

公路边坡及其环境工程技术交流会 论文集

交通部科技教育司 编
交通部公路司



人民交通出版社
China Communications Press

Gonglu Bianpo Jiqi Huanjing Gongcheng Jishu Jiaoliuhui Lunwenji

公路边坡及其环境工程技术交流会 论文集

交通部科技教育司 编
交通部公路司

人民交通出版社
2005·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

公路边坡及其环境工程技术交流会论文集/交通部科技教育司, 交通部公路司编. —北京: 人民交通出版社, 2005.10

ISBN 7-114-05799-7

I.公... II.①交...②.交... III.边坡-道路工程-学术会议-文集 IV.U416.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116340 号

书 名: 公路边坡及其环境工程技术交流会论文集

著 作 者: 交通部科技教育司

交 通 部 公 路 司

责任编辑: 邓卫东 柴贺军 唐树名

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 29.25

字 数: 739 千

版 次: 2005 年 9 月第 1 版

印 次: 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05799-7

印 数: 0001—1000 册

定 价: 68.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

公路边坡及其环境工程技术交流会论文集

编辑委员会

主任委员 孙国庆

副主任委员 郑颖人 李 华 赵晋和 陈国靖 张 力

委 员 (以姓氏笔画排序,排名不分先后)

邓卫东 杨和平 纪景义 孙永红 张贤康

陈宏凯 赵之忠 唐树名 柴贺军 蒋树屏

谢永利 魏道新

前 言

20世纪90年代以来,随着我国经济建设的发展,特别是西部大开发战略的实施,作为国家基础设施体系的重要组成部分,高等级公路在我国得到了飞速的发展。我国是一个多山国家,山区面积约占全国总面积的70%,由于地质、地貌条件的限制和公路线形的制约,深挖、高填引起的边坡问题十分普遍。近年来为解决边坡问题,交通部等部门投入了大量的人力物力开展边坡的研究和治理工作,在边坡灾害的研究和防治上积累了较多的经验和方法。若将这些理论、经验、研究方法和治理措施进行交流和普及,不仅能使边坡研究和防治水平迅速提高,而且在减轻和防治边坡灾害上会发挥更大的作用。基于此,交通部定于2005年10月在吉林长春召开“公路边坡及其环境工程技术交流会”。这次会议由交通部科教司、交通部公路司主办,交通部西部交通建设科技项目管理中心、重庆交通科学研究设计院、吉林省交通厅承办,广西壮族自治区交通科学研究所、云南省公路科学研究所、新疆交通科学研究院、甘肃省交通科学研究所、内蒙古交通科学研究院、青海省公路科学研究所勘测设计院、宁夏交通科学研究所、西安公路科学研究所、贵州交通科学研究所、西藏自治区交通科学研究所、长安大学、长沙理工大学、重庆交通学院协办。

为使此次技术交流会获得圆满成功,组委会编写了“公路边坡及其环境工程技术交流会论文集”。论文集选收论文77篇,内容包括:边坡稳定与分析、边坡防治工程设计及施工、边坡防治新技术、边坡环境工程、山区公路路堤沉降预测与处治技术,以及特殊填料路堤的修筑技术。收入论文集的论文涉及“十·五”期间全国公路边坡及其环境工程的相关成果,基本上反映了近年来我国公路边坡及其环境工程在地质勘察与评价、边坡稳定性分析、边坡加固与防护技术、边坡稳定性监测等多方面科学进展及技术水平。

尽管我们对入选论文作了细致的审编,但鉴于时间较紧,疏漏之处在所难免,敬请读者多提宝贵意见。

编 者

2005年10月

目 录

一、边坡稳定与分析

三峡库区公路岩质岸坡稳定性分级体系研究·····	冯文凯	石豫川	柴贺军	唐胜传	(3)
云南山区公路滑坡治理及统计分析·····	刘红卫	苏生瑞	姜海波	张瑞松	(11)
坡比对黄土路堑高边坡稳定性影响的研究·····	王树丰	李 广	陈志新		(18)
第三系湖相成因膨胀土滑坡的地质特征及工程处治方法探讨 ·····	刘龙武	郑键龙	杨和平		(22)
延边地区公路沿线边坡失稳试验分析·····	谷宪明	王子栋	郭 涛	孔祥礼	(28)
江密峰至延吉高速公路边坡稳定性评价和防护措施·····			栾 海		(35)
CSMR 法在汤屯高速公路边坡稳定评价中的应用·····	吴承明	洪春林	郭正言		(42)
基于 GIS 的公路边坡稳定性评价系统·····	唐亦川	张惠山	吴 辉		(47)
东北地区路基边坡侵蚀破坏模式分析研究·····	韩继国	王选仓	时成林	王达亮	(53)
断层地质构造对采空区路基路堑稳定性影响数值模拟 ·····	王玉标	李永斌	龙祖惠	周 基	(60)
改扩建路堑牵引式滑坡稳定性分析与加固研究·····	周传敏	黄晓燕	程跃辉	徐建东	(65)
路堑边坡变形破坏与挡墙疏干防护数值分析·····	赵朝阳	吴 平	张端良		(75)
路堑牵引式滑坡渗流场分析与疏干整治措施·····	程跃辉	徐建东	周传敏	廖浩成	(79)
引入修正因子的非等步长时变参数灰色预测模型及应用 ·····	周 宁	傅鹤林	郭建峰	龙万学	(85)
板裂介质理论在牟珠洞滑坡机理分析中的应用·····	周 宁	傅鹤林	许湘华	郭建峰	(92)
堆积层边坡人工降雨致滑的原位监测试验研究 ·····	周 中	傅鹤林	刘宝琛	谭挥华	龙万学 (99)
公路边坡岩体稳定性分级研究·····	唐胜传	柴贺军	冯文凯		(107)
公路岩质边坡变形破坏地质模式研究·····	唐胜传	柴贺军			(112)
路堑边坡变形破坏过程再现模拟研究·····	柴贺军	唐胜传			(117)
土石混填路基内部排水设计的数值模拟·····	陶丽娜	柴贺军	阎宗岭	杨建国	(123)
重庆高速唐家院子滑坡变形破坏过程及处治方法研究·····	杨建国	杜小平			(129)
采用拉格朗日法分析加锚岩体的锚固效应·····	杨建国	刘东燕	彭文轩		(136)
岩体路堑边坡锚固机理的断裂力学分析·····	唐树名	王 成			(141)
浅谈公路路堑边坡分类处治·····	文志兵	唐树名			(146)
公路边坡防护土工合成材料老化特性的模拟试验研究 ·····	韩春云	武 明	唐颂颂	邓卫东	(150)
新旧结合路基边坡稳定和不均匀沉降性状的离心模型试验研究·····	严秋荣	刘涌江			(155)
边坡植物根系锚固作用机理的研究进展·····	周群华	邓卫东			(163)
山区高等级公路高边坡病害的预测与预防·····		马惠民			(169)

二、边坡防治工程设计

国道 318 线二康路 K2794 滑坡工程地质评价及处治方案选择	周永江	杨雪莲	(177)
京珠高速公路粤境北段路堑高边坡病害防治措施设计	李 敏		(183)
昆明地区土质路堑边坡设计抗剪指标的选用	黄 岩	俞明健	(188)
锚索抗滑桩处治滑坡实例	梅仕然	马 新	吴凯峰 (194)
长晋高速公路滑坡处治设计分析	田志忠	张卫华	(200)
浅谈山区公路边坡防护设计	赵华宏	张 胜	郭正言 (206)
桩身预应力抗滑桩设计方法分析	杨建国	贾学明	赖思静 (210)
考虑结构面效应的类土质边坡稳定性计算软件的介绍		卢才金	(215)
高边坡病害治理工程设计中的关键问题		张红利	(221)
陡坡路堤土工格室加筋机理数值分析研究		李志勇	(226)
高切坡研究现状及趋势分析	陈洪凯	杨世胜	唐红梅 (233)
危岩锚固机理的断裂力学分析	陈洪凯	胡 明	唐红梅 (241)

三、边坡防治新技术

土工合成材料在膨胀土路基处治中的应用	刘 彦	钟志钦	(251)
压力分散型锚索在膨胀性软岩边坡工程中应用的研究	栾 海	赵 宇	(256)
瞬态面波技术在滑坡调查中的应用		周孝宇	(262)
云南膨胀土地区高速公路边坡工程与植物防护实践	张世俊	马绍昆	王 晖 (266)
岩溶边坡危石 SNS 防护技术	雷明堂	邓家喜	王 浩 (273)
潭邵高速公路膨胀土边坡的处治	胡 伟	何正平	马武章 (284)
锚拉式桩板墙在汾柳高速公路中的应用		曹学强	(288)
柔性支挡处治膨胀土路堑边坡技术	颜 春	田应军	吴进星 (294)
土石混填路堤边坡抗冲刷剂的开发与应用	阎宗岭	刘茂光	柴贺军 (299)
几种锚固工程抑制结构在福建高速公路的应用		林石泉	卢才金 (304)
锚固技术在治理土夹石地层病害高边坡的应用		黄晓华	陶春胜 (309)
桩身预应力抗滑桩在滑坡治理工程中的应用	贾学明	杨建国	柴贺军 马万权 (314)
边坡锚索(杆)无损检测技术现状与仪器开发对策	罗 斌	唐树名	刘涌江 (321)

四、边坡环境工程

浅谈公路边坡生态防护的几点认识		高伏良	(327)
弃土场施工期水土流失强度研究	罗 斌	邓卫东	徐宗永 (330)
山区高等级公路路堑边坡景观营造若干问题的探讨		杨航卓	(334)
重庆地区高速公路边坡生态防护		薛华清	(340)
公路建设中的工程侵蚀及生态治理		张中杰	(344)
高等级公路边坡绿化与生态理念初探		罗晓云	(347)
高速公路土质路基施工中的水土流失防治对策		吴东国	冷光义 (351)
厚层基材技术在渝怀铁路岩质边坡植被护坡中的应用		刘 煌	张俊云 (354)
鄂尔多斯高原黄土干旱地区公路边坡植物防护技术		杨和平	王 骁 (359)

基于安全及景观要求的山区低等级公路边坡生态防护技术

..... 孟 强 王 丹 潘 峰 刘娅丽 汪伟刚 尚丽丽 曹 杨	(365)
西部公路边坡生态工程技术应用现状浅析..... 王 丹 沈 毅 晏晓林 戴泉玉	(371)
广西南友路宁明膨胀土路堤的修筑技术	
..... 杨和平 刘龙武 韦秉旭 杨绍静 吴绪浩 廉向东	(376)
基于填方工程的斜坡软弱地基及其特性研究.....	魏永幸 (383)
人工神经网络在路堤沉降预测中的应用..... 张留俊 冯 炜 黄晓明	(391)
采空区路基工程灾害调查与初步评价..... 廖浩成 黄晓燕 崔颖超 张玉中	(397)
地下暗河引起路堤沉陷与失稳过程相似模型试验	
..... 王玉标 李永斌 陈青香 谭 勇 陈明芳	(403)
非稳定采空区沉陷对路基稳定性影响数值模拟	
..... 黄晓燕 廖浩成 崔颖超 张玉中	(408)
复杂岩溶暗河漏斗山区筑路方案选择层次分析	
..... 肖春发 陈明芳 陈青香 谭 勇	(412)
高速公路采空区路基工程典型病害类型	
..... 崔颖超 张玉中 黄晓燕 龙祖惠 周 基	(417)
基于采空区活化路基路面差异沉降控制数值模拟	
..... 袁海利 熊 韬 芮勇勤 陈青香 谭 勇	(424)
土石混填路堤变形破坏特征底摩擦试验模拟..... 阎宗岭 熊 峰 柴贺军	(430)
高速公路路基沉降预测的 ELMAN 模型 郝 治 唐 勇	(437)
红层软岩公路路堤变形规律及病害处治技术研究..... 刘涌江 邓卫东	(443)
环保型边坡支挡结构稳定性分析..... 蒋树屏 刘元雪	(450)

一、边坡稳定与分析

三峡库区公路岩质岸坡稳定性分级体系研究

冯文凯¹ 石豫川¹ 柴贺军² 唐胜传²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室 成都 610059;

2. 重庆交通科研设计院 重庆市 400067)

摘 要 近年来,前人通过研究提出了公路边坡稳定性分级体系 HSMR(Highway Slope Mass Rating),该体系主要是针对公路上边坡(即人工边坡),水的作用一般不是很突出。本文通过进一步研究,将该体系应用到了三峡库区渝巴公路下边坡(即自然岸坡)的稳定性评价,如不考虑库水作用的影响,其评价结果仍然比较理想。但考虑到库区湿热的气候环境条件以及蓄水完成后每年一次落差达 30m 的水位调节对岸坡岩体的影响效应,其稳定性肯定有一定程度的降低,评价结果将出现偏差。据此,通过专家咨询及实例岸坡分析,本文对该分级体系做了进一步修正,初步提出了公路岸坡稳定性分级体系 HBSMR(Highway Bank Slope Mass Rating),并提出了相应的综合影响系数,为定量评价公路岩质岸坡稳定性提供了便利。

关键词 HSMR 体系 公路 库水作用 岩质岸坡 HBSMR 体系 综合影响系数

Study on Highway Rock Bank Slope Mass Rating in Three Gorges Areas

FENG Wen-kai SHI Yu-chuan CHAI He-jun TANG Sheng-chuan

随着经济的快速发展与社会的进步,山区高等级公路建设获得了迅猛发展,如何合理地对比边坡稳定性进行快速、简单而有效的评价,成为公路建设中亟待解决的问题。由于山区地形条件复杂,岩石边坡数量多,加上公路工程属大型线性工程,本身就具有跨越地区广、地层岩性及地质构造等自然地质条件复杂多变的特点,且公路勘察一般工期都比较紧迫,很难对每一个边坡工点的地质条件和岩体力学特征详细勘察后进行稳定性计算与分析。因此,边坡岩体分级体系因其简便、快速的特点,在公路边坡稳定性评价领域具有广泛的应用前景。

然而,与隧道围岩分类相比,针对岩质边坡这一特殊地质体的边坡岩体分级系统的研究起步较晚,Romana(1985)在著名的地质力学分类体系(RMR)的基础上,将边坡结构面产状与坡面产状的组合关系对边坡稳定性的影响量化后纳入评价体系,提出了边坡岩体分级体系(SMR)。其表达式如下:

$$SMR = RMR - (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

式中, F_1 为边坡中不连续面倾向与边坡倾向间关系调整值; F_2 为不连续面倾角大小调整值; F_3 为不连续面与坡面倾角间关系调整值。

各符号之意义与取值条件可参见文献[1~3]。

此后,SMR 体系在大量工程实践中,结合各工程领域的特色,不断地得到修正和改进。中国水利水电边坡登记小组(1997)针对水电边坡稳定性评价的实际情况,考虑了坡高和结构面

条件对边坡稳定性的影响,并以修正系数的形式将其纳入 SMR 体系中,得到了 CSMR 体系^[1] (Chinese system for SMR),其表达式如下:

$$\text{CSMR} = \xi \text{RMR} - \lambda (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (2)$$

式中, ξ 为坡高修正系数, $\xi = 0.57 + 0.43 \times (H_r/H)$, 对于倾倒地坡 $\xi = 1$, H 为边坡高度(m), $H_r = 80\text{m}$; λ 为结构面条件系数。

其他各符号之意义与取值条件可参见文献[1~3]。

尽管 CSMR 体系的改进思路代表了 SMR 体系的合理发展方向,但根据以往的工程实践,由于公路边坡相对低矮,应用该系统对公路边坡进行分级,结果与边坡实际状况差异很大,评分值往往过高,适用性很差。基于此,石豫川、王哲等人^{[4][5]}在对实地采集的 100 余个公路边坡样本进行统计分析后,结合公路自身特点,将 SMR-CSMR 体系改进,提出了适宜于公路边坡稳定性评价的 HSMR 体系(highway slope mass rating)。其表达式如下:

$$\text{HSMR} = \xi \text{RMR} - \eta \lambda (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (3)$$

其中,坡高修正系数 ξ 、结构面条件系数 λ 均进行了改进或调整,并加入岩性组合系数 η ,其他符号意义同前,可参考文献[4][5]。

HSMR 体系的提出,为简便快速地评价公路边坡稳定性提供了重要方法,然而,该分级体系主要是针对公路上边坡(即主要为人工开挖边坡),且水的作用一般不是很突出。而针对下边坡(多为自然边坡),尤其是山区沿江、沿河公路,受水的影响比较突出时,该体系的有效适用性如何,有待深入研究。因此本文以三峡库区渝巴公路岸坡稳定性分级研究为例,在充分考虑库水升降作用及湿热的环境气候条件影响的情况下,对 HSMR 体系进行了深入研究和修正,并提出了公路岸坡稳定性分级体系 HBSMR(highway bank slope mass rating)。

1 HSMR 体系在下边坡中的适用性

由前述介绍可知,HSMR 体系是在 SMR 分类体系的基础上,参照 CSMR 体系的改进方法提出的针对公路上部开挖边坡的稳定分级体系^[4],对上边坡很适用,但对公路下边坡是否适用,并未进行过验证,这也是建立公路岸坡稳定性分级体系的基础。为此,本文首先应用该体系对三峡库区渝巴路下部 37 个自然边坡(局部受人为扰动)在不考虑库水作用情况下进行了验证,并与 SMR-CSMR 体系预测结果进行了对比,分级标准见表 1,其中,野外经验分级 ER(experiential rating)体系的评价标准可参见文献[5]。最终评价结果显示,HSMR 体系仍是最理想的,偏差 13.5%(与野外定性判断对比)(表 2),充分说明该方法也适用下部自然边坡。

岩质边坡稳定性分级描述

表 1

级 别	V	IV	III	II	I
分级结果	≤ 20	$20 < , \leq 40$	$40 < , \leq 60$	$60 < , \leq 80$	> 80
稳定性	很坏	坏	一般	好	很好
	稳定极差	稳定差	稳定较差	基本稳定	稳定

不考虑湿热气候及库水作用时各体系对岸坡稳定性的预测结果(即蓄水前)

表 2

里程桩号	岩性	岩体质量评分					修正系数			SMR		CSMR		HSMR		ER	
		RMR	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	ξ	η	λ								
K40+000	J _{1z}	44.5	0.15	1	0	15	1.25	0.8	0.9	59.5	III	71.0	II	70.4	II	70	II
K40+100	J _{1z}	47	0.15	1	0	15	1.25	0.8	0.9	62	II	74.1	II	73.6	II	70	II
K40+700	J _{1z}	47	0.15	1	0	15	1.25	1.2	0.7	62	II	74.1	II	73.6	II	70	II
K40+980	J _{1z}	50	0.15	0.85	6	15	1.27	1.2	0.7	64.2	II	83.4	I	77.9	II	85	I
K41+080	T _{3xj}	49	0.4	1	6	15	1.21	1	0.7	61.6	II	67.2	II	72.7	II	80	II
K41+280	T _{3xj}	46.5	0.15	1	0	15	1.20	1	0.9	60.6	II	62.1	II	69.9	II	80	II
K45+400	T _{2b} ³	41	0.15	1	0	15	1.17	1	1	56	III	52.1	III	63.0	II	70	II
K46+200	T _{2b} ³	52.5	0.15	1	6	0	1.20	1	0.9	52.5	III	54.8	III	63.0	II	65	II
K46+260	T _{3xj}	60.5	0.15	1	6	15	1.22	1	0.7	74.6	I	83.5	I	88.3	I	90	I
K47+430	J _{1-2z}	48.5	0.15	1	0	15	1.25	1.2	0.7	67.6	II	81.7	I	80.9	I	85	I
K47+500	J _{1-2z}	57.5	0.15	1	0	15	1.25	1.2	0.9	69	II	82.9	I	82.3	I	85	I
K47+690	J _{1-2z}	54	0.15	1	0	15	1.25	1.2	0.9	72.5	II	87.3	I	86.6	I	85	I
K47+720	J _{1-2z}	53.5	0.15	1	0	15	1.25	1.2	0.9	63.5	II	76.0	II	75.4	II	80	II
K48+050	J _{2x}	49.5	0.15	0.85	6	15	1.23	1	0.9	63.7	II	73.5	II	75.3	II	70	II
K48+620	J _{2x}	70.5	0.15	1	0	15	1.23	1	0.9	85.5	I	97.3	I	99.9	I	70	II
K48+900	J _{2xs}	45	0.15	1	0	15	1.24	0.8	0.9	60	III	70.1	II	70.8	II	65	II
K49+270	J _{2xs}	46.5	0.15	1	0	15	1.22	0.8	0.9	61.5	II	68.2	II	71.8	II	65	II
K49+920	J _{2xs}	39.5	0.15	1	0	15	1.31	0.8	0.7	54.5	III	76.3	II	66.7	II	65	II
K49+930	J _{2xs}	48	0.15	1	0	15	1.28	0.8	0.9	63	II	83.6	I	76.6	II	70	II
K500+200	J _{2xs}	48.5	0.15	1	0	15	1.28	0.8	0.7	63.5	II	84.4	I	77.2	II	70	II
K314+800	T _{2b} ³	54	0.15	1	0	15	1.18	0.8	0.9	69	II	65.3	II	78.5	II	80	II
K315+200	T _{2b} ³	41.6	0.15	1	25	15	1.18	1	0.7	52.9	III	51.2	III	61.3	II	70	II
K315+700	T _{2b} ³	43	0.15	1	25	15	1.18	1	0.9	58	III	55.1	III	65.6	II	70	II
K316+075	T _{2b} ³	37.3	0.15	1	25	15	1.19	1	0.9	52.3	III	51.4	III	59.2	III	65	II
K316+300	T _{2b} ³	48.3	0.15	1	6	15	1.19	1	0.7	62.4	II	62.0	II	71.8	II	65	II
K316+450	T _{2b} ³	40	0.15	1	0	0	1.19	1	0.7	40	IV	39.0	IV	47.4	III	40	IV
K316+650	T _{2b} ³	47	0.15	1	25	15	1.19	1	0.9	58.3	III	59.5	II	67.8	II	70	II
K318+400	T _{2b} ²	45.4	0.15	0.15	60	15	0.97	1	0.9	59.1	III	71.9	II	57.6	II	65	II
K318+600	T _{2b} ²	47	0.15	1	25	15	1.25	1	0.7	58.3	III	73.2	II	71.3	II	65	II
K319+650	T _{2b} ²	45.2	0.15	1	0	15	1.25	1	0.7	60.2	II	73.5	II	71.7	II	65	II
K319+850	T _{2b} ²	47.7	0.15	1	0	15	1.25	1	0.7	62.7	II	76.7	II	74.8	II	70	II
K320+500	T _{2b} ²	40.7	0.15	1	0	15	1.25	1	0.7	55.7	III	67.7	II	66.0	II	65	II
K321+550	T _{2b} ²	38.7	1	1	0	15	1.25	1	0.9	53.7	III	65.1	II	63.5	II	65	II
K321+900	T _{2b} ³	48.2	0.15	0.85	50	15	0.97	1	0.7	56.8	III	72.9	II	57.1	III	60	III
K322+450	T _{2b} ²	35.7	1	1	0	15	1.25	1	0.7	50.7	III	61.2	II	59.8	III	60	III
K323+200	T _{2b} ²	48.5	0.15	1	25	15	1.25	1	0.7	59.8	III	75.1	II	73.2	II	70	II
K323+450	T _{2b} ²	44.5	0.15	1	0	15	1.25	1	0.7	59.5	III	72.6	II	70.9	II	65	II

注:表中 J_{1z} 为弱~强风化泥质页岩、粉砂岩不等厚互层;T_{3xj} 为弱风化中~厚层砂岩;T_{2b³} 为弱~强风化中~厚层泥质灰岩、石灰岩,局部段为泥质灰岩、泥灰岩夹钙质页岩不等厚互层;J_{1-2z} 为弱风化厚层粉砂岩夹泥岩、页岩及生物碎屑灰岩;J_{2x} 为弱风化中~厚层泥岩与长石英砂岩、石英砂岩;J_{2xs} 为薄~中厚层泥岩夹泥质粉砂岩、石英砂岩;T_{2b²} 为强风化粘土岩夹粉砂岩和泥灰岩。

2 HBSMR 体系的提出

众所周知,由于三峡库区气候湿热,岩体风化作用较强^[6],加之未来水库蓄水完成后,每年有一次 30m 落差的水位调节,并有库水波浪冲刷掏蚀作用,对岩体稳定性势必造成很大影响,尤其是对目前风化程度较高且在长期内外动力地质作用下已处于欠稳定的边坡,影响更为严重。而目前的分级体系中并未考虑这些因素的影响或考虑不足。因此,虽然前面对 HSMR 体系在下边坡中的适用性进行了充分验证和肯定,但考虑到水及湿热的气候环境条件的影响,需要考虑再次对 HSMR 进行改进,并据此建立公路岸坡稳定性分级体系 HBSMR,但为了对比分析,也将改进应用于其他分级体系。具体如下:

由 SMR、CSMR、HSMR 体系的表达式可知,它们均是在 RMR 体系的基础上,加入了一些修正系数后得出的新体系,因此,本文也从最基础的 RMR 体系着手进行改进。RMR 体系对待研究的地质体主要考虑如下 5 大因素^[3]:(1)岩石材料强度(单轴抗压强度或点荷载强度);(2)岩石质量指标(RQD);(3)不连续面间距;(4)不连续面条件;(5)地下水条件。

通过调查研究及专家咨询认为,在这 5 个条件中,库水作用直接影响最大的是(1)、(4)与(5)3 个条件,因此重点考虑对该 3 个条件进行修正。

对于条件(1),即岩石材料强度,考虑将岩石强度或评分结果乘以其相应的软化系数。

对于条件(4),即不连续面条件,主要考虑不连续面及其充填物的抗风化能力,对不同岩类分别赋以相应修正系数。有 2 种考虑途径,一是考虑组成岩体的岩石坚硬程度,可从定性定量两方面来确定(见表 3~表 5);二是考虑不连续面的结合程度(见表 6)。本文建议应用前者,当然也可在具体使用时联合对比应用。

不连续面条件修正系数 表 3

岩石类型	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩
修正系数	≥0.9	≥0.7, <0.9	>0.5, <0.7	≤0.5

岩石坚硬程度的定性划分^[7] 表 4

名 称		定 性 鉴 定	代表性岩石
硬 质 岩	坚硬岩	锤击声清脆,有回弹,振手,难击碎; 浸水后,大多无吸水反应	未风化~微风化的; 花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等
	较坚硬岩	锤击声清脆,有轻微回弹,稍振手,较难击碎; 浸水后,有轻微吸水反应	1 弱风化的坚硬岩;2 未风化~微风化的; 熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂岩等
软 质 岩	较软岩	锤击声不清脆,无回弹,较易碎; 浸水后,指甲可刻出印痕	1 强风化的坚硬岩;2 弱风化的较坚硬岩;3 未风化~微风化的; 凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等
	软岩	锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎;极软岩手捏可碎 浸水后,手可掰开;极软岩可捏成团	1 弱风化的坚硬岩;2 未风化~强风化的较坚硬岩; 3 弱风化较软岩;4 未风化的泥岩等;5 全风化的各种岩石及半成岩

岩石单轴饱和抗压强度 R_c 与岩石坚硬程度定性划分的对应关系^[7](MPa) 表 5

R_c	> 60	60 ~ 30	30 ~ 15	< 15
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩

岩体不连续结构面结合程度划分^[7] 表 6

结合好	(1)张开度小于 1mm,无充填物;(2)张开度 1 ~ 3mm,为硅质或铁质胶结;(3)张开度大于 3mm,结构面粗糙,为硅质胶结
结合一般	(1)张开度 1 ~ 3mm,为钙质或泥质胶结;(2)张开度大于 3mm,结构面粗糙,为铁质或钙质胶结
结合差	(1)张开度 1 ~ 3mm,结构面平直,为泥质或泥质和钙质胶结;(2)张开度大于 3mm,多为泥质或岩屑充填
结合很差	泥质充填或泥夹岩屑充填,充填物厚度大于起伏差

注:此表如与 RMR 体系分级中的相关内容有冲突,请以 RMR 体系原分级标准为主。

对于条件(5),主要从岸坡岩体渗透性进行考虑,可利用渗透系数(K)进行评价(见表 7)。

地下水条件修正系数(m/d) 表 7

渗透系数(k)	> 1	0.186 ~ 1	0.109 ~ 0.186	< 0.109
修正系数	0.9	0.7	0.5	0.3

注:渗透系数 $K=1\text{m/d}$ 是查阅三峡库区有关资料认为,当渗透系数大于该值时水的升降影响较小,也有认为该值是 2m/d 的^[8];而 0.186、0.109 两值分别是根据三峡水库每年内月库水升降调度算出的最大与最小渗透系数。

另外,也可考虑利用给水度(μ)进行评价,在一定条件下它与渗透系数存在如下相关关系^[9]:

$$\mu = 1.137n(0.0001175)^{0.067(6+\lg k)} \tag{4}$$

式中, n 为孔隙率; k 为渗透系数(cm/s)。

据此对 RMR 在考虑库区湿热气候环境条件并考虑库水作用下进行修正,评价结果与定性预测结果对比,SMR 偏差 40.5%,CSMR 偏差 29.7%,HSMR 偏差 18.9%(表 8)。评价结果充分说明,修正后的 HSMR 体系是合理的,而为了与前者区别,此处称之为岸坡稳定性分级体系 HBSMR。

考虑湿热气候及库水作用时各体系对岸坡稳定性的预测结果(即蓄水后) 表 8

里程桩号	修正系数			RMR	SMR		CSMR		HSMR		ER	
	条件(1)	条件(4)	条件(5)									
K40+000	0.54	0.8	0.7	38.4	53.4	III	63.4	II	62.9	II	65	II
K40+100	0.54	0.8	0.7	40.5	55.5	III	66.0	II	65.5	II	65	II
K40+700	0.69	0.8	0.7	40.9	55.9	III	66.5	II	66.0	II	65	II
K40+980	0.69	0.8	0.7	43.7	58.0	III	74.8	II	70.0	II	75	II
K41+080	0.78	0.9	0.9	45.7	58.3	III	63.5	II	68.7	II	70	II
K41+280	0.66	0.9	0.5	40.0	54.1	III	55.4	III	62.1	II	70	II
K45+400	0.66	0.9	0.5	36.7	51.7	III	48.2	III	58.0	III	65	II
K46+200	0.66	0.9	0.5	43.3	43.3	III	45.2	III	52.0	III	55	III

续上表

里程桩号	修正系数			RMR	SMR		CSMR		HSMR		ER	
	条件(1)	条件(4)	条件(5)									
K46 + 260	0 78	0 9	0 9	56 7	70 8	II	79 2	II	83 6	I	85	I
K47 + 720	0 66	0 6	0 7	42 6	57 6	III	68 6	II	68 1	II	75	II
K47 + 690	0 66	0 6	0 7	47 3	62 3	II	74 5	II	73 9	II	75	II
K47 + 500	0 66	0 6	0 7	47 4	62 4	II	74 6	II	74 0	II	75	II
K47 + 430	0 66	0 6	0 7	42 9	57 0	III	68 3	II	67 7	II	70	II
K48 + 050	0 57	0 5	0 4	38 9	48 8	III	58 0	III	59 4	III	65	III
K48 + 620	0 79	0 6	0 4	55 0	70 0	II	80 8	I	82 8	I	70	II
K48 + 900	0 57	0 5	0 3	30 6	45 6	III	52 5	III	53 0	III	60	III
K49 + 270	0 57	0 5	0 3	32 1	47 1	III	51 7	III	54 3	III	55	III
K49 + 920	0 57	0 5	0 3	27 6	42 6	III	57 9	III	51 2	III	55	III
K49 + 930	0 57	0 5	0 3	33 1	48 1	III	62 4	II	57 5	III	55	III
K500 + 200	0 57	0 5	0 3	34 1	49 1	III	63 8	II	58 8	III	60	III
K314 + 800	0 8	0 8	0 5	38 6	49 9	III	48 4	III	58 3	III	70	II
K315 + 200	0 8	0 8	0 5	34 4	45 7	III	44 4	III	52 9	III	55	III
K315 + 700	0 8	0 8	0 3	33 1	44 4	III	43 2	III	51 3	III	65	II
K316 + 075	0 8	0 8	0 5	29 9	44 9	III	44 1	III	50 5	III	60	III
K316 + 300	0 8	0 8	0 5	40 3	54 4	II	54 1	III	62 3	II	60	III
K316 + 450	0 8	0 8	0 5	32 0	32 0	IV	31 2	IV	37 9	IV	35	IV
K316 + 650	0 8	0 8	0 5	38 2	49 5	III	50 5	III	57 2	III	65	II
K318 + 400	0 68	0 5	0 3	29 0	42 7	III	51 0	III	41 8	III	55	III
K318 + 600	0 68	0 5	0 3	33 1	44 4	III	55 2	III	53 9	III	55	III
K319 + 650	0 68	0 5	0 3	29 8	44 8	III	53 6	III	52 4	III	50	III
K319 + 850	0 68	0 5	0 3	32 3	47 3	III	56 8	III	55 5	III	60	III
K320 + 500	0 68	0 5	0 3	29 3	44 3	III	52 9	III	51 8	III	60	III
K321 + 550	0 68	0 5	0 3	25 8	40 8	III	48 4	III	47 4	III	50	III
K321 + 900	0 8	0 8	0 5	39 4	48 0	III	61 5	II	48 6	III	50	III
K322 + 450	0 68	0 5	0 3	25 3	40 3	III	47 8	III	46 7	III	50	III
K323 + 200	0 68	0 5	0 3	30 8	44 5	III	53 7	III	52 4	III	65	II
K323 + 450	0 68	0 5	0 3	31 1	46 1	III	55 3	III	54 0	III	55	III

在此基础上,针对不同岩性提出了降雨及库水综合影响系数 W_c (Water coefficient), 其表达式为:

$$W_c = \frac{\text{修正后的 RMR 值}}{\text{修正前的 RMR 值}} \quad (5)$$

此时,HBSMR 体系之计算公式(即针对岸坡)如式(6)。另外,为了对比验证,同时将综合影响系数应用到 SMR-CSMR 体系,如式(7)及式(8),但为了区别于修正前的体系,此处命名为 BSMR(Bank Slope Mass Rating)、CBSMR(Chinese system for BSMR)。

$$HSMR = W_c \xi RMR - \gamma \lambda (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \tag{6}$$

$$BSMR = W_c RMR - (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \tag{7}$$

$$CBSMR = W_c \xi RMR - \lambda (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \tag{8}$$

由此,本文对表 2 及表 8 中 37 个边坡进行了统计计算,并求得了不同岩类降雨及库水综合影响系数 W_c (表 9)。同时,对 12 个岸坡进行了验证,BSMR 偏差 41.7%,CSMR 偏差 33.3%,HSMR 偏差 16.7%(表 10)。因此,根据评价结果,最终建议在考虑降雨及库水作用时,对下边坡(即岸坡)评价可在参考 CBSMR 体系评价结果的同时,采用 HBSMR 体系。

综合影响系数 W_c 表 9

坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩
W_c	0.9	0.85	0.8	0.7
统计边坡数量(个)	5	11	5	16

利用综合影响系数 W_c 时各体系对岸坡稳定性的预测结果(蓄水后) 表 10

里程桩号	W_c	RMR	SMR		CSMR		HSMR		ER	
K40+200	0.8	33.2	48.2	III	55.7	III	56.1	III	65	II
K41+180	0.9	49.5	64.5	II	67.5	II	74.6	II	75	II
K45+300	0.9	42.3	54.3	III	50.4	III	61.8	II	65	II
K46+170	0.9	41.4	41.4	III	43.9	III	49.9	III	55	III
K46+450	0.9	51.8	68.9	II	78.5	II	80.9	I	85	I
K47+580	0.8	43.2	58.2	III	68.2	II	68.6	II	70	II
K48+200	0.7	43.4	41.4	III	52.7	III	44.5	III	50	III
K49+050	0.7	32.6	47.6	III	55.9	III	55.6	III	55	III
K49+350	0.7	32.6	47.6	III	58.4	III	56.1	III	55	III
K314+550	0.85	38.9	50.2	III	49.0	III	58.8	III	65	II
K315+500	0.7	31.6	46.6	III	44.6	III	52.3	III	55	III
K323+050	0.7	31.3	45.4	III	54.9	III	53.6	III	55	III

3 结论

(1)边坡岩体分级体系具有应用方便、指标易于提取等优点。实例对比分析证明,结合公路边坡自身特点提出的公路边坡分级体系 HSMR,不但适用于公路上边坡,同时也很适用于下边坡,为公路岸坡稳定性分级体系的提出奠定了基础。

(2)考虑到三峡库区湿热的气候环境条件以及蓄水完成后每年一次落差达 30m 的水位调节对岸坡岩体的影响效应,通过专家咨询以及实例岸坡分析对比,对公路岩质岸坡稳定性分级体系 HSMR 进行了修正,提出了针对公路岸坡的稳定性分级体系 HBSMR,并提出了地下水综合影响系数,为定量评价岩质岸坡稳定性提供了便利。

(3)HBSMR 体系的提出,主要是针对 RMR 体系中的 3 个最易受水影响的条件进行的修