

福建高速公路边坡岩土体质量评价方法

张菊连¹, 沈明荣^{1,2}

(1. 同济大学 土木学院, 200092 上海, happy_zhangjulian@yahoo.com.cn;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 200092 上海)

摘 要: 福建省高速公路边坡上部为土下部为岩, 整体稳定状态良好, 为对在开挖后及支护前后出现局部滑塌现象的岩土边坡进行快速、准确的稳定性评价, 基于极限平衡法, 提出一种适合于岩土边坡岩土体质量评价的方法, 首次综合岩和土的质量评价方法对边坡稳定性进行分析, 扩充了边坡岩体分级的范畴. 用该法评价福建省7条高速公路的102个边坡, 结果与实际情况非常吻合, 证明了该方法的合理性和准确性. 岩土体边坡的质量评价方法丰富了边坡稳定性评价理论体系, 为岩土边坡的稳定性评价提供了一种新的途径.

关键词: 岩土边坡; 滑塌; 岩土体质量评价; 边坡稳定分析

中图分类号: U214.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)10-0113-06

A soil and rock mass quality estimation method for Fujian highway slopes

ZHANG Ju-lian¹, SHEN Ming-rong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China, happy_zhangjulian@yahoo.com.cn; 2. Key

Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

Abstract: To rapidly and accurately assess the stability of Fujian highway slopes whose tops are composed of soil and foots are of rock, and the partial sliding phenomenon after excavation or after and before support, based on limit equilibrium method, this paper presents a soil and rock mass quality estimation method. For the first time, the soil and rock mass quality estimation were put together to evaluate the slope stability, which expanded the scope of rock mass classification system. One hundred and two slopes along seven highways in Fujian province were used to verify the suitability and accuracy of this method. The soil and rock mass quality estimation method enriches the theoretical system of slope stability, and provides a new approach to the stability assessment of soil and rock slopes.

Key words: soil and rock slope; sliding; rock and soil quality estimation; slope stability analysis

边坡岩体分级是一种边坡岩体稳定性的评价方法, 能在勘察初期结合少量的室内及现场试验对边坡稳定情况进行宏观把握, 为工程师设计加固方案提供参考. 目前在边坡工程方面主要存在如下岩体分级方法: (1) 通用岩体分级方法, 如岩体分级^[1]系统、国家岩体分级标准 BQ 等; (2) 基于地下工程分级系统修正用于边坡的岩体分级方法, 如边坡岩体分级 SMR^[2-3]系统、西南山区高

等级公路边坡岩体分级^[4]法、天山公路边坡岩体分级^[5]法及采矿岩体分级^[6]法等; (3) 源于边坡的分级系统, 如国内的一些定性分级(建筑边坡工程规范岩质边坡岩体分类^[7]和水利水电工程边坡设计规范边坡岩体分类等)及国外的边坡稳定性概率分级 SSPC^[8-9]法、自然边坡分级^[10]法及公路开挖边坡岩体分级方法^[11-12]等. 边坡岩体分级方法是一种快速、经济、实用的边坡稳定评价方法, 对于边坡数量多、且对边坡不够重视的公路工程的边坡稳定性评价是合适的. 然而该法是以岩体为评价对象, 并不适合岩土边坡. 在岩质边坡中, 当结构面较为发育且组合不利, 或岩体风化较为强烈时, 开挖后, 坡率或加固措施设计不当将会

收稿日期: 2010-03-30.

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(B308).

作者简介: 张菊连(1984—), 女, 博士研究生;

沈明荣(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

出现岩体崩塌或滑塌的现象;同样的,岩土边坡在降水或坡率设计不当等情况下也会出现土层的局部崩塌或滑塌. 基于此,将边坡土体看成是极度风化的岩体进行质量评价,与岩体分级一起并称为岩土体质量分级方法.

本文针对福建省高速公路边坡的特点,基于极限平衡法,提出了一种适合于福建省岩土边坡的质量评价(分级)方法. 首次综合岩和土的质量评价方法,将边坡岩体分级扩展到岩土边坡中. 用福建省 7 条高速公路的 102 个边坡对该法进行了验证,计算结果与实际情况非常吻合,说明了该法的合理性及准确性. 岩土体质量分级方法获得的岩土体质量能反映边坡的局部稳定情况,并对边坡整体稳定性有所体现,计算过程简单、快捷. 因此,岩土体质量分级方法可在公路边坡中得到推广运用.

1 岩土体质量与边坡稳定的关系

针对福建省高速公路边坡,调查了 7 条高速公路的 13 个标段的 102 个边坡的 152 个剖面岩土层的出露情况,结果显示:调查边坡主要岩土层为砂土状强风化岩、碎块状强风化岩、坡积亚黏土、弱风化岩、全风化岩、残积砂质黏性土、坡积粉质黏土、残积黏性土,因此,边坡的稳定性主要取决于该 8 种岩土体的物理、力学性质及组合相关特征. 为了建立合适的岩土体质量分级方法,需对这些岩土层赋予合理分值. 由于分值最终要服务于边坡稳定性评价,通过分析不同岩土层对边坡稳定性贡献的相对大小来确定分值是合理的.

1.1 土类质量与边坡稳定性的关系

坡积黏性土、坡积粉质黏土、残积砂质黏性土、全风化岩和砂土状强风化岩的破坏机理与土质边坡相同:沿着某个最先达到极限平衡的圆弧面发生破坏或沿着两个土层的分界面发生破坏. 由于福建省地处丰雨地带,大部分边坡开挖后在雨水的长期淋滤作用下,在坡面附近容易产生一个近于竖直的拉裂面(图 1),后在土体自质量的作用下沿下部岩土层界面发生滑塌. 安全系数根据极限平衡原理可由式(1)得到.

$$F_{s_j} = \frac{G_j \cos \beta_j \tan \varphi_j + c_j l_j}{G_j \sin \beta_j} = \frac{\gamma_j h_j l_j \cos \beta_j \tan \varphi_j + c_j l_j}{\gamma_j h_j l_j \sin \beta_j} \quad (1)$$

式中: G_j 、 γ_j 、 c_j 、 φ_j 分别为第 j 岩土层滑动体的重力、重度和滑动体下部接触面的抗剪强度; h_j 、 l_j 为第 j 岩土层的厚度和破坏面底部的长度; β_j 为第 j 岩土层的倾角. 通过变换,可得

$$F_{s_j} = \left(\frac{1}{\tan \beta_j} \right) \tan \varphi_j + \left(\frac{1}{h_j \sin \beta_j} \right) \frac{c_j}{\gamma_j} = m \tan \varphi_j + n \frac{c_j}{\gamma_j} \quad (2)$$

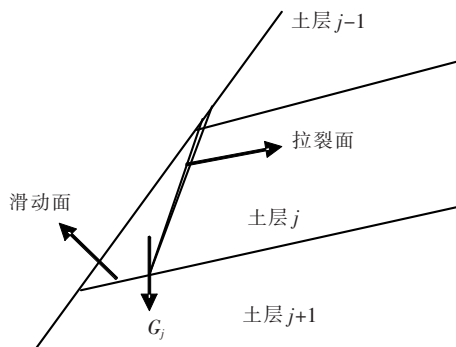


图 1 岩土层沿接触面破坏示意图

式中: $m = \frac{1}{\tan \beta_j}$ 、 $n = \frac{1}{h_j \sin \beta_j}$ 是只与岩土层几何形状相关的参数. 从式(2)可以看出,安全系数与 $\tan \varphi_j$ 和 $\frac{c_j}{\gamma_j}$ 线性相关,可通过各岩土层之间 $\tan \varphi_j$ 和 $\frac{c_j}{\gamma_j}$ 组合的比较来确定岩土体对边坡稳定性贡献的相对大小.

$\tan \varphi_j$ 和 $\frac{c_j}{\gamma_j}$ 是按照某种组合线性关系来决定边坡稳定性,然而两者系数不同将得到不同的安全系数. 本研究不打算再利用极限平衡法来推求系数的大小,因为这样做一是工作量非常大,二是并未达到本文用岩土质量分级来评价边坡稳定性的原意. 具体做法是采用统计学原理来推求系数的大致范围,用均值作为 $\tan \varphi_j$ 和 $\frac{c_j}{\gamma_j}$ 两者的系数. 假设第 j 层土的经验分值为 r_{E_j} (式(3)),系数 m_j 、 n_j 可由第 j 岩土层的倾角和厚度按式(4)和(5)得到.

$$r_{E_j} = m_j \tan \varphi_j + n_j \frac{c_j}{\gamma_j} \quad (3)$$

$$m_j = \frac{1}{\tan \beta_j} \quad (4)$$

$$n_j = \frac{1}{h_j \sin \beta_j} \quad (5)$$

根据测量的 152 个边坡剖面的各土层厚度、倾角,取均值代入式(4)、(5)便得到各土层经验分值公式(式(6)~(10)).

坡积亚黏土:

$$r_{E_1} = 4.78 \tan \varphi_1 + 3.1 \frac{c_1}{\gamma_1} \quad (6)$$

坡积粉质黏土:

$$r_{E_2} = 3.01 \tan \varphi_2 + 2.40 \frac{c_2}{\gamma_2}, \tag{7}$$

残积黏性土:

$$r_{E_3} = 4.70 \tan \varphi_3 + 1.54 \frac{c_3}{\gamma_3}, \tag{8}$$

残积砂质黏性土:

$$r_{E_4} = 3.73 \tan \varphi_4 + 1.13 \frac{c_4}{\gamma_4}, \tag{9}$$

全风化岩:

$$r_{E_5} = 4.13 \tan \varphi_5 + 1.6 \frac{c_5}{\gamma_5}. \tag{10}$$

将岩土层的抗剪强度参数及重度代入上述式子即可得各种土层的经验分值.统计了 7 条公路的物理、力学参数,得到各土层的重度和抗剪强度的均值,代入式(6)~(10)便可得最终经验分值 r_E (表 1).

表 1 4 种岩土体的重度和抗剪强度统计值

岩土名称	湿重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角正切		r_E
	u	σ	u	σ	u	σ	
坡积亚黏土	17.84	0.65	27.54	8.27	0.37	0.10	6.55
坡积粉质黏土	17.43	1.50	31.35	13.61	0.37	0.13	5.43
残积黏性土	17.69	0.94	29.80	8.86	0.39	0.13	4.43
残积砂质黏性土	17.42	2.87	22.17	7.83	0.58	0.47	3.60

其中 u 为均值, σ 为标准差.

从表 1 可以看出,各土层的湿重度和抗剪强度相差不大,且两土层之间的物理、力学特性都是渐变的,因此,使用土层内部的湿重度和抗剪强度替代两土层分界面的湿重度和抗剪强度,并按照式(6)~(9)计算经验分值不会引起较大误差.从经验分值 r_E 可以看出,4 种土层对边坡稳定性的贡献相对大小为坡积亚黏土>坡积粉质黏土>残积黏性土>残积砂质黏性土.为便于现场记忆和计算,4 种土的分值见表 2.

表 2 土体在边坡稳定性中的贡献分值

土层名称	坡积亚黏土	坡积粉质黏土	残积黏性土	残积砂质黏性土
r_E	6.5	5.5	4.5	3.5

全风化岩性质类似于土,因此,参照土的原则来计算经验分值.表 3 给出了多种全风化岩的经验分值.可以看出:绝大多数全风化岩的经验分值都介于 3.5~4.5,其对边坡稳定性的贡献介于残积砂质黏性土和残积黏性土之间.

1.2 各种风化岩质量与边坡稳定性的关系

一般来说,新鲜岩块的单轴抗压强度越高及岩体节理裂隙越不发育,岩体质量及对应分值应

越高,因此,可从岩石强度及完整性两方面来分析岩体质量得分.

在岩石强度方面,参考著名的岩体分级 RMR 法,按微风化岩(指不带裂隙的微风化岩块;因为没有新鲜岩块资料,采用微风化岩块强度)的饱和单轴抗压强度进行分级,并采用其评分比率,同时考虑将全风化岩评分控制在 3.5~4.5 反算各级别赋分(表 4).

表 3 多种岩体全风化岩的经验分值

岩土名称	湿重度 kN·m ⁻³	黏聚力 kPa	内摩擦角 正切	r_E
全风化晶屑熔结凝灰岩	17.800	21.72	0.35	3.40
全风化糜棱岩化花岗岩	19.500	25.90	0.34	3.53
全风化二长花岗岩	19.500	24.00	0.53	4.16
全风化凝灰熔岩	17.500	29.55	0.37	4.23
全风化糜棱岩化花岗岩、 全风化辉绿岩、全风化黑云母 花岗岩、全风化二长花岗岩、 全风化状变质砂岩	19.500	25.00	0.58	4.45
全风化花岗岩	18.425	25.00	0.47	4.11
全风化石英闪长岩	17.250	32.000	0.38	4.54

表 4 岩体按饱和单轴抗压强度分级

抗压强度/MPa	>250	250~100	100~40	40~25	25~5	5~1	<1
分值 r_0	25.00	20.00	11.67	6.67	3.33	1.67	0

工程实践中,除微、弱风化状态的其他风化状态岩石的饱和单轴抗压强度都无法由试验得到,因此,考虑采用同一场地的微、弱风化岩进行合理折减(风化折减系数 ξ_1)得到评分.该折减系数须

通过同一个力学指标来计算,地基承载力较好因为:(1)在一定程度上反映了岩体强度;(2)在现场容易获取且数据较为丰富.根据统计的 13 种岩体 5 种风化状态下的天然地基允许承载力(图

2),发现每种岩体的强度都是随风化程度的增加而递减,且该递减率基本相同. 递减率在不同岩性的岩体之间稍有差异,可以采用两种风化程度岩体地基承载力面积之比来减小这种差异. 具体为:假设每种岩性之间的距离为1,两种岩性承载力坐标点之间用折线连接,分别计算微、弱、碎块状强风化、砂土状强风化、全风化岩的天然承载力面积,以微风化岩为基准计算折减系数. 简单给出了全风化岩的承载力面积计算过程

$$s_{全} = 0.5(P_{U1} + P_{U2}) + 0.5(P_{U2} + P_{U3}) + \cdots + 0.5(P_{U12} + P_{U13}) = 0.5(P_{U1} + P_{U13}) + (P_{U2} + \cdots + P_{U12}) = 3\,818\text{ kPa}.$$

(11)

表5给出了13种全风化岩的天然地基承载力测试值.

用全风化岩的承载力面积除以微风化岩的承

表 5 全风化岩天然地基承载力取值

kPa

砂砾岩	泥质粉砂岩	晶屑熔结凝灰岩	凝灰熔岩	糜棱岩化花岗岩	辉绿岩	二长花岗岩	黑云母花岗岩	花岗岩	变质砂岩	花岗闪长岩	石英细砂岩	石英闪长岩
P_{U1}	P_{U2}	P_{U3}	P_{U4}	P_{U5}	P_{U6}	P_{U7}	P_{U8}	P_{U9}	P_{U10}	P_{U11}	P_{U12}	P_{U13}
312	316	362	340	300	300	300	300	344	301	315	327	315

表 6 岩体风化程度折减系数

岩体风化状态	微风化岩	弱风化岩	碎块状强风化岩	砂土状强风化岩	全风化岩
折减系数 ξ_1	1	0.486	0.189	0.136	0.091

微风化岩、弱风化岩、碎块状强风化岩岩体强度除由岩石强度和风化程度决定外,还受节理裂隙发育(完整性)的影响. 砂土状风化岩和全风化岩的破坏机理类似土体,因此,不考虑裂隙发育的折减. 根据收集统计的岩体节理裂隙发育情况并结合实际情

表 7 岩体节理裂隙发育程度折减

碎块状风化岩裂隙发育折减	微、弱风化岩裂隙发育折减	折减系数 ξ_2
裂隙发育一般,岩芯以3~8 cm的碎块状为主	裂隙不发育,岩芯主要为柱状	1.00
裂隙发育,岩体破碎,岩芯以2~5 cm的碎块状为主	裂隙稍发育,岩芯呈柱状夹短柱状为主	0.95
裂隙发育,岩体破碎,岩芯以1~3 cm的碎块状为主	节理裂隙发育,岩芯呈短柱状夹碎块状为主	0.80
裂隙极其发育,岩体非常破碎,岩芯以0.2~1.0 cm的碎块状为主	节理裂隙发育,多呈碎块状,局部短柱状	0.50
	裂隙发育,岩芯破碎,块径2~4 cm为主	0.30

表 8 不利结构面对岩体质量的折减

是否存在不利结构面、断层、软弱结构面	否	是
折减系数 ξ_3	1	0.11

综上所述,考虑岩体风化程度、裂隙发育情况及不利结构面的岩体质量得分为

$$r = \xi_1 \xi_2 \xi_3 r_0.$$

(13)

需要说明的是:如果弱风化岩的饱和单轴抗压强度已由试验测得,则不需进行风化系数折减,即 $\xi_1 = 1$;如果实验室使用的岩块包含原岩裂隙发

载力面积(41 956 kPa),即可得全风化岩的风化折减系数

$$\eta_{全} = s_{全} / s_{微} = 3\,818 / 41\,956 = 0.091.$$

(12)

其他风化状态下折减系数见表6.

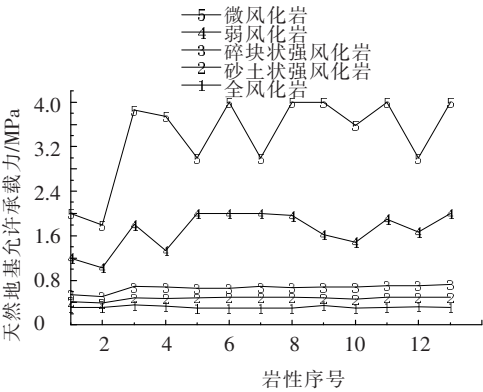


图 2 5种风化情况下的岩体天然地基允许承载力

况给出合理的裂隙折减系数 ξ_2 (表7).
由微、弱风化岩组成的边坡某剖面上如果存在不利结构面、断层或软弱夹层,则该处断面的稳定性较差,岩体质量应进行折减. 折减系数 ξ_3 通过对比标度权重系数^[13]得到(表8).

育情况,则不需进行裂隙发育折减,即 $\xi_2 = 1$. 强风化岩和全风化岩由于其饱和单轴抗压强度无法由实验测得,可以按照微风化岩或弱风化岩的强度按表6进行折减.

2 边坡岩土体质量分级
由于边坡岩土体随高度变化,采用加权的方法计算边坡岩土体综合质量得分. 基本原理为:边坡某岩土层厚度越大,对边坡的岩土体质量评分的贡献越大. 用岩土体质量评分系统评价了102

个边坡总共 152 个剖面的岩土体质量,以分值越大该处剖面岩土质量越好的原则进行现场判别,其判别结果与现场非常吻合,可用于福建高速公路边坡稳定性评价.从岩土体质量评分频率分布图(图 3)可以看出,评分结果基本服从正态分布,且无分值段缺失,说明调查样本具备随机性,且能较为广泛地覆盖整个分值(0~10)范围,评分系统更具有普遍适用性.

利用系统聚类的最短距离法对岩土体质量得分进行分类,并采用 4 个统计量^[14]来确定最佳聚类数: R^2 统计量、半偏 R^2 统计量、伪 F 统计量、伪 t^2 统计量,其中前两统计量输出结果一致.分类数太少和太多都无意义,初步将分类数定在 3~9 之间.采用多种系统聚类方法,发现离差平方和法聚类结果较佳,其 R^2 及半偏 R^2 统计量确定

的最佳分类数是二、三、四、五类;伪 F 统计量确定的最佳分类数是五、六、七类;伪 t^2 统计量确定的最佳分类数是二、五类,综合确定最佳分类级别为五类.归类得岩土体质量分级表(表 9),并结合现场实际情况给出了合理的支护建议.

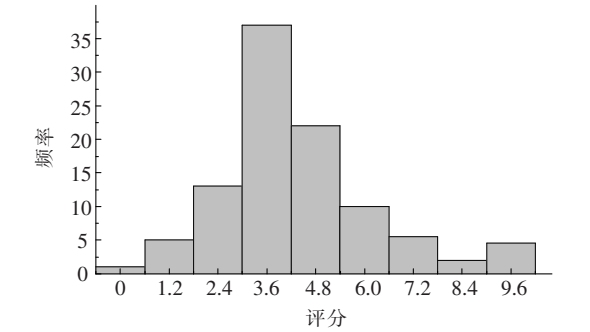


图 3 边坡岩土体质量得分频率分布

表 9 边坡岩土体质量分级

稳定级别	岩土体质量得分	剖面个数	描述	加固方式
I	9.72~9.23	8	基本为岩体比较好的岩质边坡,节理裂隙不发育、岩体属于硬岩,土层未见或很薄	无需加固
II	8.46~5.44	27	坡积土层较厚,偶有全、强风化层,临空面在不降水的情况下基本稳定	挂网喷草
III	5.16~3.83	45	岩体破碎;残积层或全、强风化层相对较厚,时常发生坍塌或小滑塌	拱形骨架、石砌墙、素喷混凝土
IV	3.76~2.9	44	岩体破碎;残积层或全、强风化层相对较厚,经常发生坍塌或小滑塌,整体稳定性较差	拱形格栅、石砌墙,局部锚杆加固
V	2.80~1.02	28	岩体破碎;残积层或全、强风化层较厚,结构面切割严重,整体往往都是不稳定的	重新开挖或预应力锚索框架

3 算 例

龙岩至长汀高速 A22 合同段 K115+352 处边坡剖面出露岩性为变质砂岩及其风化层,主要有 4 层岩土层,原山坡的倾向、倾角分别为 59°、23°,开挖边坡的倾向和倾角分别为 40°、45°,其他计算参数见表 10~12.

表 10 剖面 K115+352 岩层产状

岩土名称	厚度/m	倾角/(°)
坡积亚黏土	4.727 6	23.137
砂土状强风化岩	8.982 4	13.719
碎块状强风化岩	8.509 7	7.411
第一层弱风化岩	15.500 0	0

表 11 剖面 K115+352 岩性及得分

岩性	微风化岩单轴抗压强度/MPa	得分
晶屑熔结凝灰岩	73	11.67

表 12 剖面 K115+352 岩体风化状态及折减系数

风化状态	描述	折减系数
碎块状强风化岩	细粒结构,层状构造,裂隙发育,岩芯呈碎屑状及碎块状	0.80
弱风化岩	细粒结构,层状构造,裂隙发育一般,多呈柱状	0.95
是否存在不利结构面	是	0.11

该处剖面共出露 4 层岩土体:4.73 m 厚的坡积亚黏土、8.98 m 厚的砂土状强风化岩、8.51 m 厚的碎块状强风化岩及 15.5 m 厚的弱风化岩,综合岩土体质量得分为 1.83,如下求得:

$$r_E = (4.73 \times 6.5 + 8.98 \times 11.67 \times 0.136 + 8.51 \times 0.189 \times 0.8 + 15.5 \times 11.67 \times 0.486 \times 0.11) / (4.73 + 8.98 + 8.51 + 15.5) = 1.83.$$

(14)

坡积亚黏土的工程性质一般,因黏聚力相对较大,在注意排水的情况下,对边坡的稳定性不会有较大影响;砂土状及碎块状强风化岩工程性质较差,对边坡的稳定性很不利;变质砂岩本身性质较差,岩层面顺坡面发育,因此,弱风化岩的出露对边坡的稳定性非常不利. 总体来看,边坡岩土体质量较差,存在整体失稳的可能性(图4),本文得到的岩土体质量 1.83 分属最差级别 V 级与实际情况相符. 根据表 9 的建议,该边坡第一阶应进行锚索加固;第二阶应放缓坡率,采用拱形护面墙;第三阶挂网喷草.



图 4 K115 + 350 ~ 390 段左侧滑坡

4 结 语

结合福建高速公路边坡资料,基于极限平衡法、统计方法及参考岩体分级 RMR 方法,建立了一种边坡岩土体质量分级方法,扩展了边坡岩体分级范畴. 该法可对边坡岩土体进行评分,进而得到表征边坡局部及整体稳定性的岩土体评分. 福建省高速公路边坡岩土体质量评价方法计算简单,指标获取容易,可快速对边坡岩土体质量进行评价并提出合理支护建议,是一种较好的高速公路岩土边坡稳定性评价方法. 但由于统计范围为福建省 7 条高速公路边坡,仅适用于地质条件相似的高速公路岩土边坡稳定性评价,其适用性及准确性可由新的边坡样本进行检验和改进.

参考文献:

- [1] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications [M]. New York: Publ Wiley, 1989: 251.
- [2] ROMANA M. A geomechanical classification for slopes: slope mass rating [M]. Oxford: Pergamon Press, 1993: 575 - 600.
- [3] TOMAS R, DELGADO J, SERON J B. Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(4): 1062 - 1069.
- [4] 石豫川. 山区高等级公路层状岩质边坡稳定性 HSMR 快速评价体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [5] 张元才, 黄润秋, 赵立冬, 等. 天山公路边坡岩体质量评价 TSMR 体系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 617 - 623.
- [6] LAUBSCHER D H. A geomechanical classification system for the rating of rock mass in mine design [J]. J South Afr Inst Min Metall, 1990, 90(4): 257 - 273.
- [7] 重庆市建设委员会. GB50330 - 2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 66 - 67.
- [8] HACK R. Slope stability probability classification, SSPC [M]. 2nd ed. Enschede: Publ ITC, 1998: 258.
- [9] HACK R, PRICE D, RENGERS N. A new approach to rock slope stability: a probability classification (SSPC) [J]. Bull Eng Geol Environ, 2003, 62(6): 167 - 184.
- [10] SHUK T. Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects [C]//Proceedings of the 4th South American Conference on Rock Mechanics. Santiago de Chile: Pergamon Press, 1994: 255 - 266.
- [11] LIU Yaching, CHEN Chaoshi. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment [J]. Engineering Geology, 2007, 89(1/2): 129 - 143.
- [12] LYSANDROS P. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(2): 315 - 325.
- [13] 富振英. logistic 回归模型数据的预处理(二)[J]. 中国卫生统计, 1992, 9(2): 43 - 46.
- [14] 余家林, 肖枝洪. 多元统计及 SAS 应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 144 - 145.

(编辑 刘 彤)