 3 隶属度函数计算公式  
Tab. 3 Calculation formula of membership function

隶属函数类型	梯形	岭型
戒上型	$u_A(x)=\begin{cases} 1 & x\leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a\leq x\leq b \\ 0 & x>b \end{cases}$	$u_A(x)=\begin{cases} 1 & x\leq a \\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{b-a}(x-\frac{b+a}{2}) & a\leq x\leq b \\ 0 & x>b \end{cases}$
中间型	$u_A(x)=\begin{cases} 0 & x\leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a<x\leq b \\ 1 & b<x\leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c<x\leq d \\ 0 & x>d \end{cases}$	$u_A(x)=\begin{cases} 0 & x\leq a \\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{b-a}(x-\frac{b+a}{2}) & a<x\leq b \\ 1 & b<x\leq c \\ \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{d-c}(x-\frac{c+d}{2}) & c<x\leq d \\ 0 & x>d \end{cases}$
戒下型	$u_A(x)=\begin{cases} 0 & x\leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a\leq x\leq b \\ 1 & x>b \end{cases}$	$u_A(x)=\begin{cases} 1 & x\leq a \\ \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{b-a}(x-\frac{b+a}{2}) & a\leq x\leq b \\ 0 & x>b \end{cases}$

2.4 多级模糊综合评价体系

根据隶属函数求得各因素(  $x_i$  )对各评价指标(  $y_i$  )的隶属度后,可形成单因素模糊评价矩阵:

$$R_i=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x1} & \cdots & r_{xy} \end{bmatrix}$$

矩阵中  $r_{xy}$  表示第  $x$  个评价指标对于第  $y$  个评价等级的隶属度。模糊评价矩阵与权重集  $A_i=[w_1, w_2, \cdots, w_x]$  共同形成单因素模糊评价集,见式(1):

$$B_i=A_i\cdot R_i \tag{1}$$

根据模糊运算法则与最大隶属度原则进行计算分析<sup>[13]</sup>,可得到模糊综合评价结果。多级模糊综合评价体系即在单因素模糊评价集形成基础上,考虑各类因素的影响,计算多类评价指标权重,依照式(2)构成多因素模糊评价集,建立多级模糊综合评价体系。

$$B=A\cdot R=A\cdot\begin{bmatrix} A_1\cdot R_1 \\ A_2\cdot R_2 \\ \vdots \\ A_n\cdot R_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

3 工程实例

3.1 工程概况

本文以高速公路 G07<sub>11</sub> 乌鲁木齐至尉犁段 K53~K78 区段沿线岩质边坡为例进行研究。研究区位于乌鲁木齐河流域上游地区,地震烈度为 8 度,峰值加速度为 0.2 g,自后峡以上山区年平均气温 2 ℃,降水量 500 mm,蒸发量 953.4 mm,地势总体由北向南逐渐变高,平均海拔约为 3 083 m,属侵蚀剥蚀中高山地貌,是典型的“三高”地区。

沿线边坡自然高度约 110 m~410 m,地形坡度多为 40°~65°,坡面侵蚀剥蚀作用强烈,岩体破碎松散。

3.2 边坡基础模糊评价

对边坡的模糊综合评价结果需作为多判据综合评价的基础指标,由于沿线边坡众多,本次选取具有代表性的 BP-19 进行分析研究。BP-19 为某隧道进口边坡,边坡地貌见图 1,相对高差约 150 m,整体坡度约 43°。坡面呈“缓-陡-缓”台阶状,坡面露头基岩为泥盆系硅质岩(D<sub>3</sub>t<sup>b</sup>),岩体倾向与边坡倾向相对一致,属于顺层边坡。根据现场取样试验结果,中风化岩体单轴抗压强度约为 30 MPa~50 MPa。边坡设计开挖级数为 3 级。实地工程地质调绘初步认定该坡现状欠稳定、开挖后不稳定。



图 1 BP-19 隧道进口边坡地貌

Fig. 1 Geomorphology of BP-19 tunnel entrance slope

结合“三高”地区特征建立两级边坡基础模糊评价模型。将边坡稳定性分为 I~V (稳定、基本稳定、潜在不稳定、欠稳定、不稳定)5 个级别,评价因子的选取与评价指标等级的划分见表 4,各级指标依照改进的层次分析法计算权值,计算结果见表 5。



表4 边坡基础模糊评价指标分级标准  
Tab. 4 Classification standard of basic fuzzy evaluation index for slope

一级指标	二级指标	评价指标分级标准				
		I	II	III	IV	V
坡体特征 T1	T11 坡形	上凸下凹	凹型	直线型	凸型	上凹下凸
	T12 坡率	1:1.25	1:1	1:0.75	1:0.5	1:0.4
	T13 坡高(相对最低开挖面) / m	0~8	8~20	20~40	40~60	> 60
地质条件 T2	T21 边坡结构类型	逆向坡	缓倾逆向坡	切向坡	缓倾顺向坡	顺向坡
	T22 坡面与主要结构面产状关系	很有利	有利	一般	不利	很不利
	T23 岩体单轴抗压强度 / MPa	> 60	30~60	15~30	5~15	< 5
	T24 风化程度	微风化	弱风化	中风化	强风化	全风化
环境因素 T3	T31 冻融循环 / (次/年)	0~10	10~25	25~35	35~50	> 50
	T32 地震烈度	< 5	5~6	6~7	7~8	> 8
	T33 边坡开挖状况	一级	二级	三级	四级	五级

表5 边坡基础模糊评价各级指标权重 Tab. 5 Index weight of basic fuzzy evaluation for slope at all levels			
一级指标	权重	二级指标	权重
T1	0.210 2	T11	0.195 8
		T12	0.473 5
		T13	0.330 7
T2	0.463 4	T21	0.208 3
		T22	0.375 0
		T23	0.125 0
		T24	0.291 7
T3	0.332 5	T31	0.328 6
		T32	0.203 2
		T33	0.468 2

根据式(1)计算坡体特征(T1)、地质条件(T2)、环境因素(T3)模糊评价集结果为:

$$B_1=\{0, 0.142, 0.361, 0.157, 0.340\}$$
$$B_2=\{0, 0.125, 0.396, 0.419, 0.058\}$$
$$B_3=\{0, 0.202, 0.525, 0.437, 0\}$$

根据式(2)组成多因素评价:

$$B=\{0.2102, 0.4634, 0.3325\}$$
$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.142 & 0.361 & 0.157 & 0.340 \\ 0.0 & 0.125 & 0.396 & 0.419 & 0.058 \\ 0.0 & 0.202 & 0.525 & 0.437 & 0.0 \end{bmatrix} = \{0.0, 0.155, 0.434, 0.372, 0.098\}$$

由最大隶属度原则可知,采用模糊综合评价法得到的边坡基础稳定性评价等级为Ⅲ级。

3.3 多判据的边坡稳定性综合评价结果

本文运用Geo-Slope、Flac<sup>3D</sup>等软件得到各方法

评价结果。BP-19采用极限平衡法与数值计算法求得地震工况下的边坡稳定性安全系数分别为1.02、0.99;采用可靠度分析方法求得地震工况下的边坡失效概率为12.6%。模糊综合评价求得边坡稳定性等级为Ⅲ级。根据表2中各指标权重计算结果以及式(1)分别得到地震工况下单因素模糊评价集:

$$B=\{0.346\ 2, 0.269\ 2, 0.192\ 3, 0.192\ 3\}$$
$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.70 & 0.30 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.15 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.52 & 0.48 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.53 & 0.17 \end{bmatrix} = \{0.0, 0.0, 0.283, 0.440, 0.125\}$$

由最大隶属度原则可知 BP-19 在地震工况下边坡稳定性安全等级为Ⅳ级,处于欠稳定状态,在地震等触发因素作用下,可能产生局部滑动、崩塌,应引起建设设计施工单位的重视。与基础模糊评价结果相比,BP-19不稳定等级有所提高,这是各评价方法结论相互作用的结果,表明多判据的边坡稳定性评价方法具有综合性强、考虑因素更全面的特点。

3.4 合理性验证

乔国文等<sup>[14]</sup>结合高寒地区特点,提出了冻融风化条件下边坡岩体质量评价体系(TFBQ),能得出较为准确的评价结果,提出的修正后边坡岩体质量公式见式(3),式中BQ值依照工程岩体分级标准<sup>[15]</sup>进行计算。本文采用此方法计算BP-19岩质边坡稳定性级别,以验证多判据边坡稳定性综合评价结果的合理性。

$$TFBQ=BQ-100(\sum_{i=1}^4 K_i)+K_5 \tag{3}$$

式(3)中  $K_1$  为主控结构面与边坡关系修正系数; $K_2$  为水文条件影响修正系数; $K_3$  为冻融风化修正系数; $K_4$  为地震修正系数; $K_5$  为预开挖方式修正系数。

结合BP-19实际情况,中风化硅质岩  $BQ$  值为405,  $K_1 \sim K_5$  的取值分别为0.306、0.1、1.0、0.3、40,计算得到  $TFBQ$  值为275,依照提出的边坡稳定性评价表,该坡处于欠稳定状态,需要进行一般性加固。该结论与多判据的边坡稳定性综合评价结果保持一致。

## 4 结 语

1)“三高”地区工程地质条件复杂,利用传统单一的评价方法,难以得出可信的评论。本文提出多判据的边坡稳定性评价方法,得到综合评价结果,使评价结果更加客观。

2)将提出的方法应用于乌尉高速公路K53~K78区段岩质边坡稳定性评价,评价结果与改进的复杂地区边坡岩体质量评价结论有较高的吻合度,说明多判据的“三高”地区边坡稳定性综合评价体系的建立具有合理性,为后期边坡工程的设计与施工提供一定参考。

### 参考文献:

- [1] 冯守中,闫澍旺,崔琳.严寒地区路堑边坡破坏机理及稳定计算分析[J]. 岩土力学,2009,30(增刊):155-159.
- [2] 袁广祥,尚彦军,林达明.帕隆藏布流域堆积体边坡的工程地质特征及稳定性评价[J]. 工程地质学报,2009,17(2):188-194.
- [3] 李建峰,万臣,赵勇.高寒高海拔地区岩质边坡稳定性评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(2):45-49.
- [4] 王掌权,许健,郑翔,等.反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(2):15-21.
- [5] 刘训,游国庆.中国的板块构造区划[J]. 中国地质,2015,42(1):1-17.
- [6] 张培震,邓起东,张竹琪,等.中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(10):1607-1620.
- [7] 中国地震局.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [8] 李典庆,肖特,曹子君,等.基于极限平衡法和有限元法的边坡协同式可靠度分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1004-1013.
- [9] 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.
- [10] 文光菊,邓文杰,杨乐,等.基于层次分析法的重庆山区矿山泥石流流势度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(2):92-96.
- [11] 蒋英礼,邓子胜.可拓层次-集对分析耦合模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 公路,2016,61(10):13-18.
- [12] 武运泊,王运生,曹文正.基于AHP-模糊综合评判的岩溶塌陷危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):43-48.
- [13] 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(增刊1):2627-2632.
- [14] 乔国文,王运生,杨新龙.冻融风化边坡岩体质量评价体系研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):515-522.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2015.

本文编辑:苗 变