

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.03.010

山区公路崩塌地质灾害危险性分级系统 (RFRS)

苏天明^{1,3}, 王根龙^{2,3}, 叶剑渊², 代婧瑜¹, 张艳鸽¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 针对我国山区公路沿线岩质边坡崩塌评价问题, 提出了公路崩塌地质灾害危险性分级系统 (RFRS)。在对地形因子、公路因子、地质因子、气候因子、崩塌历史因子和防护措施加权乘子6项指标定性分析和定量化的基础上, 制订了公路崩塌地质灾害危险性分级依据、分级标准。通过对云南省水富—麻柳湾高速公路沿线崩塌地质灾害进行RFRS易发区评价, 并与崩塌地质灾害易发区评价方法进行对比分析, 结果表明: (1) 复兴段沿线崩塌或潜在崩塌灾害危险性等级达到B级的路段多达4.3 km, 建议对达到B级以上的路段定期安排专业人员进行数据采集和分析; (2) RFRS分级系统具有考虑因素全面、野外填表操作方便、分级科学、便于实际应用的优点。

关键词: 道路工程; 崩塌灾害; 高速公路; 危险性分级; 地质因子; 岩质边坡

中图分类号: TU45; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 03-0051-07

Rock Fall Rating System for Highway in Mountain Area

SU Tianming^{1,3}, WANG Genlong^{2,3}, YE Jianyuan², DAI Jingyu¹, ZHANG Yange¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an Shaanxi 710054, China;

3. Key Laboratory of Engineering Geo-Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In view of the collapse evaluation problem of rock slope along the highway in the mountain area, the Rock Fall Rating System (RFRS) was put forward. Based on the quantitative analysis and qualitative analysis for the six indexes which include topography factor, highway factor, geology factor, climate factor, rock fall history factor and a weighted multiplier of protective measures, both grading basis and grading criteria for RFRS were worked out. As a case study, the rock fall geological hazard susceptibility along Shuifu-Maliuwan expressway in Yunnan Province was evaluated by the RFRS method. At the same time, contrastive analysis with the method of zoning and evaluation for collapse susceptibility was carried out. The result shows that (1) the length of grade B for Fuxing section of Shuifu-Maliuwan expressway is up to 4.3 km, it is suggested that professional staff should be arranged to collect and analysis the related data termly; (2) the RFRS method has many advantages, such as comprehensive factors, convenience operation, scientific grading and practical application.

Key words: road engineering; rock fall geological hazard; expressway; risk rating; geological factor; rock sloap

0 引言

我国在公路沿线崩塌地质灾害危险性评价方面,

多采用模糊综合评判法、层次分析法和地理信息系统 (GIS) 方法, 而在公路岩质边坡崩塌危险性分级系统的标准化和应用方面开展工作较少^[1-9]。国外

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目 (200831822353)

作者简介: 苏天明 (1970-), 男, 江苏淮安人, 博士. (wang2006@mail.iggcas.ac.cn)

早在20世纪90年代就已经开始了公路崩塌地质灾害危险性分级的研究和应用^[10-12]。如美国的 Pierson 等(1990)提出了一套针对公路崩塌落石风险评估准则(见表1),称之为 Rock Fall Hazard Rating System (RHRS)^[13],主要是以地形特征、地质概况、气象、岩块尺寸及崩塌规模大小、崩塌历史等为因子,进行公路崩塌落石风险评估。各项目评估量化分数则以4个等级由3的 n 次方(3^n)表示,目的是凸显量化分数的差异性,在使用过程中采用跳阶的评分标准很有必要性。该系统在大约3000个岩崩地段进行了试验,其中的1340个被收录到俄勒冈州

的崩塌落石危险性分级系统的数据库中。崩塌落石危险性分级系统在美国俄勒冈州发展的同时,Stover(1992)在科罗拉多州运输部也设计了一套系统,对州级公路中长期有岩崩问题的地段进行识别和分级^[14]。

在前人研究基础上,借鉴岩体质量分级系统(RMR)和美国的公路岩质边坡崩塌危险性分级系统(RHRS),在沿用了沟渠作用、平均交通风险、刹车反应距离、崩塌历史等因子后,通过扩展地形因子,引进岩体结构,量化气象水文因子,考虑防护措施等因子,提出了公路崩塌危险性分级系统(RFRS)。

表1 美国俄勒冈州崩塌危险性分级标准(据 Pierson 等, 1990, 2002)

Tab1 Rock fall hazard rating criterion used in Oregon (according to Pierson, et al. 1990, 2002)

类别		分级标准和打分/分				
		3	9	27	81	
边坡高度/cm		762	1 524	2 286	3 048	
沟渠作用		很好的捕获崩塌体	部分捕获崩塌体	少量捕获崩塌体	不能捕获崩塌体	
平均交通风险		25% 时间	50% 时间	75% 时间	100% 时间	
刹车反应距离		充足距离,最短设计值 (100%)	中等距离,最短设计值 (80%)	有限距离,最短设计值 (60%)	非常有限距离,最短设计值 (40%)	
道路宽度(含铺砌的路肩)/cm		1 341.12	1 097.28	853.44	609.6	
地质特征	状况1	地质构造	不连续结构面,倾向有利边坡稳定	不连续结构面,随机倾向	不连续结构面,倾向不利边坡稳定	连续结构面,倾向不利边坡稳定
		结构面状态	粗糙不规则	波状起伏	平坦	粘土充填或见擦痕
	状况2	地质构造	微弱差异侵蚀特征	偶见差异侵蚀特征	多处差异侵蚀特征	大量差异侵蚀特征
		差异风化	差异性小	中等差异性	差异性大	极端差异
岩块尺寸/cm		30.48	60.96	91.44	121.92	
崩塌体积/m ³		0.76	4.59	6.88	9.17	
气候和边坡中水的赋存		低于中等强度降雨或无冰冻期边坡干燥	中等强度降雨或冰冻期短或边坡间断有水	高强度降雨或长冰冻期或边坡一直有水	高强度降雨和长冰冻期或边坡一直有水和长的冰冻期	
岩崩历史		很少岩崩	偶尔岩崩	较多岩崩	经常岩崩	

1 RFRS 崩塌危险性分级系统

1.1 分级指标体系

公路崩塌地质灾害的危险性分级标准(Rock Fall Rating System, 简称为 RFRS, 表2),包括地形、公路、地质、气候、崩塌历史和防护措施等6项因子,包含12个打分项和1个加权乘子项,具有考虑因素全面、野外填表操作方便、分级科学、便于工程师或公路维护人员实际应用的优点。

1.2 分级指标

1.2.1 地形因子(I)

(I) 地形因子: RFRS 分级系统中,地形因子有3个打分项,分别是坡高、坡度和坡长。这3个指标可以通过罗盘、皮尺、测距仪和水准仪进行实测。坡高的计算公式为:

$$H = \frac{\sin\alpha\sin\beta X}{\sin(\alpha - \beta)} + H_1, \quad (1)$$

式中, H_1 为测量仪器高度; X 为 α 和 β 角之间的距离(图1)。

表2 公路岩质边坡崩塌危险性分级 (RFRS) 标准
Tab.2 Criterion in Rock Fall Rating System (RFRS) for highway

类别		分级标准和打分			
		3分	9分	27分	81分
地形因子 (I)	坡高(I ₁)/m	5~15	15~25	25~35	>35
	坡度(I ₂)/(°)	15~25	25~35	35~50	>50
	坡长(评估段)(I ₃)	<70	70~150	150~230	>230
公路因子 (II)	平均交通风险(II ₁)	25% 时间	50% 时间	75% 时间	100% 时间
	可视距离与反应距离比(II ₂)	充足距离, 最低限度设计距离的 100%	适度距离, 最低限度设计距离的 80%	有限距离, 最低限度设计距离的 60%	非常有限距离, 最低限度设计距离的 40%
	道路宽度(包括铺砌的路肩)(II ₃)/m	>12	9~12	6~9	<6
	沟渠作用(II ₄)	完全捕获崩塌体	大部分捕获崩塌体	小部分捕获崩塌体	不能捕获崩塌体
地质因子 (III)	岩体结构(III ₁)	整体块状结构、巨厚层状结构、厚层状结构	中厚层状结构、互层状结构(近水平或倾内)	中厚层状结构、互层状结构(倾外)、薄层状结构	碎裂结构、散体结构
	结构面状态(III ₂)	粗糙不规则	波状起伏光滑	平直光滑	粘土充填或见擦痕
	滚石尺寸或崩塌体积(III ₃)	滚石尺寸/m < 0.3 崩塌体积 < 2	0.3~0.6m 2~6	0.6~0.9 6~10	>1.2 >10
	气象水文因子(IV)	三日累积降雨量和边坡中水的赋存(IV)	<30 mm 降雨, 无冰冻期, 边坡干燥	30~60 mm 降雨或冰冻期短或边坡间断有水	60~180 mm 降雨或长冰冻期或边坡一直有水
崩塌历史因子(V)	崩塌历史(V)	很少岩崩	偶尔岩崩	较多岩崩	经常岩崩
防护措施加权(VI)	加权乘子 防护措施成效(VI)	0.7 有 2 项防护措施, 且防护效果良好	0.8 有 1 项防护措施, 且防护效果好	0.9 有 1 项防护措施, 且防护效果不好	1.0 无防护措施

注: 不包括加权乘子项, 打分项共有 12 项, 满分为 972 分。

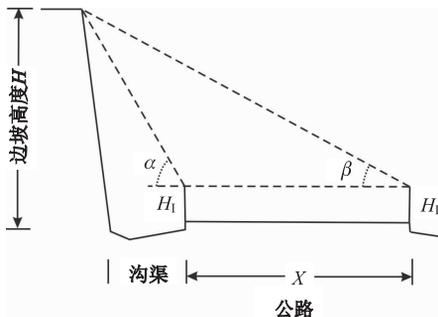


图1 边坡高度计算简图

Fig.1 Calculation diagram of slope height

1.2.2 公路因子 (II)

RFRS 分级系统中, 公路因子共有 4 个打分项, 分别是平均交通风险、可视距离与反应距离比、道路宽度(包括铺设的路肩宽度)和沟渠作用。

(1) 平均交通风险 AVR: 由日平均交通量、边

坡长度和公路限速 3 个量来确定, 计算公式为:

$$AVR = \frac{\text{日平均交通量}(ADT) \times \text{边坡长度} / 24}{\text{限速}} \times 100\% \quad (2)$$

得到平均交通风险 AVR 后, 根据式 (3) 来计算平均交通风险 AVR 的得分, 或通过表 3 查表取得。

$$AVR \text{ 得分} = 3^{\frac{AVR(\%) - 25}{25}} \quad (3)$$

(2) 可视距离与反应距离比 DSD: 由实测获取的崩塌段可视距离和查表得到的限速段刹车反应距离(表 4)来确定, 其计算公式为式 (4)。山区公路因弯道多、起伏大, 因此在车辆在限速行驶时, 需要比平原上更长的刹车反应距离(图 2)。

$$DSD = \frac{\text{可视距离}}{\text{刹车反应距离}} \times 100\% \quad (4)$$

得到可视距离与反应距离比 DSD 后, 根据式 (5) 来计算 DSD 得分, 或通过表 5 查表取得。

表 3 平均交通风险 AVR (%) 得分统计表

Tab. 3 Scoring statistics of average traffic risk

AVR/%	AVR 得分						
9	1	32	4	55	11	78	31
10	2	33	4	56	12	79	32
11	2	34	4	57	12	80	34
12	2	35	5	58	13	81	35
13	2	36	5	59	13	82	37
14	2	37	5	60	14	83	38
15	2	38	5	61	15	84	40
16	2	39	6	62	15	85	42
17	2	40	6	63	16	86	44
18	2	41	6	64	17	87	46
19	2	42	6	65	17	88	48
20	2	43	7	66	18	89	50
21	3	44	7	67	19	90	52
22	3	45	7	68	20	91	55
23	3	46	8	69	21	92	57
24	3	47	8	70	22	93	60
25	3	48	8	71	23	94	62
26	3	49	9	72	24	95	65
27	3	50	9	73	25	96	68
28	3	51	9	74	26	97	71
29	4	52	10	75	27	98	74
30	4	53	10	76	28	99	78
31	4	54	11	77	29	100	81

$$DSD \text{ 得分} = 3^{\frac{120-DSD(\%)}{20}} \quad (5)$$

表 4 山区公路限速与刹车反应距离对应表

Tab. 4 Corresponding table between speed limit and braking reaction distance for mountain road

山区限速/(km · h ⁻¹)	40	50	60	70	80	90	100
刹车反应距离/m	110	140	170	200	230	270	310



图 2 驾驶员发现路面滚石后的反应距离

Fig. 2 Reaction distance after the driver finding the rock on road

表 5 可视距离与反应距离比得分表

Tab. 5 Scoring table of the ratio of visual range to reaction distance

DSD/%	DSD 得分						
40	81	59	29	78	10	97	4
41	77	60	27	79	10	98	3
42	73	61	26	80	9	99	3
43	69	62	24	81	9	100	3
44	65	63	23	82	8	101	3
45	62	64	22	83	8	102	3
46	58	65	21	84	7	103	3
47	55	66	19	85	7	104	2
48	52	67	18	86	6	105	2
49	49	68	17	87	6	106	2
50	47	69	16	88	6	107	2
51	44	70	16	89	5	108	2
52	42	71	15	90	5	109	2
53	40	72	14	91	5	110	2
54	38	73	13	92	5	111	2
55	36	74	13	93	4	112	2
56	34	75	12	94	4	113	1
57	32	76	11	95	4		
58	30	77	11	96	4		

(3) 沟渠作用：是落石或崩塌体能否到达公路的一项评估指标，它与边坡的高度、坡度，沟渠的深度、宽度和形状，落石或崩塌的体积、运动方式等均有关系。沟渠的捕获作用（图 3、图 4）分为 4 个等级，依次是完全捕获、大部分捕获、小部分捕获和不能捕获，对应 3 分、9 分、27 分和 81 分 4 个得分标准。当已知坡高、坡度和沟渠宽度时，也可以通过查表 6 对沟渠作用进行打分。



图 3 沟渠宽度充足的直立边坡图

Fig. 3 Vertical slope with adequate ditch width



图4 沟渠宽度不充足的近直立边坡

Fig. 4 Steep slope with inadequate ditch width

表6 沟渠作用得分表

Tab. 6 Scoring table of ditch function

坡高/ m	边坡坡度 沟渠作用得分	1:1	1:0.5	1:0.25	直立
		沟渠宽度/m			
<10	3	>4.9	>4.3	>3.0	>3.7
	9	3.7~4.9	3.7~4.3	2.4~3.0	3.0~3.7
	27	2.7~3.4	2.7~3.4	1.5~2.1	2.4~2.7
	81	<2.7	<2.7	<1.5	<2.4
10~15	3	>7.9	>6.1	>3.7	>4.3
	9	5.8~7.6	4.6~6.1	2.7~3.7	3.7~4.0
	27	4.3~5.5	3.4~4.3	1.8~2.4	3.0~3.4
	81	<4.3	<3.4	<1.8	<3.0
15~20	3	>8.5	>7.6	>8.5	>4.9
	9	6.1~8.2	5.5~7.6	5.8~8.2	4.0~4.6
	27	4.9~5.8	4.3~5.2	4.0~5.5	3.4~3.7
	81	<4.9	<4.3	<4.0	<3.4
>20	3	>11.6	>8.2	>11.0	>5.5
	9	8.5~11.6	5.8~7.9	7.6~11.0	4.6~5.2
	27	5.8~8.2	4.3~5.5	5.5~7.3	3.7~4.3
	81	<5.8	<4.3	<5.5	<3.7

1.2.3 地质因子 (III)

RFRS 分级系统中, 地质因子共有 3 个打分项, 分别是岩体结构、结构面状态、岩块大小或崩塌体积。岩体结构分为 4 个等级, 分别是: (1) 整体块状结构、巨厚层状结构、厚层状结构; (2) 中厚层状结构、互层状结构 (近水平或倾内); (3) 中厚层状结构、互层状结构 (倾外)、薄层状结构; (4) 碎裂结构、散体结构。岩体结构特征参考表 7。结构面状态的 4 个划分等级分别为粗糙不规则→波状起伏光滑→平直光滑→粘土充填或见擦痕。滚石大小或崩塌体积打分项要根据现场判断来确定, 如果属于个别滚石, 则按照最大尺寸进行打分; 如果属于局部崩塌, 则按照崩塌体积打分, 总之只能选择其

中 1 项进行打分。

表7 岩体结构分类表

Tab. 7 Grading of rock mass structures

类型	亚类	岩体结构特征
整体块状结构	整体状结构	岩体完整, 呈巨块状, 结构面不发育, 间距大于 100 cm
	块状结构	岩体较完整, 呈块状, 结构面轻度发育, 间距一般 100~50 cm
	次块状结构	岩体较完整, 呈次块状, 结构面中等发育, 间距 50~30 cm
层状结构	巨厚层状结构	岩体完整, 呈巨厚层状, 结构面不发育, 间距大于 100 cm
	厚层状结构	岩体较完整, 呈厚层状, 结构面轻度发育, 间距 100~50 cm
	中厚层状结构	岩体较完整, 呈中厚层状, 结构面中等发育, 间距一般 50~30 cm
	互层状结构	岩体较完整或完整性差, 呈互层状, 结构面较发育或发育, 间距一般 30~10 cm
碎裂结构	薄层状结构	岩体完整性差, 呈薄层状, 结构面发育, 间距一般小于 10 cm
	镶嵌碎裂结构	岩体完整性差, 岩块镶嵌紧密, 结构面较发育到很发育, 间距一般 30~10 cm
散体结构	碎裂结构	岩体较破碎, 结构面很发育, 间距一般小于 10 cm
	碎块状结构	岩体破碎, 岩块夹岩屑或泥质物
	碎屑状结构	岩体破碎, 岩屑或泥质物夹岩块

1.2.4 气象水文因子 (IV)

气象水文因子包含降雨量、冰冻期、地下水 3 个方面的因素, 分为 4 个等级: (1) 小于 30 mm 降雨, 无冰冻期, 边坡干燥; (2) 30~60 mm 降雨或冰冻期短或边坡间断有水; (3) 60~180 mm 降雨或长冰冻期或边坡一直有水; (4) 超过 180 mm 降雨和长冰冻期或边坡一直有水和较长冰冻期。

1.2.5 崩塌历史因子 (V)

崩塌历史因子指评估路段过去 5 a 内曾发生的崩塌事件次数或发生频率, 可分为 4 个等级: (1) 很少岩崩, 近 5 a 发生崩塌 1 次以下; (2) 偶尔岩崩, 近 5 a 发生崩塌两次; (3) 较多岩崩, 近 5 a 发生崩塌 3 次; (4) 经常岩崩, 近 5 a 发生崩塌 3 次以上。

1.2.6 防护措施加权乘子 (VI)

防护措施加权乘子: 根据防护措施成效选取加权乘子, 当有 2 项防护措施且防护效果良好时, 加权乘子取 0.7; 当有一项防护措施且防护效果好时,

加权乘子取 0.8；当有一项防护措施且防护效果不好时，加权乘子取 0.9；没有防护措施时，加权乘子取 1.0。

2 崩塌危险性等级划分

RFRS 公路崩塌危险性分级的等级划分参考了美国公路所采用的，由 Pierson 提出的 RHRS 评估准则，以 110 分为分区区间，分为 A、B、C 共 3 个级别。其中，RFRS 得分 >440 分的被定为 A 级，表明崩塌发生概率为 100%，且崩塌体能到达公路，建议立即治理；RFRS 得分 <110 分的被定为 C 级，表明潜在崩塌发生概率几乎为 0，无需处理；RFRS 得分介于 110~440 分之间的被定为 B 级，又可进一步划分为 B⁺、B、B⁻ 这 3 个级别，代表了潜在崩塌发生概率较高、中等、很小 3 个等级，分别对应相应的处理建议（表 8）。此外，在具体使用过程中，评分区间的划分还可以根据公路维护单位的需求及道路状况进行适当调整。

表 8 RFRS 公路边坡崩塌危险性等级

Tab. 8 Risk grading of highway rock slope collapse by RFRS method

危险等级	评估得分/分	危险性	处理建议
A 级	>440	崩塌发生概率 100%，且崩塌体能到达公路	立即治理
B ⁺	330~440	崩塌发生概率较高，且崩塌体能到达公路	优先治理
B 级	220~330	崩塌发生概率中等，且崩塌体可能会到达公路	建议治理
B ⁻	110~220	崩塌发生概率很小，但如果发生，崩塌体可能会到达公路	适时治理
C 级	<110	潜在崩塌发生概率几乎为 0	无需处理

3 工程应用

水麻高速公路起于云南省水富县城南端伏龙口，北接四川宜宾高速公路，止于麻柳湾，南接昭麻 2 级公路，是国道主干线二连浩特至河口公路云南境内的第 1 段。水麻高速公路全长 135 km，其中水富县境内 48 km，盐津县境内 63 km，大关县境内 24 km，总投资 92 亿元，为山区 4 车道高速公路，桥梁隧道占公路全长的 49.7%。

全线按山岭区 4 车道高速公路标准建设，路基宽 22.5 m，行车道宽 4×3.5 m。所经地区最低海拔 275 m（路线起点伏龙口处），最高海拔 1 207 m（凉风凹隧道 k47+760 处），相对高差 932 m。

水—麻高速公路工程于 2004 年开工，2008 年正式建成通车，在修建过程中因边坡开挖多处路段都发生过崩塌灾害，后期公路运营的 4 a 中，多次发生边坡崩塌现象，多有造成公路堵塞、路面破坏的现象（见图 5、图 6）。



图 5 水麻公路崩塌堵塞公路

Fig. 5 Rock fall blocked Shuifu-Maliuwan expressway



图 6 水麻公路崩塌砸毁路面

Fig. 6 Rock fall destroyed Shuifu-Maliuwan expressway

通过对水富—麻柳湾高速公路现场调查，采用文中方法对太平段、复兴段、大石盘段、老堡—双河口段、龙台段、串丝段、普洱渡段、万古段、下银厂段、吉利段、喇叭溪段、麻柳湾段的公路边坡进行了公路崩塌危险性分级（RFRS）。以复兴段为例，该段全长 6.3 km，山高谷深，V 字形沟谷发育，属强侵蚀的峡谷地貌，沿线崩塌或潜在崩塌灾害危险性等级达到 B 级的路段多达 4.3 km，占到该段公路长度的 68%。

为了验证文中提出的方法，笔者也采用崩塌地质灾害易发区评价方法对云南省水麻高速公路复兴段公路进行了分区评价^[15]，结果表明，复兴段公路崩塌的高易发区分布范围和 RFRS 分级方法对该段公路的分析结果基本一致。2 种方法的结果比较说明：RFRS 公路边坡崩塌危险性分级方法是合理的，可以被推广使用。

4 结语

在前人研究基础上，结合工程应用，提出了公路崩塌地质灾害危险性分级系统（RFRS），并制定

了分级标准和等级划分标准。该分级系统包括地形因子、公路因子、地质因子、气候因子、崩塌历史因子和防护措施加权乘子6项指标,共包含12个打分项和1个加权乘子项。通过对不同路段边坡的崩塌点或危岩进行统计和打分,可以实现对公路边坡崩塌灾害的数据维护和管理,对达到B级以上的路段定期安排专业人员进行数据采集和分析,达到减轻公路崩塌灾害的目的。该分级系统具有考虑因素全面、野外填表操作方便、分级科学的优点,便于工程师或公路维护人员实际应用,同时希望这种方法能够被更多的工程所应用,并得到不断的改进。

参考文献:

References:

- [1] 赵成,张永军,赵玉红. 层次分析法在甘肃省地质灾害易发性评价中的应用[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 182-188.
ZHAO Cheng, ZHANG Yongjun, ZHAO Yuhong. Application of the Hierarchical Analytical Methods to Evaluating Geological Hazard Tendency in Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 182-188.
- [2] 谢全敏,夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 775-781.
XIE Quanmin, XIA Yuanyou. Comprehensive Assessment Method of Stability of Critical Rock-block Mass and Its Application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 775-781.
- [3] 胡厚田,邢爱国,黄少强. 清连公路典型边坡灾害分析[J]. 公路交通科技, 2000, (5): 1-5.
HU Houtian, XING Aiguo, HUANG Shaoqiang. Study on Slope Hazard of Qinglian Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(5): 1-5.
- [4] 刘建华,查旭东,付宏渊,等. 考虑降雨入渗条件下岩质边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 33-37.
LIU Jianhua, ZHA Xudong, FU Hongyuan, et al. Analysis of Rock Slope Stability under Rainfall Infiltration Condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 33-37.
- [5] 吴亚子. 山区公路地质灾害危险性评估方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
WU Yazhi. Research on Risk Assessment of Geological Hazards in Highway of Mountain Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [6] 黄丽珍,李家春,万利. 公路崩塌灾害等级划分初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 44-46.
HUANG Lizhen, LI Jiachun, WAN Li. Preliminary Study on Classification for Highway Avalanche Hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(3): 44-46.
- [7] 张路青,杨志法,张英俊. 公路沿线遭遇滚石的风险分析-方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5543-5548.
ZHANG Luqing, YANG Zhifa, ZHANG Yingjun. Risk Analysis of Encountering Rockfalls on Highway and Method Study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5543-5548.
- [8] 章照宏. 边坡落石灾害评价与风险分析[J]. 路基工程, 2007(1): 158-160.
ZHANG Zhaohong. Hazard Assessment and Risk Analysis of Rockfall on Slope [J]. Subgrade Engineering, 2007(1): 158-160.
- [9] CHAU K Y, TANG Y F, WONG R H C. GIS Based Rockfall Hazard Map for Hong Kong [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2004, 41(3): 530-530.
- [10] DUARTE R M, MARQUINEZ J. The Influence of Environmental and Lithologic Factors on Rockfall at a regional Scale: an Evaluation Using GIS [J]. Geomorphology, 2002, 43(1/2): 117-136.
- [11] PIERSON L A. Rockfall Hazard Rating System [J]. Transportation Research Record, 1992, 1343: 6-13.
- [12] YOUSSEF A, MAERZ N H, FRITZ M A. A Risk-consequence Rockfall Hazard Rating System for Missouri Highways [C] //The 54th Highway Geology Symposium. Burlington, Vermont: [s. n.], 2003: 175-195.
- [13] PIERSON L A, DAVIS S A, VICKLE R. The Rock Fall Hazard Rating System Implementation Manual, Report FHWA-OR-EG-90-01 [R]. Washington, D. C. [s. n.], 1990.
- [14] STOVER B K. Highway Rockfall Research Report [R]. Denver, Colorado: Colorado Geological Survey, 1992.
- [15] 王根龙. 崩塌地质灾害机理及评价方法研究[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2011.
WANG Genlong. Research on Failure Mechanism and Assessment Techniques for Rock Fall Geological Hazard [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011.