

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-2109-05

修正 SMR 法在红层软岩边坡中的应用

邱恩喜¹, 谢 强¹, 石 岳², 赵 文¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031, 2. 四川省建筑设计院, 成都 610031)

摘 要: 在前人大量研究的基础上, 针对传统的 SMR 法(边坡岩体质量方法)没有考虑软弱互层对边坡岩体评价结果的影响的不足之处, 增加了强度差异调整权值项。对西南地区 80 个红层软岩边坡的评价分析结果表明, 采用岩性差异修正后的 SMR 法比直接使用 SMR 法更加符合野外实际情况, 运用修正后的 SMR 法对红层软岩边坡评价更加合理。

关 键 词: 红层软岩; 边坡; 岩体分类; SMR 法

中图分类号: TU 753.8

文献标识码: A

Application of modified SMR to redbed soft rock slopes

QIU En-xi¹, XIE Qiang¹, SHI Yue², ZHAO Wen¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Provincial Institute of Architectural Design, Chengdu 610031, China)

Abstract: Base on large number of researches before, and according to traditional SMR (slope mass rating), whose shortage is not consider slope weak rock mass interbed influences the slope rock mass evaluating result, the adjusting weight item of intensity difference is introduced. Through investigating 80 redbed soft rock slopes in Southwest China area, it is shown that the SMR modified by the difference of rock character is better than the traditional SMR in practical situations; so that the modified SMR is more reasonable using in redbed soft rock slopes appraisalment.

Key words: redbed soft; slope; rockmass classification; slope mass rating

1 引 言

红层软岩是一种特殊岩土, 在我国西南、中南和华南广大地区普遍分布, 具有易崩解、易风化、遇水易软化等特点^[1]。红层由红色岩层, 红色砾岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩、砂质页岩、页岩、泥岩等互层产出, 如四川盆地侏罗系沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组等地层。在软硬相间岩层中, 软弱岩层成为红层岩土体薄弱部位, 而软弱结构面的存在是红层滑坡等病害的主要原因。软硬岩层差异风化明显, 岩体中节理发育, 岩体破碎, 常在工程中引起边坡的崩塌破坏。随着红层地区工程建设发展, 红层软岩边坡的稳定性对工程建设的影响备受关注。当前国内外应用较多的是 SMR (slope mass rating) 法, 即边坡岩体质量评价方法, 但该方法在边坡评价过程中没有考虑到软硬互层的对边坡稳定性的影响, 基于前人大量的研究, 本文提出基于边坡岩体

强度差异修正权值项以及适用于红层边坡岩体稳定性分类的修正 SMR 法。

2 SMR 法边坡岩体分类体系

SMR 分类方法是从 RMR (rock mass rating) 法演变而来。RMR 方法是 Bieniawski^[2]提出, 该法综合考虑岩石强度、岩芯质量、结构面间距、结构面条件和地下水条件 5 个因素。将 5 个因素评分后求和, 再按分数将岩体质量划分为 5 个等级。RMR 系统是对岩体质量进行通用分类的一种方法, 对边坡稳定性的影响因素考虑不多。Romana^[3]在 RMR 法的基础上, 考虑对边坡稳定性有直接影响的某些具体因素, 提出了 4 个补充因素, 即 F_1 反映结构面倾向与边坡倾向的关系; F_2 反映平面滑动中结构面倾角的影响; F_3 反映边坡倾角与结构面倾角的关系; F_4 反映开挖方法对边坡稳定的影响, 见表 1~3。

收稿日期: 2007-11-26

基金项目: 铁道部科学基金项目 (No. 2004G026) 资助。

第一作者简介: 邱恩喜, 男, 1981 年生, 博士, 主要从事道路边坡工程研究。E-mail: linln779@163.com

边坡稳定性的评分以 SMR 法表示, 是将 RMR 法分别用 $F_1 \sim F_4$ 修正, 公式为

$$SMR = RMR + R_6 + R_7 \quad (1)$$

式中: $R_6 = F_1 \times F_2 \times F_3$; $R_7 = F_4$ 。

表 1 RMR 分类参数及评分标准

Table 1 RMR classification parameters and grade standard

参数及权值			分类、评分				
R_1	完整岩石强度 / MPa	点荷载强度指标(PLS)	>10	4~10	2~4	1~2	在此低范围内进行单轴抗压试验
		单轴抗压强度(UCS)	>250	100~250	50~100	25~50	5~25 1~5 <1
	权值		15	12	7	4	2 1 0
R_2	岩芯质量 RQD / %		90~100	75~90	50~75	25~50	0~25
	权值		20	17	13	8	3
R_3	结构面间距 J_s / m		>2	0.6~2	0.2~0.6	0.06~0.2	<0.06
	权值		20	15	10	8	5
R_4		粗糙度	很粗糙	粗糙	较粗糙	光滑	
	结构面条件	充填物 / mm				<5	软弱充填大于 5
		张开度 / mm	未张开	<1	<1	1~5	或大于 5
		连续性	不连续			连续	连续
		岩壁风化程度	未风化	微风化	强风化		
R_5	地下水条件		完全干燥	较湿	湿润	滴沥	水流
	权值		15	10	7	4	0

注: 表中权值为角顶指标的对应分数。

表 2 结构面调整评分标准

Table 2 Grade standard of structural plane direction

破坏方式	计算值	分类				
		很合适	合适	一般	不合适	很不合适
P	$ \alpha_j - \alpha_s / (^\circ)$	>30	30~20	20~10	10~5	<5
P	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
P/T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j / (^\circ)$	<20	20~30	30~35	35~45	>45
P		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$(\beta_j - \beta_s) / (^\circ)$	>10	10~0	0	0~-10	<-10
P	$(\beta_j + \beta_s) / (^\circ)$	<110	110~120	>120		
P/T	F_3	0	-6	-26	-50	-60

注: P 表示平面滑动; T 表示倾倒滑动。 α_j 为结构面倾向; α_s 为边坡倾向; β_j 为结构面倾角; β_s 为边坡倾角。

表 3 开挖方法评分标准

Table 3 Grade standard of digging method

边坡开挖方法调整权值	开挖方法	自然边坡	预裂爆破	光面爆破	一般方式机械开挖	欠缺爆破
R_7	F_4	+15	+10	+8	0	-8

3 修正的 SMR 法

自 Romana 提出修正后, 哈秋龄^[4]、周创兵^[5]、冯光乐^[6]、巫德斌^[7]、王哲^[8]等均对影响边坡稳定性的某些因素或者整体进行了修正, 但都是基于边坡是被节理切割的均质岩体, 未考虑边坡岩体岩性差异对边坡稳定性的影响。显然, 直接将 SMR 法用

于红层软岩边坡稳定性评价与分类, 不能真实、全面地反映边坡现状, 需要提出一个能够反映边坡中岩性差异对稳定性影响的参数, 对 SMR 法进行修正。笔者通过对西南地区 80 个红层边坡调查, 提出了回弹比参数 (边坡中砂岩与泥岩的回弹值比), 在传统方法的基础上增加强度差异调整权值项。调查边坡位于四川盆地中部、东南部及北部, 主要地层岩性为侏罗系紫红色砂岩和泥岩等互层产出, 受构造影响轻微, 岩层产状平缓。

3.1 回弹比对边坡稳定性的影响分析

边坡岩体回弹强度以回弹值表示, 它反映了边坡表层岩体的强度。由于调查的边坡 90 % 以上为砂岩、泥岩互层, 所得到的回弹值主要有两组。根据文献[9]中的经验公式可换算出岩石单轴抗压强度。

图 1 为回弹值 R (由回弹值得到) 的分布曲线和百分比累积曲线。由图中可知, 红层软岩边坡岩体回弹值呈较规则的正态分布, 泥岩峰值回弹值为 17, 回弹值为 15~20 的边坡占 60 %。累计曲线呈 S 型; 砂岩峰值回弹值为 24, 回弹值为 25~30 的边坡占 50 %, 百分比累积曲线呈前陡后缓型。

在大量的边坡调查中, 砂岩的强度高于泥岩, 其抗风化能力也高于泥岩。调查发现, 未做防护的边坡均产生了差异风化而引起破坏, 因而应研究强度差异对边坡稳定性的影响。图 2 为回弹比、坡度

与稳定性三者的关系。从图 2 中可以看出, 边坡的回弹比范围在 1~2.5 (岩性单一值取 1)。回弹比在 1.0~1.5 范围的边坡占 61%, 1.5~2.0 的占 26%。稳定边坡的坡角集中在 $42^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 基本稳定的边坡坡角集中在 60° 左右。不稳定的边坡坡角分布范围较大, 在 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间。随着回弹比增加, 边坡的稳定性降低, 不稳定边坡数量增多, 回弹比大于 2.0 的均为基本稳定和不确定边坡, 所以回弹比是影响边坡稳定性的一个重要因素, 在红层软岩边坡稳定性评价中是一个不可缺少的指标。

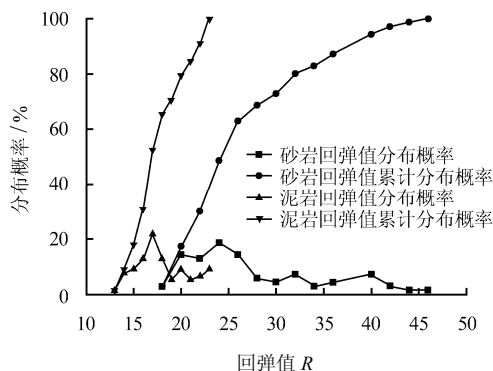


图 1 回弹值分布曲线

Fig.1 Distribution curves of rebounding value

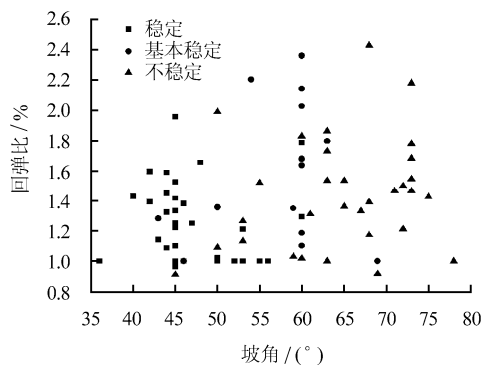


图 2 边坡稳定性与回弹比及坡度间关系

Fig.2 The relationship between slope stability, rebounding ratio and slope angle

3.2 回弹比对边坡稳定性的影响分析

所调查的红层边坡中, 在差异风化作用下首先使受节理切割泥岩风化破碎, 形成凹凸起伏状坡面, 然后, 在重力、温度和水等共同作用下砂岩产生崩塌破坏。如此不断地循环, 最终影响整个边坡稳定性。这个过程中强度差异是崩塌发生的主要原因, 使用 SMR 法对边坡稳定性进行评价时, 需要加入岩体强度差异 (回弹比) 调整权值 R_s 。考虑到岩性差异对边坡稳定性影响实际就是岩体力学的参

数折减, 因此取其修正值为负值。将野外边坡调查结果与采用几组修正参数评价后结果进行对比分析, 确定其中应用效果最好的一组数据为回弹比调整权值 R_s , 见表 4。

表 4 强度差异评分标准

Table 4 Grade standard of rock strength difference

强度差异调整权值	<1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	≥ 1.8
R_s	0	-2	-4	-8	-12

3.3 修正 SMR 法的计算

根据 SMR 法及修正分析, 提出适用于红层软岩的边坡分类系统——修正 SMR 法, 公式为

$$SRM = \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2)$$

式中:

$$R_6 = \prod_{i=1}^3 F_i \quad (3)$$

修正后的公式, 考虑到了软硬互层对边坡稳定性的影响。SMR 的最大值为 100, 最小值为 0, 划分为 5 个级别, 见表 5, 详细的分类是再将每一级分成两级, 采用下标 a、b 来区分, 如 41~50 用 IIIb 和 51~60 用 IIIa 表示。

表 5 修正 SMR 法分级描述表

Table 5 Grading description of modified SMR

级别	分级	稳定性	破坏形式	加固
V	0~20	很坏	大型平面或类似土体	重新开挖
IV	21~40	坏	节理构成平面或大楔形体	大力加固或重新设计
III	41~60	一般	一些不连续面构成平面和楔形体	系统加固
II	61~80	好	一些块体	点状加固
I	81~100	很好	无	不需加固

4 修正 SMR 法在边坡中的应用

野外调查过程中将边坡按稳定程度分为 3 大类: 稳定、基本稳定和不确定。表 6 列出了西南地区 80 个红层软岩边坡传统的 SMR 法和修正 SMR 法的边坡分类结果。从表 6 可以看出, 红层软岩边坡岩体等级处于 V~III 之间, 说明被调查地区红层软岩边坡处于坏到一般之间。在不稳定和基本稳定的边坡中, 采用修正的 SMR 法使部分岩性差异大的边坡的评分降低, 共有 22 个边坡稳定性等级发生变化, 评价结果更加接近野外实际调查结果, 同时也表明考虑了强度差异对边坡稳定性影响的评分更加合理。

野外调查中稳定边坡多数为高速公路、铁路边坡。虽然岩体等级不高,但边坡开挖成折线式,采用骨架护坡和挂网植草等工程措施后,其边坡亦稳定,可以看出台阶状边坡及坡面挂网植草等工程措施对红层软岩边坡的稳定性起到改善作用。基本稳定、不稳定边坡多数为国道、省道等公路边坡,受经济条件限制,开挖后仅作简单坡角防护。岩体强度差异对这类边坡稳定性影响体现的尤为明显,如第 30、37 号边坡,采用通用 SMR 法的结果显示,边坡稳定性为好和一般,采用回弹比权值调整后,边坡岩体稳定性评价更加符合实际调查结果。

表 6 边坡 SMR 分类结果
Table 6 Results of slope SMR classification

编号	野外调查	SMR 法	SMR 法 (修正)	编号	野外调查	SMR 法	SMR 法 (修正)
1	不稳定	V a	V a	41	基本稳定	IIIb	IIIb
2	不稳定	V a	V a	42	基本稳定	IIIb	IIIb
3	不稳定	V a	V a	43	基本稳定	IIIb	IIIb
4	不稳定	IVb	IVb	44	基本稳定	IIIa	IIIa
5	不稳定	IIIb	IVb	45	基本稳定	IIIa	IIIa
6	不稳定	IIIb	IVa	46	稳定	IIIb	IIIb
7	不稳定	IVa	IVa	47	稳定	IIIb	IIIb
8	不稳定	IIIb	IVa	48	稳定	IIIa	IIIb
9	不稳定	IIIb	IVa	49	稳定	IIIa	IIIb
10	不稳定	IIIb	IVa	50	稳定	IIIb	IIIb
11	不稳定	IIIb	IVa	51	稳定	IIIb	IIIb
12	不稳定	IIIb	IVa	52	稳定	IIIb	IIIb
13	不稳定	IIIb	IVa	53	稳定	IIIa	IIIb
14	不稳定	IIIb	IIIb	54	稳定	IIIb	IIIb
15	不稳定	IIIb	IIIb	55	稳定	IIIb	IIIb
16	不稳定	IIIb	IIIb	56	稳定	IIIb	IIIb
17	不稳定	IIIa	IIIb	57	稳定	IIIb	IIIb
18	不稳定	IIIa	IIIb	58	稳定	IIIb	IIIb
19	不稳定	IIIb	IIIb	59	稳定	IIIa	IIIb
20	不稳定	IIIb	IIIb	60	稳定	IIIa	IIIb
21	不稳定	IIIb	IIIb	61	稳定	IIIa	IIIb
22	不稳定	IIIb	IIIb	62	稳定	IIIa	IIIa
23	不稳定	IIIb	IIIb	63	稳定	IIIa	IIIa
24	不稳定	IIIb	IIIb	64	稳定	IIIa	IIIa
25	不稳定	IIIb	IIIb	65	稳定	IIIa	IIIa
26	不稳定	IIIb	IIIb	66	稳定	IIIa	IIIa
27	不稳定	IIIa	IIIb	67	稳定	IIIa	IIIa
28	不稳定	IIIb	IIIb	68	稳定	IIIa	IIIa
29	不稳定	IIIa	IIIb	69	稳定	IIIa	IIIa
30	不稳定	II b	IIIb	70	稳定	IIIa	IIIa
31	不稳定	IIIa	IIIa	71	稳定	IIIa	IIIa
32	基本稳定	IIIb	IVa	72	稳定	IIIa	IIIa
33	基本稳定	IIIb	IVa	73	稳定	IIIa	IIIa
34	基本稳定	IIIb	IVa	74	稳定	IIIa	IIIa
35	基本稳定	IIIb	IVa	75	稳定	IIIa	IIIa
36	基本稳定	IIIb	IVa	76	稳定	IIIa	IIIa
37	基本稳定	IIIa	IVa	77	稳定	II b	II b
38	基本稳定	IIIb	IVa	78	稳定	II b	II b
39	基本稳定	IIIb	IVa	79	稳定	II b	II b
40	基本稳定	IIIb	IVa	80	稳定	II b	II b

5 结 论

(1) 传统 SMR 法是基于边坡岩体为被节理切割的均质边坡,没有考虑边坡内软弱互层因素,笔者在传统方法的基础上,增加了强度差异调整权值项,提出了适用于红层软岩边坡的修正 SMR 法。

(2) 采用修正后的 SMR 法,对调查的红层软岩边坡进行评价分类,结果显示比传统 SMR 法更加接近野外调查结果,证明修正后的 SMR 法在红层软岩边坡稳定性评价应用中是可行的、正确的。该方法适用于岩性为软弱互层状边坡,特别是红层软岩边坡的稳定性评价。

(3) 提出了砂岩与泥岩的回弹比,分析了回弹比与坡角及边坡稳定性间的相关关系,随着回弹比增加,边坡的稳定性降低,回弹比同样是影响边坡稳定性的重要因素之一。

(4) 调查和分类评价结果表明,即使边坡岩体等级不高,如果开挖成折线式、采取边坡植草等防护措施,边坡的稳定性也可大大提高,这样可以降低差异风化对边坡稳定性的影响。调查显示未做防护的边坡均出现了边坡差异风化引起的崩塌破坏,在这类边坡中,差异风化对红层软岩边坡稳定性影响更加明显。

(5) 增加的强度差异调整权值是选用在调查的 80 个边坡中应用较合理的一组数据,但仍然具有很大的主观性,如何更加合理地确定调整权值仍需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 冯启言,韩宝平,隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 266—271.
FENG Qi-yan, HAN Bao-ping, SUI Wang-hua. Characteristics of water rock interaction of red beds and its application to engineering in southwestern Shandong[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(3): 266—271.
- [2] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of joint rock masses[J]. *The Civil Engineer in South Africa*, 1973, 15(12): 335—343.
- [3] ROMANA M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes[C]//International Symposium on the Role of Rock Mechanics. Zacatecas: ISRM, 1985: 49—53.
- [4] 哈秋龄,李建林,张永兴,等. 长江三峡工程节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

- [5] 周创兵, 孙万和, 王柏源, 等. 白水峪水电站右岸坝下游边坡岩体的 RMR-SMR 分类及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 1997, 5(3): 224—230.
ZHOU Chuang-bing, SUN Wan-he, WANG Bai-yuan, et al. RMR-SMR classification of slope rockmass and stability evaluation for the right bank slope downstream Baishuiyu hydroelectric power station[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1997, 5(3): 224—230.
- [6] 冯光乐, 罗蓉, 凌天清, 等. RMR 法在公路边坡应用中的几点修正[J]. 长安大学学报, 2002, 122(16): 19—24.
FENG Guang-le, LUO Rong, LING Tian-qing, et al. Revisings of RMR method used in highway slopes[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 2002, 122(16): 19—24.
- [7] 巫德斌, 徐卫亚. 岩石边坡力学参数取值的 GSMR 法[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1421—1426.
WU De-bin, XU Wei-ya. GSMR method for determining rock slope mechanical parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1421—1426.
- [8] 王哲, 石豫川, 刘汉超, 等. 公路边坡岩体分级中坡高修正系数的改进[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 162—166.
WANG Zhe, SHI Yu-chuan, LIU Han-chao, et al. Modification of slope height coefficient in highway slope rock mass rating[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(2): 162—166.
- [9] 谢强. 铁路岩石边坡研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学土木学院, 1998.
- [10] 孙东亚, 陈祖煜, 杜伯辉, 等. 边坡稳定评价方法 RMR-SMR 体系及其修正[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 297—304.
SUN Dong-ya, CHEN Zu-yu, DU Bo-hui, et al. Modifications to the RMR-SMR system for slope stability evaluation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 297—304.
- [11] 王亮清, 唐辉明, 刘佑荣, 等. VJC-RMR 法在岩体变形模量确定中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 811—813.
WANG Liang-qing, TANG Hui-ming, LIU You-rong, et al. Application of VJC-RMR method to determining rock mass modulus of deformation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 811—813.

上接第 2095 页

- LI Tao, ZHANG Yi-ping, ZHANG Tu-qiao. Superior combination forecasting settlement of soft clay embankments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3282—3286.
- [1] 宋绪国, 刘远锋, 杨明雨, 等. 利用沉降观测资料推算未来沉降在秦沈客运专线中的应用[J]. 路基工程, 2002, (5): 37—4.
- [2] 曹国强, 张仪萍, 张士乔, 等. 地基沉降速率与沉降的关系及其应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 467—470.
CAO Guo-qiang, ZHANG Yi-ping, ZHANG Tu-qiao, et al. Relationship between settlement-velocity and settlement of ground and its applications[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 467—470.
- [3] 李涛, 张仪萍, 曹国强, 等. 推算室内固结系数的剩余沉降对数法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 724—726.
LI Tao, ZHANG Yi-ping, CAO Guo-qiang, et al. Study of evaluation of consolidation coefficient[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 724—726.
- [4] 孙更生, 郑大同. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [5] 王志亮, 郑明新, 吴勇, 等. 增加曲线模型在路基沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 901—903.
WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin, WU Yong, et al. Study on application of logistic curve model to settlement prediction of roadbed subjected to multilevel loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 901—903.
- [6] 甘友文, 王志亮, 郑华. 地基沉降预测中的双曲线模型修正[J]. 水文地质工程地质, 2004, (1): 98—100.
- [7] 张丽萍. 两种指数曲线法在公路地基沉降计算中的对比[J]. 西部探矿工程, 2007, 5(5): 26—28.
- [8] 辜清华, 何良德. 预测路基沉降的一种新模型[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(2): 64—67.