

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.20

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的 岩质开挖边坡稳定性研究

穆成林¹, 裴向军², 裴 钻², 张 引², 习朝辉²

(1. 四川师范大学工学院, 四川 成都 610101;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 综合黔西地区层状岩质开挖边坡研究成果发现: 岩体结构特征是分析评价层状边坡变形失稳模式、机制和稳定性的重要基础。因此, 结合该地区层状边坡地质条件的差异性, 针对性地划分岩体结构类型对边坡的分析评价尤为重要。考虑地层岩性组合、地质构造、软弱夹层(结构面)因素, 系统地将边坡岩体结构类型分为 4 个大类(近水平-缓倾边坡岩体, 倾斜层状边坡岩体, 陡倾、直立、倒转层状岩体, 地质构造作用强烈或含有溶蚀洞穴、沟壑的边坡岩体)和 10 个亚类, 并针对相应类型的边坡进行工程地质综合评价, 分别阐述了失稳模式和机制。以边坡岩体结构类型为基础, 甄选影响开挖边坡稳定性的 6 个定性指标和 6 个定量指标; 对指标组合赋权, 用未确知测度理论对边坡进行稳定性预测评价, 建立了“岩体结构-指标组合赋权-未确知测度理论”的新评价体系。实例预测结果表明预测结果与实际情况具有较好的一致性, 说明该方法是一种可靠性高、科学合理的稳定性预测新方法, 可在相关工程领域中应用推广。

关键词: 层状边坡; 结构类型; 稳定性预测; 组合赋权; 未确知测度

中图分类号: U213.1⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0150-09

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

MU Chenglin¹, PEI Xiangjun², PEI Zuan², ZHANG Yin², XI Zhaohui²

(1. College of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on the investigation of excavated layered slopes in the Qianxi area, it was found that the structure characteristic of rock mass is the main determinant of instability mechanism and failure mode of layered slopes. Therefore, in combination with the differences of layered slopes in this area, it is particularly important to analyze the slopes by specifically classifying the rock masses. The structure of rock mass can be systematically divided into 4 categories and 10 sub-categories, considering the lithology combination of layers, geological structure and weak interlayer (structural surface) as factors, and for every type of rock mass, the engineering geological properties are evaluated, and the failure mode and mechanism are explicated. Based on the structure type of rock mass, 12 impactors, including 6 quantitative indexes and 6 qualitative factors, are selected for slope stability prediction using the uncertainty measure theory. A new evaluation system of “rock mass-indicator combination weighting-uncertainty measure theory” is proposed. This method is applied to

收稿日期: 2018-08-27; 修订日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“强震过程岩体非协调变形及动力扩容效应研究”(41572302)

第一作者: 穆成林(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事环境地质与工程地质教学与科研工作。E-mail: 283390229@qq.com

predict the stability of eight slopes, the prediction results are nicely conform to the actual situations. This method is highly reliable and can be used in practical slope engineering.

Keywords: layered slopes; structure types; stability prediction; combination weighting; unascertained measure

随着国家西部大开发和能源战略的深入推进,黔西地区的基础工程建设日益增多,其中层状岩质开挖边坡是最为常见的一项基础工程。层状岩质边坡在开挖过程中的变形失稳仍是亟待解决的问题,也是科学研究的重点和难点,其主要表现为:层状边坡的复杂岩体结构在差异性开挖条件下的变形失稳模式和机制具有多变性、多样性;边坡开挖前地质信息不完备导致传统稳定性预测结果出现较大偏差。

1993年,孙广忠教授^[1]提出了岩体结构控制论的观点,认为变形失稳是岩体结构系统的失稳,不仅是材料的变形,更多情况下是结构失稳。孙玉科等^[2]在岩质边坡稳定性分析中总结出“岩体结构分析的方法”,主张在边坡结构类型划分的基础上,以结构面与边坡的具体组合关系为依据分析边坡稳定性。

层状边坡岩体结构类型是控制变形失稳模式和机制的主要因素之一,是边坡评价的基础。Nicholson^[3]分析了开挖岩体边坡结构类型和破坏模式,采用岩体质量为主要指标的稳定性评价;殷跃平^[4]系统研究了三峡库区边坡结构类型,并对划分的5种典型边坡开挖前后变形破坏过程进行了研究;胡厚田等^[5]在详细考虑红层边坡岩体的特征之后,甄选了4个对岩体结构和边坡稳定性影响最大的因素作为划分依据,将红层边坡分类,提出岩体结构的工程地质评价;周德培等^[6]提出按坡体结构对边坡岩体进行分类,再由此建立计算分析模型进行岩质边坡的稳定性分析。

开挖岩质边坡的稳定性研究已有诸多成果。对于具体工程中边坡稳定性而言,已开挖边坡采用位移监测分析研究稳定性发展趋势较为理想,也实用可靠。非确定性分析方法在分析大量边坡稳定性中有明显优势。如,张军等^[7]基于云模型理论,选取影响边坡稳定性的11项指标,计算各指标隶属于不同岩质边坡稳定性等级的云模型数字特征,结合正向正态云模型和指标权重,计算待评估边坡的综合确定度,最终确定岩质边坡稳定性等级;李远松等^[8]针对公路高边坡研究甄选坡体结构和评价因素,然后采用专家主观赋权和模糊计算模型对边坡进行稳定性评价;赵建军等^[9]以汤口—屯溪高速公路44个典型边坡为研究对象,采用因子分析法,提出了边坡稳定性快速评价方法。以上

研究成果为甄选边坡稳定性影响指标以及对指标的定性定量分级提供了宝贵经验。如果在此基础上对坡体结构进行合理分类并采用改进的指标赋权方法,将使边坡评价结果更为准确、科学。

本文以具有不同岩体结构类型的层状边坡在差异性开挖条件下的变形失稳模式、机制和稳定性预测为研究重点,通过对黔西地区高速公路、高速铁路以及工程场地开挖的124处层状岩质边坡系统的工程地质调查、统计分析,将岩体结构划分为4个大类、10个亚类,甄选12个稳定性评价指标,提出一种新的层状岩质开挖边坡稳定性研究思路:以边坡岩体结构类型为基础,建立组合赋权-未确知测度理论稳定性评价方法。

1 层状边坡岩体结构类型与特征

1.1 区域地质环境概况

黔西地区在大地构造上位于上扬子地台滇东—黔中隆起东部,处于特提斯构造域和滨太平洋构造域的结合部位,特殊的大地构造位置决定了其必然受到两者的共同作用,燕山期强烈的褶皱和断裂变形尤其复杂^[10]。研究区边坡岩性主要为层状灰岩、白云岩、白云质灰岩、砂岩以及薄层状页岩、泥岩,且边坡岩体质量差异较大。

1.2 坡体结构类型划分主要因素

(1)岩性组合特征。岩性组合特征对边坡岩体的结构有重要影响^[5]。地层岩性及组合是一个边坡基本地质结构框架,决定着边坡演化规律。地层岩性不同组合形式对边坡的演化模式、速度、规模特征及稳定性影响较大。常见地层岩性组合形式为层状硬岩、层状硬岩夹软岩、层状软硬互层、层状软岩夹硬岩、层状软岩。

(2)地质构造特征。层状岩质边坡除了层面以外,由地质构造作用形成的结构面特征对边坡变形失稳影响较大。通常缓倾层状岩体发育两组以上垂直(陡倾)层面的结构面,发育密集程度和延伸规模直接决定岩体质量;此外,岩体中发育的小断层、层间错动带以及长大构造裂隙使得边坡在开挖后发生不同失稳模式。地质构造作用同样使得边坡坡体中存在差异的应力效应,边坡开挖后,应力释放、岩体卸荷作用等致使边坡岩体劣化,整体稳定性渐进降低。

(3) 软弱层(面)特征。层间软弱夹层(面)多为边坡变形失稳的滑移面(带),而其它裂隙软弱夹层(面)通常为变形失稳的侧边界或局部界面。软弱层(面)形成原因、空间的分布和延伸规律、力学效应及其与开挖边坡相对位置关系等是岩体类型中需考虑的重要因素^[11]。

1.3 坡体结构类型及特征

参考相应规范^[12-13]以及文献^[5,14],结合上述

层状岩质边坡结构类型划分主要因素,将黔西地区层状边坡坡体结构类型划分为4个大类、10个亚类(表1)。表中着重评价了各类型边坡工程地质特征,分析可能的失稳模式和形成机制,为进一步深入预测边坡稳定性打下了良好的基础。表1参考胡厚田等^[5]分类评价,有修改。

表1 层状边坡坡体结构类型与特征

Table 1 Rockmass structure styles and characteristics of the layered slopes

坡体结构类型	坡体结构亚类型	坡体结构特征	工程地质评价
I 类 近水平-缓倾边坡岩体 (倾角 < 20°)	I-I 亚类 巨块板柱状、块状灰岩、白云岩结构以及砂岩结构	发育两组近似正交的陡倾节理,延伸远,节理多张开,填充岩屑、泥质等夹层,层面间软弱夹层厚度较小,且具有不连续性	岩块强度较高,风化程度弱,易发生各种类型的崩塌、倾倒失稳;存在倾斜软弱夹层时,可能发生块体滑移失稳,边坡不高时稳定
	I-II 亚类 层状结构边坡,主要以灰岩、白云岩为主	发育两组近正交的陡倾节理,内部为层状,层面间有软弱夹层分布:一般为风化泥膜,每隔 3.5 ~ 5.0 m 存在厚度较大的泥质或泥夹岩屑等软弱夹层	高陡顺层边坡易发生沿软弱夹层顺层滑移,反向高边坡易发生坡表发生剥落和小型落石。该结构边坡多以滑体和滑面共同控制,坡体后缘拉裂缝以及侧缘的剪切、拉裂缝和滑面软化、剪切滑移演化过程较为一致
	II-I 亚类 顺坡层状边坡岩体结构	多发育两组以上的构造节理,层间错动面、层间软弱面、层间软弱夹层分布较多。边坡岩体稳定性受层间软弱面、层间软弱夹层及倾向临空面的结构面控制	层间软弱面的抗剪强度很低,层间软弱夹层的抗剪强度更低,对边坡稳定性起控制作用。构造节理特别是倾向临空面的缓倾节理,对边坡稳定性也起一定的控制作用。当边坡倾角大于岩层倾角时,易产生完全平面型顺层滑坡
II 类 倾斜层状边坡岩体(倾角 20° ~ 60°)	II-II 亚类 反倾层状含有层面和软弱夹层的岩体结构	多发育两组构造结构面,层间错动面和软弱夹层虽然发育,但倾向山里,对边坡稳定性不起控制作用	岩块呈较规则的六面体型,强度较大,抗风化能力强,软弱夹层为雨水下渗携带的黏土物质,但由于为反倾,故软弱夹层起不到控制性作用。这类边坡易发生风化剥落和块体落石,边坡整体稳定较好
	II-III 亚类 斜交、顺层层状岩体结构	多发育两组构造结构面,层间软弱面和层间软弱夹层及倾向临空的结构面对边坡岩体稳定起控制作用	层间软弱面和层间软弱夹,层与倾向临空的构造结构面组合,常形成楔形动、阶梯状滑动
	II-IV 亚类 斜交、反倾层状岩体结构	多发育两组构造结构面,层间错动面和软弱夹层较发育,但不起控制作用;倾向临空面的结构面控制边坡稳定	层间软弱面和层间软弱夹,层倾向山里,岩体较稳定。但受倾向临空的结构面控制,在倾向临空的结构面发育时,也可能产生楔形和阶梯形滑动
III 类 陡倾、直立、倒转层状岩体边坡(倾角 > 60°)	II-V 亚类 正交层状的岩体结构	多发育两组构造结构面,层间错动面、层间软弱夹层较发育,与边坡面正交,对边坡稳定不起控制作用	岩体一般较稳定,有风化剥落问题
	/	发育两组以上构造结构面,岩层弯曲、陡倾、直立或倒转,构造节理较发育。岩层面陡倾,一般倾角大于边坡倾角,对边坡稳定不起控制作用	高陡边坡易发生崩塌、落石或风化剥落,存在倾向临空面的缓倾节理时,可能滑塌。一般情况下开挖破面走向与岩层走向一致时,岩体稳定性较差
	IV-I 亚类 坡体在强烈的地质构造作用下,岩体结构碎裂,边坡处于构造影响区内	边坡岩体受地质构造作用较强,层面间发生剪切错动,岩层收到挤压、剪切以及揉皱等,层面产状变化幅度大,层间风化、泥化严重,节理发育,且无整体规律可循,岩体呈镶嵌、碎裂-散体状,风化严重,常存在小断层贯通整个坡体	边坡岩体风化严重,岩体质量较差,下雨渗透较好,在开挖完成初期坡面易发生降雨汇流后坡面冲刷侵蚀形成沟壑,同时局部发生坍塌,后期易在坡顶或马道部位产生拉裂缝,沿着层面或长大裂隙发生楔形、或不规则失稳破坏,最终形成大范围的关联性失稳破坏
IV 类 地质构造作用强烈的边坡岩体;或含有溶蚀洞穴、沟壑的边坡岩体	IV-II 亚类 坡体含有溶蚀洞穴、长大溶蚀沟壑,常呈串珠状、条带状分布	边坡岩体溶蚀作用明显,岩体含有溶蚀空洞,透水性好,较大的溶蚀洞穴或溶蚀沟壑常伴着长大裂隙和裂隙水演化形成,洞穴和沟壑内填充大量泥质物质	岩体风化严重,岩体质量较差,长大裂隙、溶蚀的洞穴和沟壑破坏了边坡岩体的整体结构性,边坡开挖后雨水易通过洞穴和沟壑、裂隙下渗,进一步溶蚀或软化边坡岩体,坡面沿着洞穴或沟壑产生拉裂缝,发生塌陷或滑移失稳

2 开挖层状边坡稳定性预测

边坡的稳定性预测主要是以坡体结构类型为基础,甄选影响边坡稳定性的控制性因素进行组合赋权,建立未确知测度评价模型。

2.1 组合赋权

以粗糙集改进层次分析法主观和熵值法客观权重形成的组合权的形式对边坡稳定性影响指标赋予权重,消除指标的差异性,使其符合真实情况。粗糙集改进层次分析法和熵值法的权重计算过程详见文献[15-19],不细阐述。

设粗糙集改进的层次分析法得到的权重为 w'_i , 熵值法计算得到的权重为 w''_i , 设两者的距离函数为 $d(w'_i, w''_i)$, 其表达式为:

$$d(w'_i, w''_i) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w'_i - w''_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

设组合权重为 w_i , 则表达式为:

$$w_i = \alpha w'_i + \beta w''_i \quad (2)$$

其中, α, β 为分配系数, 其约束条件如下:

$$d(w'_i, w''_i)^2 = (\alpha - \beta)^2 \quad (3)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (4)$$

2.2 未确知测度模型

(1) 模型理论

假设被评价的边坡有 n 个, 则待评价的边坡可以用空间向量集表示为: $R = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}$ 。而对于每个待评价的边坡 $R_i (i=1, 2, \dots, n)$ 有 m 个单项评价指标空间: $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 。如果 X_{ij} 代表边坡 R_i 的第 j 个评价指标的测量值, 那么 $R_i = \{R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, \dots, R_{im}\}$ 。设每个指标 X_{ij} 都有 p 个评价等级, 即评价空间向量表示为: $U = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_p\}$, 并且设 $C_k (k=1, 2, \dots, p)$ 为第 k 级评价等级, k 级比 $k+1$ 级的稳定性差, 记作 $C_k > C_{k+1}$, 若满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 则称 $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_p\}$ 为评价空间 U 的一个有序分割类^[16]。

(2) 单指标测度评价矩阵

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设 $\mu_{ijk} = \mu(X_{ij} \in C_k)$ 表示测量值 X_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 若 μ 满足 $0 \leq \mu(X_{ij} \in C_k) \leq 1$,

且同时满足可加性和归一性准则, 则称 μ 为未确知测度, 简称测度。矩阵 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标测度评价矩阵。

(3) 多指标综合测度评价矩阵

令 $\mu_{ik} = \mu(R_i \in C_k)$ 表示边坡 R_i 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 则:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m \mu_{ijk} w_j \quad (6)$$

其中 $(i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p)$, w_j 为评价指标 X_j 在体系中所占的权重。多指标综合测度评价矩阵可表述为:

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(4) 置信度识别准则分析

采用置信度识别准则对待评价边坡进行稳定性等级预测。

若评价的空间 U 有序, 且 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$, 设 λ 为置信度 (常取 $\lambda \geq 0.5$), 则有式(8):

$$k_0 = \min \{k: \sum_{i=1}^k \mu_i \geq \lambda, k=1, 2, \dots, p\} \quad (8)$$

可以确定边坡 R_i 的稳定性属于第 k_0 个评价等级 C_{k_0} 。

2.3 评价体系 and 等级划分

开挖边坡稳定性指标涉及广泛且复杂, 评价系统应具有系统全面、简单灵活、相对独立等特点, 故选取指标应遵循以下原则: ①科学性、目的性; ②宏观性、实用性; ③协调性、相对独立性。

(1) 评价体系

以表1为基础, 甄选影响边坡稳定性的主要因素为6个定性指标和6个定量指标(X_i), 见表2~3。

(2) 等级划分

将评价指标进行按稳定性进行等级划分及取值, 评价集为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 依次代表边坡的稳定性: (I级)极稳定、稳定(II级)、一般稳定(III级)、不稳定(IV级)、极不稳定(V级), 见表2~3。

2.4 构建单指标测度函数

根据上述单指标测度函数的定义和表2~3构建的单指标测度函数, 求得各评价指标的测度值。其各自的单指标测度函数见图1~2。

表 2 层状边坡类型和指标评价等级

Table 2 Types and influence indices grading standards of the layered slopes

坡体结构类型	指 标		单指标稳定性分级标准				
			I 级 (C ₁)	II 级 (C ₂)	III 级 (C ₃)	IV 级 (C ₄)	V 级 (C ₅)
近水平-缓倾边坡岩体(倾角 < 20°)	边坡开挖高度/m	X1-1	[0,35)	[35,50)	[50,65)	[65,80)	≥ 80
	开挖坡度/(°)	X1-2	[0,15)	[15,30)	[30,40)	[40,55)	≥ 55
倾斜层状边坡岩体(倾角 20°~60°)	边坡开挖高度/m	X2-1	[0,25)	[25,40)	[40,55)	[55,65)	≥ 65
	开挖坡脚/(°)	X2-2	[0,20)	[20,35)	[35,50)	[50,60)	≥ 60
陡倾、直立层状边坡岩体(倾角 > 60°)	边坡开挖高度/m	X3-1	[0,20)	[20,35)	[35,45)	[45,55)	≥ 55
	开挖坡度/(°)	X3-2	[0,30)	[30,40)	[40,55)	[55,65)	≥ 65
构造作用强烈、含有溶蚀的层状边坡	边坡开挖高度/m	X4-1	[0,15)	[15,30)	[30,40)	[40,55)	≥ 55
	开挖坡度/(°)	X4-2	[0,15)	[15,30)	[30,40)	[40,50)	≥ 50

表 3 层状边坡稳定性影响指标和评价等级

Table 3 Influence index and grading standards of the layered slopes

指 标		单指标稳定性分级标准				
		I 级 (C ₁)	II 级 (C ₂)	III 级 (C ₃)	IV 级 (C ₄)	V 级 (C ₅)
岩石抗压强度/MPa	X5	>180	(100,180]	(60,100]	(20,60]	≤20
岩层组合	X6	硬岩(5)	硬岩夹软岩(4)	软硬互层(3)	软岩夹硬岩(2)	软岩(1)
岩体结构类型	X7	整体层状(5)	层状块体(4)	层状镶嵌(3)	层状碎裂(2)	层状散块体(1)
单次过程降雨量/mm	X8	[0,50)	[50,100)	[100,160)	[160,250)	≥250
岩层倾向与坡向夹角/(°)	X9	(150,180]	(110,150]	(70,110]	(30,70]	[0,30]
软弱夹层(结构面)	X10	层间剪切形成,密实,强度高,无遇水条件,不软化,不形成底滑面;无软弱夹层或结构面(5)	层间剪切形成,较密实,强度较高,不易遇水和软化,不易形成底滑面;或软弱夹层连续性较差(4)	层间剪切形成为主,局部为填充,密实一般,强度中等,具备遇水和软化条件,具备形成底滑面(3)	层间剪切和填充形成,强度较低,遇水软化,形成底滑面(2)	后期黏土颗粒填充为主,分布层间和裂隙部位,强度低,遇水条件好,软化快,形成底滑面或侧面(1)
地下水特征	X11	干燥(5)	潮湿(4)	湿润(3)	滤水(2)	涌水(1)
原始与开挖坡度差/(°)	X12	<6	[6,15)	[15,25)	[25,40)	≥40
坡体雨水下渗特征	X13	差(5)	较差(4)	一般(3)	较好(2)	好(1)
开挖扰动特征	X14	无(5)	轻微(4)	一般(3)	较强(2)	强烈(1)

注:X₉按岩层倾向与坡面倾向在同一水平面上垂直法线投影的最小夹角原则取值,取值范围0~180°。

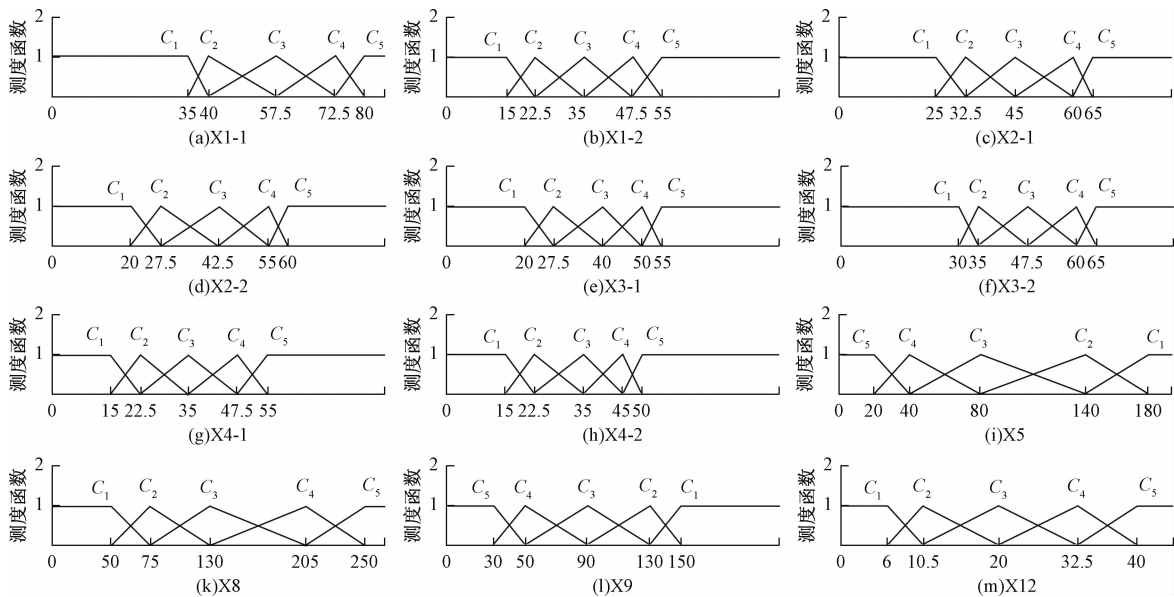


图 1 定量指标测度函数

Fig.1 Measurement function of quantitative indicators

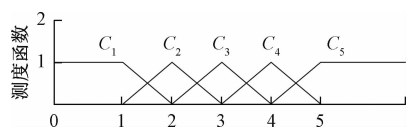


图 2 定性指标测度函数 (X6, X7, X10, X11, X13, X14)

Fig.2 Measurement function of qualitative indicators
(X6, X7, X10, X11, X13 and X14)

3 工程实例应用

3.1 开挖边坡工程地质概况

以边坡(编号 P1)为例:边坡上覆 0.5~1.0 m 第四系残坡积层(Q_4^{el+dl}),下伏三叠系关岭组(T_2g^3)泥质白云岩夹薄层页岩、泥岩。岩层产状为 $356^\circ\angle 24^\circ$,层厚度 15~35 cm 不等,含有 3 组优势节理: $28^\circ\angle 75^\circ$ 、 $198^\circ\angle 79^\circ$ 、 $318^\circ\angle 88^\circ$,节理间距 15~60 cm 不等,呈微张-张开状态。边坡原始地形为坡度 $16^\circ\sim 18^\circ$ 、前部较陡、后部较缓的顺层斜坡。边坡岩体呈层状镶嵌状,部分节理面表层风化以及雨水下渗携带泥质物质,含有少量泥质填充。层间软弱夹层由薄层页岩、泥岩在构造错动作用下而形成,厚度为 0.5~2.5 cm,遇水易软化。

该边坡设计为采用爆破机械由上及下逐级开挖,每级高度为 10.0 m,坡比为 1:1.0,坡向为正北,边坡总高度为 58.6 m。据多年降雨统计,施工期间单过程降雨量平均为 52.0~57.0 mm。

3.2 开挖边坡稳定性预测

(1) 岩体结构类型及特征分析

工程地质评价:对照表 1,P1 边坡结构属于 II 类 (II-I 亚类)顺层岩质边坡。根据岩层倾角 24° ,设计开挖坡度 45° 和高度 50 m,层间含有软弱夹层且易遇水软化等方面的特征分析:边坡在降雨工况下,稳定性较差,易发生沿层间软弱夹层的滑移-拉裂模式失稳破坏。

(2) 组合赋权-未确知测度预测

以上述粗糙集层次分析法主观权重、熵值法客观权重分析理论为基础,通过式(1)~(4),计算实验 P1 边坡指标的组合权重值结果见表 4。

根据单指标测度函数定义,结合表 1、图 1~2,构建单指标测度函数矩阵:

$$(\mu_{1ij})_{12\times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0 & 0.80 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0.58 & 0.417 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.81 & 0.19 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.52 & 0.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合式(9)单指标测度矩阵及公式(6)~(8),求得 P1 边坡多指标测度评价向量: $\{0.081\ 4, 0.115\ 0, 0.391\ 8, 0.314\ 3, 0.097\ 4\}$ 。取 $\lambda = 0.5$,从大到小: $0.081\ 4 + 0.115\ 0 + 0.391\ 8 = 0.588\ 3 > \lambda = 0.5$,则判定 P1 边坡稳定性等级为 C_3 ;按从小到大: $0.097\ 4 + 0.314\ 3 + 0.391\ 8 = 0.803\ 5 > \lambda = 0.5$,同样判定 P1 边坡稳定性等级为 C_3 。

表 4 影响指标组合赋权值

Table 4 Combined weight of influence indicators					
X_i	w'_i	w''_i	α	β	W_i
X 高度	0.131	0.128	0.458	0.542	0.129 4
X 坡度	0.111	0.098	0.458	0.542	0.104 0
X5	0.057	0.065	0.458	0.542	0.061 3
X6	0.067	0.072	0.458	0.542	0.069 7
X7	0.091	0.085	0.458	0.542	0.087 7
X8	0.063	0.064	0.458	0.542	0.063 5
X9	0.085	0.071	0.458	0.542	0.077 4
X10	0.093	0.088	0.458	0.542	0.090 3
X11	0.089	0.088	0.458	0.542	0.088 5
X12	0.084	0.075	0.458	0.542	0.079 1
X13	0.068	0.088	0.458	0.542	0.078 8
X14	0.061	0.078	0.458	0.542	0.070 2

(3) P1 边坡变形失稳过程

边坡于 2014 年 10 月 28 日开始进行爆破施工。2014 年 12 月 10 日形成高度约 44.4 m 的边坡。在经历单程降雨(54.6 mm)后,边坡于 20 日发现开始发生变形:首先在四级台阶下方顺坡面 3.4 m 部位沿层间软弱夹层剪出,坡表出现拉裂缝。随着时间的推移,拉裂缝由下及上逐级出现,失稳边坡最终形态呈簸箕状。变形发生后在坡脚回填反压大量碎石进行坡脚反压防护,直至 2015 年 2 月 15 日后变形暂时稳定,见图 3。

3.3 其它边坡稳定性预测

(1)以现场调查为基础,室内外岩土体力学实验

为依据,拟开挖 8 个边坡指标评价取值见表 5;稳定性预测结果见表 6。

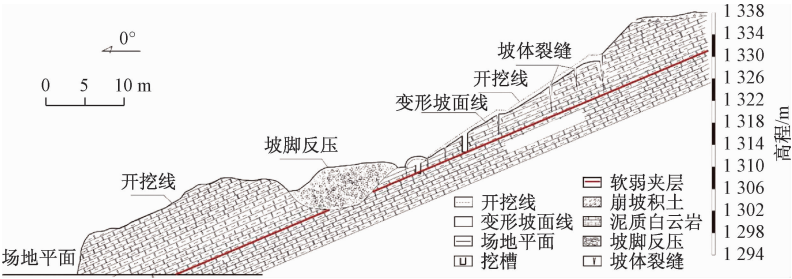


图 3 P1 边坡工程地质剖面图

Fig.3 Schematic engineering geological profile of the P1 slope

表 5 层状边坡稳定性影响指标和取值

Table 5 Influence index and the values of the layered slopes

边坡 编号	边坡指标及相应取值										
	/	/	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
P1	X2-1:58.6	X2-2:45.0	115.0	3	3	54.6	4	3	4	21.0	2
P2	X4-1:42.5	X4-2:38.6	52.5	2	2	54.6	46	2	3	20.0	3
P3	X2-1:52.3	X2-2:45.0	76.0	3	3	50.9	8	2	3	27.5	3
P4	X2-1:66.3	X2-2:53.0	143.0	4	4	50.9	22	4	4	32.0	4
P5	X3-1:78.4	X3-2:53.0	186.0	5	5	50.9	38	5	4	16.0	4
P6	X2-1:56.7	X2-2:45.0	88.4	3	3	54.1	106	3	3	27.0	3
P7	X2-1:54.9	X2-1:45.0	62.2	2	2	54.1	12	2	3	36.0	2
P8	X2-1:67.5	X2-1:53.0	138.6	4	4	45.2	160	4	4	30.0	4

表 6 层状边坡稳定性预测等级

Table 6 Grading standards of stability of the layered slopes

边坡 编号	边坡稳定性等级					工程地质评价	本文 评价	模糊 评价 ^[20]
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅			
P1	0.081 4	0.115 0	0.391 8	0.314 3	0.097 4	Ⅱ类(Ⅱ-I亚类)顺层边坡,稳定性一般,在降雨作用下,稳定性较差,易发生沿层间结构面或软弱夹层滑移-拉裂失稳破坏	C ₃	Ⅲ级
P2	0.068 5	0.135 5	0.284 6	0.342 6	0.237 3	Ⅳ类(Ⅳ-I亚类)斜交边坡,岩体碎裂,风化较强,软弱结构面发育,充填泥质和岩屑,稳定性较差,易发生楔形体滑移失稳	C ₄	Ⅳ级
P3	0.106 2	0.220 9	0.327 7	0.237 1	0.108 1	Ⅱ类(Ⅱ-I亚类)顺层边坡,岩体风化,碎裂状,结构面发育,层间软弱夹层遇水软化,稳定性较差,易发生沿层面滑移失稳	C ₄	Ⅲ级
P4	0.233 2	0.410 3	0.145 7	0.111 2	0.099 6	Ⅱ类(Ⅱ-I亚类)顺层边坡,小角度斜交,岩体成块状,层面表层风化,遇水强度降低,整体稳定性较好,局部可能滑移掉块	C ₂	Ⅱ级
P5	0.567 2	0.257 3	0.114 8	0.033 5	0.027 2	Ⅲ类边坡,岩层倾角较陡,但岩体完整性较好,强度高,结构面无填充,节理不发育,整体稳定性好,不发生变形失稳	C ₁	Ⅰ级
P6	0.255 1	0.384 7	0.201 0	0.159 2	0	Ⅱ类(Ⅱ-Ⅳ亚类)反倾斜交边坡,岩体呈块状,结构面少量填充,层间岩体表层风化,但整体稳定性较好,不易发生变形失稳	C ₂	Ⅱ级
P7	0.156 4	0.236 2	0.310 7	0.180 6	0.116 1	Ⅱ类(Ⅱ-I亚类)顺层边坡,层状镶嵌结构,结构面发育,层间软弱夹层遇水软化,稳定性一般,降雨易发生沿层面滑移失稳	C ₃	Ⅱ级
P8	0.614 6	0.184 3	0.093 6	0.062 2	0.045 3	Ⅱ类(Ⅱ-V亚类)反倾边坡,岩体完整性较好,结构面表层存在风化层,但强度较高,无明显软弱结构面,整体稳定性好	C ₁	Ⅰ级

(2)边坡的过程地质评价与本文的稳定性预测结果一致,但与模糊评价结果(边坡 P3、P7)存在差异。经过边坡开挖后监测、调查表明本文评价结果与实际相符。反复分析后,认为模糊评价等级较高的原因是未充分、客观考虑边坡岩体结构特征对稳定性的影响。

4 结论

(1)通过对黔西南地区大量层状岩质开挖边坡的调查,主要按岩层倾角将岩体结构类型划分为 4 个大类、10 个亚类型,并针对相应类型边坡进行工程地质

综合评价,阐述了失稳模式和机制。

(2)以层状边坡岩体结构类型为基础,选定12个边坡稳定性的影响指标,包括6个定性指标和6个定量指标。建立单指标测度函数,采用组合赋权值构建多指标测度矩阵,并将边坡稳定性分为5个等级,利用置信度对边坡稳定性进行识别,建立层状边坡稳定性分级的未确知测度评价模型。

(3)对8个层状边坡进行工程地质评价,采用构建的预测模型进行验证,并与模糊评价结果比较,结果表明:本文稳定性评价模型科学合理,准确度较高,评价结果与实际情况一致,计算过程相对简单易懂,可以在实际生产中指导施工、支护等工程。

(4)将未确知数学理论应用到层状开挖边坡稳定性预测中,构建稳定性的未确知测度模型,能够得出实际工程各边坡稳定性的等级,这丰富了边坡稳定性分级的预测方法,具有一定的应用意义。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14-18. [SUN G Z. On the theory of structure-control rockmass [J]. Journal of Engineering Geology, 1993, 1(1): 14-18. (in Chinese)]
- [2] 孙玉科, 牟会宠, 姚宝魁. 边坡岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988. [SUN Y K, MU H C, YAO B K. Slope stability analysis [M]. Beijing: The Science Publishing Company, 1988. (in Chinese)]
- [3] NICHOLSON D T. Hazard assessment for progressive, weathering-related breakdown of excavated rock slopes [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 2004, 37(4): 327-346.
- [4] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145-154. [YIN Y P. Human-cutting slope structure and failure pattern at the three gorges reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145-154. (in Chinese)]
- [5] 胡厚田, 赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 689-694. [HU H T, ZHAO X Y. Studies on rockmass structure in slope of red bed in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 689-694. (in Chinese)]
- [6] 周德培, 钟卫, 杨涛. 基于坡体结构的岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 687-695. [ZHOU D P, ZHONG W, YANG T. Stability analysis of rocky slope based on slope structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 687-695. (in Chinese)]
- [7] 张军, 陈征宙, 刘登峰. 基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 44-50. [ZHANG J, CHEN Z Y, LIU D F. Stability evaluation of a rock slope based on the cloud model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 44-50. (in Chinese)]
- [8] 李元松, 高晖, 陈峰, 等. 乌尉高速公路边坡稳定性综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 150-156. [LI Y S, GAO H, CHEN F, et al. Comprehensive assessment of slope stability in Wu-Yu highway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 150-156. (in Chinese)]
- [9] 赵建军, 贺宇航, 黄润秋, 等. 基于因子分析法的边坡稳定性评价指标权重[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 325-330. [ZHAO J J, HE Y H, HUANG R Q, et al. Weights of slope stability evaluation indexes based on factor analysis method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 325-330. (in Chinese)]
- [10] 窦新钊, 姜波, 张文永, 等. 黔西地区构造变形特征及其煤层气地质意义[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(8): 54-59. [DOU X Z, JIANG B, ZHANG W Y, et al. Structural deformation features and its CBM geological significance in Western Guizhou [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(8): 54-59. (in Chinese)]
- [11] 穆成林, 裴向军, 黄润秋, 等. 含不连续软弱夹层顺层边坡破坏机制与稳定性分析[J]. 公路, 2016, 61(7): 50-58. [MU C L, PEI X J, HUANG R Q, et al. Analysis on the failure mechanism and stability of contained non-continuous weak interlayers bedding slope [J]. Highway, 2016, 61(7): 50-58. (in Chinese)]
- [12] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范(2009年版): GB 50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)]
- [14] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2014, 34(6): 1695-1702. [ZHANG S Y, TAN Y S, WANG

- C, *et al.* Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 34 (6): 1695 – 1702. (in Chinese)]
- [15] SAATY THOMAS L. Applications of analytical hierarchies [J]. *Mathematics and Computers inSimulation*, 1979, 21(1): 1 – 20.
- [16] PAWLAK ZDZISLAW. Rough classification [J]. *International Journal of Man-machine Studies*, 1984, 20(5): 469 – 483.
- [17] 王广月, 崔海丽, 李倩. 基于粗糙集理论的边坡稳定性评价中因素权重确定方法的研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2418 – 2422. [WANG G Y, CUI H L, LI Q. Study on the weight determination of factors in the evaluation of slopes stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2418 – 2422. (in Chinese)]
- [18] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831 – 836. [ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, *et al.* Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831 – 836. (in Chinese)]
- [19] 穆成林, 黄润秋, 裴向军, 等. 基于组合赋权 – 未确知测度理论的围岩稳定性评价[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 1057 – 1063. [MU C L, HUANG R Q, PEI X J, *et al.* Evaluation of rock stability based on combined weighting-unascertained measurement theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 1057 – 1063. (in Chinese)]
- [20] 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验. 贵州黔西地区地质灾害发育特征及稳定性评价研究[R]. 成都: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验, 2016. [State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology. Study on the development characteristics and stability evaluation of geological hazards in Qianxi area, Guizhou [R]. Chengdu: State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, 2016. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

~~~~~  
(上接第 141 页)

- [15] 田洋, 赵小明, 牛志军, 等. 鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 590 – 599. [TIAN Y, ZHAO X M, NIU Z J, *et al.* Petrogenesis and sedimentary environment of Permian Wujiaping formation siliceous rocks in Lichuan, Southwestern Hubei [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 590 – 599. (in Chinese) ]
- [16] 李振嵩. 硅碱活性碳酸盐岩开挖骨料试验分析及应用 [J]. *人民珠江*, 2018, 39(4): 85 – 88. [LI Z S. Test analysis and application of carbonatite excavation aggregates with Alkali-Silica reactivity [J]. *Pearl River*, 2018, 39(4): 85 – 88. (in Chinese) ]
- [17] 中华人民共和国地质矿产部. 大地电磁测法技术规程: DZ/T0173-1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. [Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China. Technical specification for magnetotelluric survey: DZ/T0173-1997 [S]. Beijing: China Standard Press, 1997. (in Chinese) ]
- [18] 文江泉, 韩会增. 膨胀岩的判别与分类初探 [J]. *铁路工程学报*, 1996(2): 231 – 236. [WEN J Q, HAN H Z. Preliminary study of distinguishing and classifying on swell rock [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1996(2): 231 – 236. (in Chinese) ]
- [19] 孙小明, 武雄, 何满朝, 等. 强膨胀性软岩的判别与分级标准 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 128 – 132. [SUN X M, WU X, HE M C, *et al.* Differentiation and grade criterion of strong swelling soft rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 128 – 132. (in Chinese) ]
- [20] 吴光, 赵志明, 王金淑, 等. 一种岩体膨胀应力测试仪: 中国, ZL201720378268.8 [P]. 2017 – 04 – 12. [WU G, ZHAO Z M, WANG J S, *et al.* The utility model relates to a rock mass expansion stress testing instrument. China, ZL201720378268.8 [P]. 2017 – 04 – 12. (in Chinese) ]
- [21] 王炳忠, 王起才, 张戎令, 等. 上覆荷载和厚度对原状膨胀土膨胀量的影响分析 [J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(2): 72 – 75. [WANG B Z, WANG Q C, ZHANG R L, *et al.* The effect of upper load and thickness on the expansion of undisturbed expansive soil [J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(2): 72 – 75. (in Chinese) ]

编辑: 张明霞