

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.03

邻近输电塔路堑边坡失稳风险定量评估 及加固工程设计优化

林阿娜^{1,2}, 王浩^{1,2}, 颜斌³, 戴旭明³, 胡燮⁴, 赵小盘⁴, 王晨⁴

- (1. 福州大学环境与资源学院岩土与地质工程系, 福建 福州 350116; 2. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116; 3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663; 4. 深圳供电局有限公司输电管理所, 广东 深圳 518020)

摘要: 基于路堑边坡风险评估及管理技术框架, 以龙岩市永定大道 K0+855~K1+085 路堑边坡为例, 开展边坡定量风险评估, 对边坡开挖及加固两个典型工况的边坡破坏概率、灾害到达承灾体概率、承灾体时空概率、承灾体易损性、承灾体财产价值等关键参量进行分析及计算, 从而实现了上述两个工况边坡潜在风险损失的定量估算和比较, 验证了边坡加固工程实施的必要性和有效性。因公路拓宽方案变更需求, 对该边坡提出多级锚固和抗滑桩两种优化设计方案, 并同样实施了这两个方案的定量风险评估及对比分析, 研究表明在边坡设计安全系数基本相当的条件下, 多级锚固方案具有较低的破坏概率和较少的潜在财产损失, 为优选变更方案。本文研究提出了一套完整的边坡定量风险评估技术方案, 并例证了该技术方案可以在设计阶段预测边坡风险状态及估算潜在风险损失, 体现了风险防控对策的科学性和前瞻性, 实现从源头控制风险的目标。

关键词: 路堑边坡; 定量风险评估; 风险管理; 输电塔

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)02-0019-11

Quantitative risk assessment of the highway cutting slopes in adjacent transmission lines and design optimization for the reinforcement works

LIN A'na^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, YAN Bin³, DAI Xuming³, HU Xie⁴, ZHAO Xiaopan⁴, WANG Chen⁴

- (1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
2. Geological Engineering Research Center, Fujian Provincial University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co. Ltd, Guangzhou, Guangdong 510663, China; 4. Power Transmission Management Institute of Shenzhen Power Supply Bureau Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518020, China)

Abstract: Based on the technical framework of risk assessment and management of cutting slopes, the quantitative risk assessment of Longyan Yongding Avenue k0+855~k1+085 cutting slope was conducted in this study. The key parameters, such as the probabilities of slope failure, and disaster reaching disaster-bearing body, and the space-time probability, vulnerability and property value of the disaster-bearing body, were analyzed and calculated under the two typical working-conditions of slope excavation and reinforcement for the purpose of quantitative estimation and comparison of the potential slope risk-loss. It realized that

收稿日期: 2018-08-21; 修订日期: 2018-09-11

基金项目: 福建省自然科学基金(2018J01746); 南网科技项目(090000KK52160020); 国网科技项目(XY-2018F03-2-84)

第一作者: 林阿娜(1992-), 女, 福建泉州人, 硕士生, 从事边坡工程方面的研究。Email: 694993649@qq.com

通讯作者: 王浩(1978-), 男, 江苏盐城人, 博士, 教授, 从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: h_wang@126.com

reinforcement projects for slopes are necessary and effective. Due to the widening of the highway, the multistage anchorage and anti-slide pile schemes were proposed, as well as quantitative risk assessment and comparative analysis of these two schemes. The study shows that the multilevel anchorage scheme is the best alternative, since it has lower failure probability and less potential property loss under the condition of same design slope safety-factor. This study puts forward a complete technical scheme of slope quantitative risk assessment which can estimate the slope risk state and potential risk loss in the designing stage, embodying the scientific and forward-looking of risk control countermeasure for the purpose of controlling risk from the source.

Keywords: cutting slope; quantitative risk assessment; risk management; transmission tower

0 引言

近年来,我国在复杂的山区地形条件下修建大量公路铁路,产生的路堑边坡数量惊人。因高速公路属于线状工程,跨度大,沿线地质条件多变,易形成工程数量大、条件各不相同的路堑高边坡^[1],故造成的人员伤亡和财产损失日益增加。因此,开展公路路堑边坡风险评估刻不容缓。

目前国际上将路堑边坡风险管理归纳于滑坡、泥石流等广义滑坡风险管理当中,迄今已发展 30 余年。2005 年温哥华滑坡风险管理国际会议提出的滑坡风险管理理论框架,是目前国际上应用最广泛的滑坡技术框架。国内学者沿用上述思路,对我国灾害风险评估开展研究(吴树人^[2],殷坤龙^[3],乔建平等^[4])。在公路铁路边坡风险管理中,美国交通部采用 JTC1 通用框架,建立公路崩塌滑坡风险分级系统^[5];加拿大也

以此为参考建立铁路边坡危险性评价系统^[6]等。2015 年交通运输部出版了《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南(试行)》初步总结出一套评估高速公路施工边坡风险的方法;张雷等^[7],梁涛等^[8],吴忠广等^[9]等都在定性或半定量上对公路边坡风险评估进行研究。王浩等^[10]提出对路堑边坡在设计、施工和运营阶段开展全寿命周期风险评估及管理。

当前对路堑边坡风险的评估及管理主要集中在施工及运营阶段,鲜有涉及到设计阶段的风险分析。本文将王浩等^[10]提出的路堑边坡风险管理框架为基础,以龙岩市永定大道 K0+855~K1+085 工点为例,从风险分析、风险评价及风险处置等三个方面,细化设计阶段风险评估及管理的技术方案,对该边坡进行定量风险评估,从风险管理的角度指导边坡设计方案的优化,使其能在工程实践中得到应用和推广。

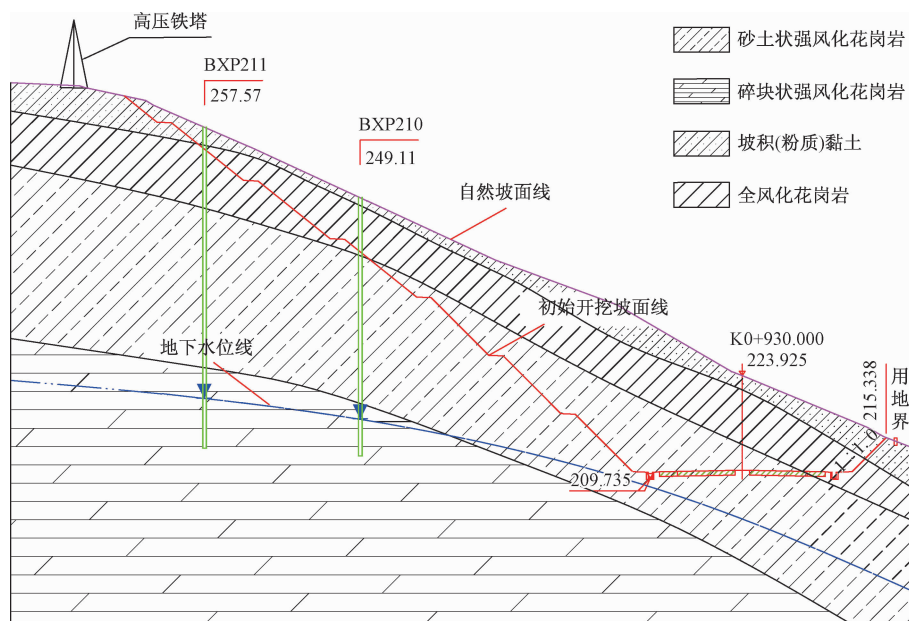


图 1 工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile

1 边坡工程概况

1.1 工程地质条件

龙岩市永定大道 K0 + 855 ~ K1 + 085 左侧路堑边坡位于山地丘陵地区。场区内共布置 4 个钻孔,根据工程地质调绘及钻探成果,边坡主体为砂土状强风化花岗岩,未见构造发育及明显不良地质作用,场地抗震设防烈度为 6 度,属抗震不利地段。边坡场区地表水不发育,地下水埋藏较深(图 1)。

1.2 周边环境条件

边坡处于亚热带季风气候地区,湿热多雨。根据现场野外调查结果,边坡坡脚左侧 150 ~ 200 m 处为西溪乡,人类工程经济活动剧烈,在坡顶处有一高压铁塔,场地现状稳定(图 2)。



图 2 边坡周边环境图
Fig. 2 Map showing the surrounding environment of the slope

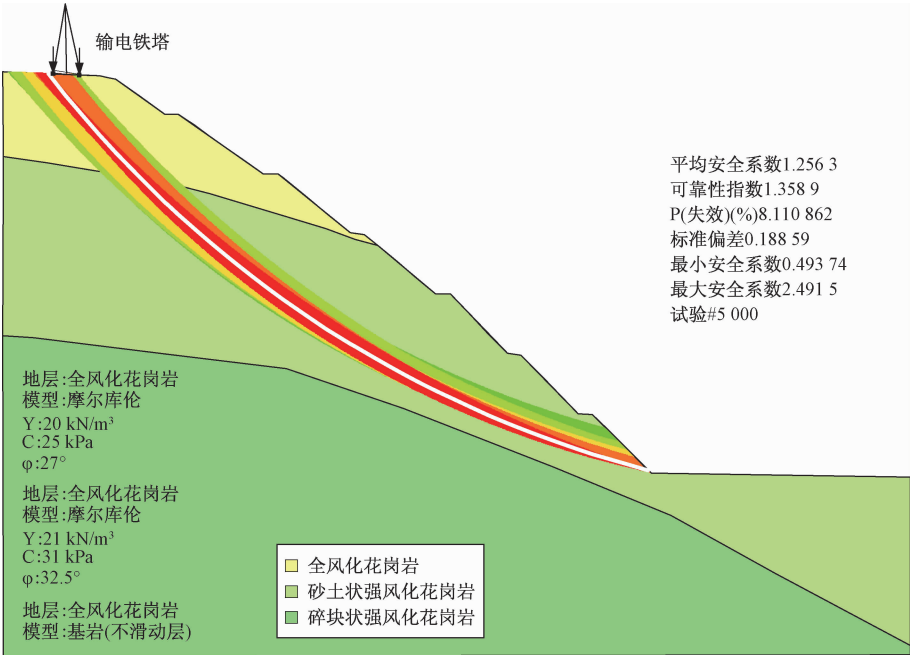


图 3 边坡开挖后极限平衡分析结果
Fig. 3 Result of the limit equilibrium analysis of the unsupported slope

1.3 边坡加固工程初步方案

该边坡既是路堑边坡,又属于邻近构筑物建筑边坡,按照《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)和《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)要求,综合确定该边坡工程设计安全系数 $F_s \geq 1.30$ 。

按设计单位要求,初步拟定缓坡开挖 7 级,结合该边坡的工程地质和周边环境条件,取最高断面 K0 + 930 断面利用 GeoStudio 软件建立模型。开挖后坡体的安全系数 $F_s = 1.256 < 1.30$ (图 3),处于欠稳定状态,需进行加固,具体加固方案见表 1,其中坡顶到输电铁塔的距离为 5 m(图 4)。

表 1 边坡初步设计方案
Table 1 Preliminary designing plan of the slope

边坡级数	主控坡率	加固措施
第 1 级	1:1.0	片砟矮挡墙($h=4\text{ m}$)
第 2 级	1:1.0	拱形骨架植草灌
第 3 级	1:1.0	预应力锚索框架(单孔设计拉力 500kN)
第 4 级	1:1.25	喷播植草灌
第 5 级	1:1.25	预应力锚索框架(单孔设计拉力 500kN)
第 6 级	1:1.25	喷播植草灌
第 7 级	1:1.25	喷播植草灌

2 边坡失稳风险评估

2.1 边坡失稳风险评估技术方案

路堑边坡工程风险管理由风险分析、风险评估和风险控制三个部分组成^[11],参照王浩等^[10]提出的框

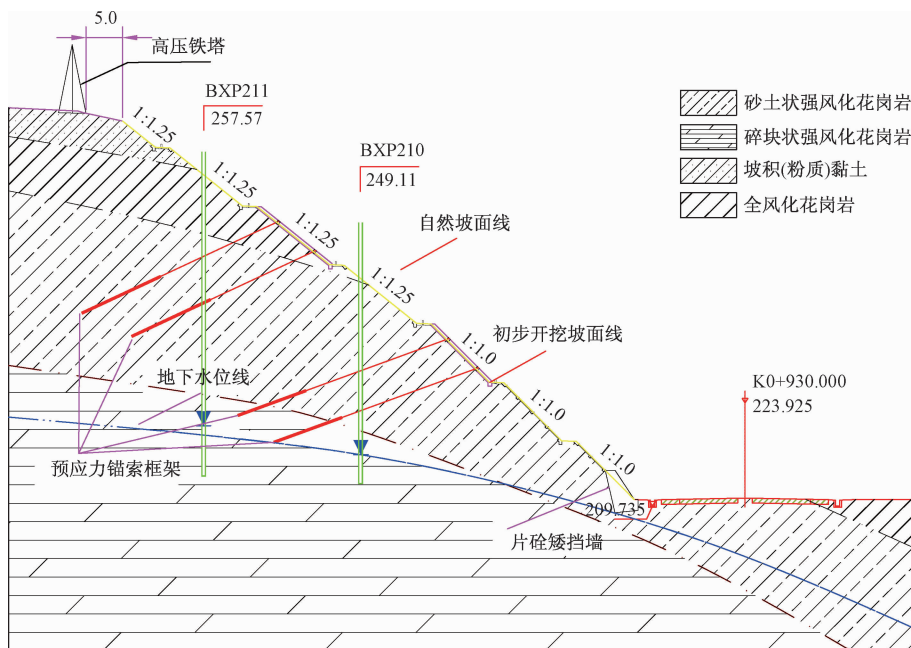


图4 边坡初步设计方案

Fig. 4 Preliminary designing plan of the slope

架,设计阶段风险评估流程如图5所示。风险分析是进行风险评估的核心步骤,通过对路堑边坡进行危险性分析和危害后果分析,预测边坡灾害的影响范围、破坏的可能性和危害后果的严重性,得到其风险值;风险评估是将得到的风险值与风险允许标准相对应,判断边坡风险等级,分为可接受、可容忍或不可接受风险;风险处置则是根据边坡风险等级结果采取相应的措施调控风险,降低边坡危险性和边坡灾害后果,并实施相应的监测和反馈措施,实时控制边坡风险。

路堑边坡在不同的寿命周期内,致灾体和承灾体等分析对象各有不同,根据本段边坡的工程地质及周边环境条件,场区内的致灾体为单个边坡,承灾体主要为公路本身以及坡顶的输电塔。

2.2 危险性分析

危险性分析是设计阶段风险评价的主要步骤之一,是后续风险评估和风险处置的依据,它是从各个内外因素预测分析边坡发生失稳破坏的可能。通过极限平衡分析或有限元数值模拟进行建模计算,将得到的安全系数作为评价指标。

但在实际中,安全系数高的边坡也会发生破坏,这是由于传统参数取值方法欠缺考虑岩土体的随机性,故安全系数难以反应边坡的真实情况,FELL等^[12]认为将概率理论应用到边坡破坏分析中,可以得到具有实际参考价值的边坡破坏概率。

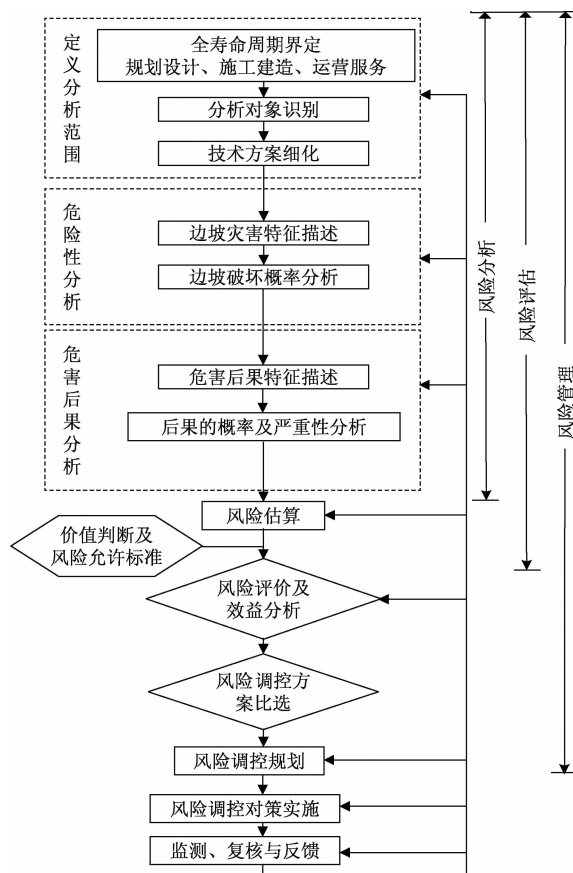


图5 路堑边坡风险评估及管理框架

Fig. 5 Framework for the risk assessment and management of high cutting slopes

关于边坡破坏概率标准,目前国内没有统一的标准,PRIEST 等^[13]通过对秘鲁边坡的研究,认为可接受的破坏概率为 5%~10%。考虑该边坡坡顶有输电铁塔,取可接受破坏概率为 5%。

本文将利用 GeoStudio 软件结合蒙特卡洛模拟法^[15]进行边坡破坏概率计算。计算次数 N 越大计算结果更精确,在本次计算中,当 N=5 000 时,破坏概率趋于稳定,故本文取 N=为 5 000,具体参数如表 2 所示。

表 2 岩土参数值

Table 2 Geotechnical parameters			
岩土层		全风化花岗岩	砂土状强风化花岗岩
天然重度/(kN·m ⁻³)		20	21
黏聚力/kPa	均值	25	31
	标准差	4.75	5.8
内摩擦角/(°)	均值	27	32.5
	标准差	4.3	5.2

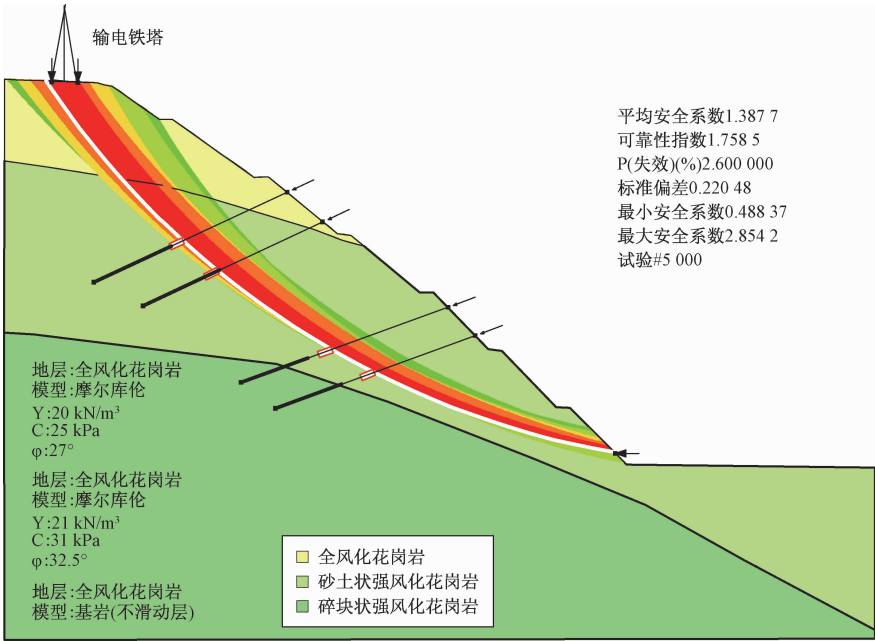


图 6 边坡概率分析结果图

Fig. 6 Results of the slope probability analysis

按此思路计算未加固前边坡的安全系数为 $F_s = 1.256 < 1.30$,破坏概率 $P_{L1} = 8.11\% > 5\%$,均不满足要求;加固后边坡整体稳定,安全系数 F_s 为 $1.387 > 1.30$,破坏概率 $P_{L2} = 2.60\% < 5\%$,满足要求(图 6)。

2.3 危害后果分析

王浩等^[10]将承灾体分为固定型、临时型、流动型和衍生型四种。根据该边坡的工程地质条件,分析该边坡发生远程滑坡的可能性较小,难以影响到坡脚的村庄,故边坡的承灾体以固定型为主,包括边坡顶部的输电铁塔和公路工程以及因这些建构物损毁造成的损失和修复费等衍生型承灾体。其中公路工程包括普通路基工程和路堑边坡工程。

FELL 等^[12]将危害后果分析分为:灾害到达承灾体概率 $P_{T:L}$ 、承灾体时空概率 $P_{S:T}$,及承灾体易损性 V 。其中,灾害到达承灾体概率 $P_{T:L}$ 取决于边坡体与承灾体之间的相对位置以及边坡失稳破坏后的运动路径及距离,唐亚明等^[11]根据这些因素,给出了参考意见

(表 3)。承灾体时空概率 $P_{S:T}$ 由承灾体的类型决定,对于固定型承灾体其 $P_{S:T}$ 为 1。承灾体易损性 V 取决于其本身的抗灾能力,殷坤龙等^[3]根据灾害强度和建筑物结构类型给出易损性指标建议值(表 4)。

表 3 边坡灾害到达承灾体的概率 $P_{T:L}$

Table 3 Probability of slope disaster reaching property		
承灾体类型	与边坡体位置关系	$P_{T:L}$
建构筑物以及建构筑物中的人	在边坡体上	1
	在边坡运动路径范围内	0.5~1
	在边坡潜在危害边界上	0~0.5

表 4 建构筑物结构类型易损性 V 指标建议取值

Table 4 Examples of the vulnerability values of building structures

滑坡灾害强度分区	建筑物结构类型			
	钢结构	钢筋混凝土结构	砖结构	简易结构
无危害区	0	0	0	0
轻微危害区	0.1	0.2	0.3	0.4
中等危害区	0.3	0.5	0.7	0.9
严重危害区	0.5	0.7	0.9	1.0

根据概率分析结果,输电铁塔完全处于边坡破坏范围之内,其 $P_{T:L}$ 为 1。结合该段边坡,各个承灾体均位于严重危害区,取输电铁塔的易损性为 1,沥青混凝土路面、路基参照钢筋混凝土结构取易损性指标为 0.7,边坡支挡结构为钢筋混凝土,其易损性指标为 0.7。综上,可得出该工点各个承灾体的灾害到达承灾体的概率 $P_{T:L}$ 、承灾体的时空概率 $P_{S:T}$ 及承灾体的易损性 V ,列于表 5 中。

表 5 各个承灾体的 $P_{T:L}$ 、 $P_{S:T}$ 、 V 取值Table 5 Values of the $P_{T:L}$ 、 $P_{S:T}$ 、 V for the disaster-bearing bodies

承灾体	结构类型	$P_{T:L}$	$P_{S:T}$	V
路面	沥青结构	1	1	0.7
路基	钢筋混凝土结构	1	1	0.7
路堑边坡工程	钢筋混凝土结构	1	1	0.7
输电铁塔	钢结构	1	1	1

2.4 危害损失评估

对于该工点,由于承灾体只有建构筑物,故危害损失仅考虑经济损失,可分为直接经济损失和间接经济损失。直接经济风险指的是边坡破坏对固定型承灾体造成的直接损失,如公路、铁塔等建构筑物,可采用重置成本法^[15]进行评估;间接经济风险指的是边坡破坏后对交通及环境的影响,难以量化。国土资源部门^[16]统计各种地质灾害直接经济损失与间接经济损失的相关关系,采用比例系数法进行评估,对于边坡灾害比例系数取 1.1。

(1) 普通路基工程 A_{11}

该工点长 230 m,拟定其对公路工程的影响范围为 230 m。公路工程包括路基和路面工程,参照福建双永高速公路的造价,路基工程每延米造价 2.1 万元,路面工程每延米造价 0.81 万元,故公路工程直接损失 $A_{11} = 669.3$ 万元。

(2) 路堑边坡工程 A_{12}

路堑边坡工程主要包括挖方工程、支挡工程和防护工程。表 6 为其工程成本估算表,边坡总造价 $A_{12} = 238.96$ 万元。

(3) 输电铁塔 A_{13}

对于输电铁塔,可分为边坡灾害对输电铁塔本身造成的损失 P_e 和因输电铁塔破坏而停电造成的损失 P_i 。

对于 P_i ,按照《中华人民共和国电力法》以及《供电营业规则》相关规定,供电企业在电力事故发生时应以当时电价的 5 倍给予赔偿,则有:

表 6 工程成本估算表

Table 6 Estimation of project costs

工程名称	工程量	单价/元	费用/元
挖方	25 297.7 m ³	18	455 358.6
支挡工程			
500 kN 预应力锚索	1 774 m	270	478 980
C30 混凝土框架梁	188 m ³	1 420	266 960
挡墙 C20 片石砼	2 216 m ³	320	709 120
防护工程			
C25 砼预制拱形骨架	261.8 m ³	750	196 350
喷播植草灌	6 284.5 m ²	45	282 802.5
造价成本			2 389 571

$$P_i = 5tVM \quad (1)$$

式中: t ——停电时间,电力部门规定电力故障的抢修

时间不超过 24 h,为便于计算,取 $t = 24$ h;

V ——电价,福建地区每度电是 0.548 3 元;

M ——因事故少供电的电量。

该输电铁塔连接到龙岩市永定县西溪乡的供电站,若破坏将会影响到西溪乡的用电情况。福建地区平均每人每天用电量为 20.43 度,该乡人口数量为 3 390, $M = 2 885.737 5$ 度电,按公式 1 计算得 $P_i = 5tVM = 18.99$ 万元。

铁塔的平均造价约为 100 万元,取 $P_e = 100$ 万元。即 $A_{13} = P_e + P_i = 118.99$ 万元。

综上可得,未加固前边坡的直接经济损失 $A_1 = A_{11} + A_{13} = 788.29$ 万元;基于直接经济损失估算值 A ,采用前文提出的边坡灾害比例系数 1.1,估算间接经济损失 $B_1 = 1.1 \times A_1 = 867.12$ 万元;故未加固前边坡的总经济损失 $E_1 = A_1 + B_1 = 1 655.41$ 万元。

初步加固后边坡的直接经济损失 $A_2 = A_{11} + A_{12} + A_{13} = 1 027.25$ 万元;间接经济损失 $B_2 = 1.1 \times A_2 = 1 129.98$ 万元;故该边坡的总经济损失 $E_2 = A_2 + B_2 = 2 157.23$ 万元。

2.5 风险定量估算

风险定量估算主要是基于概率的计算,将风险分析中所得到的边坡危险性和危害后果的发生概率相乘,得到风险发生概率。

财产损失风险^[10]:

$$R_{\text{prop}} = P_L \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V \times E \quad (2)$$

式中: P_L ——边坡破坏概率;

$P_{T:L}$ ——灾害到达承灾体的概率;

$P_{S:T}$ ——承灾体的时空概率;

V ——承灾体的易损性;

E ——承灾体的财产价值。

将各个承灾体按公式 2 计算,可得未加固时

$R_{prop1} = 100.06$ 万元;加固后 $R_{prop2} = 41.21$ 万元。

3 边坡防治工程设计方案优化

3.1 边坡风险防控思路

根据评估结果可知,边坡加固后安全系数增大,破坏概率降低,综合危险性和危害后果分析成果,其潜在财产损失减少,属于可接受风险,加固措施行之有效。但由于规划公路功能提升,该段线路由双向 4 车道拓宽为双向 8 车道,若沿用原方案塔基将处于开挖范围之内。综合各因素,难以迁移输电铁塔塔基位置,故需进行边坡设计优化。

在规划设计阶段,边坡可变性较大,可从规避边坡风险、降低边坡危险性和降低边坡灾害后果等三个方面进行风险管理^[10],具体如图 7 所示。

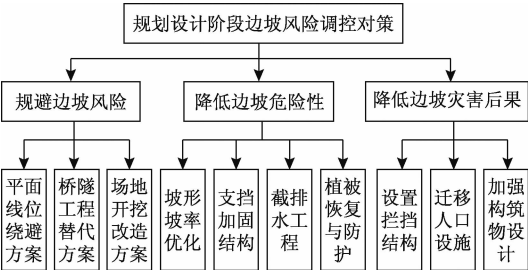


图 7 规划设计阶段风险调控对策

Fig. 7 Slope risk controlling measures during the designing stage

由于场地条件的限制,规避边坡风险的措施难以实施,着重考虑后两因素。

初步设计时,边坡整体虽然稳定,破坏概率较低,但欠缺考虑坡顶输电铁塔与边坡体的关系,预留的安全距离不够,输电铁塔完全处于边坡破坏范围之内。可通过放陡坡率来增大安全避让距离、加强支挡措施来增强边坡稳定性,使得输电铁塔远离坡体的破坏影响范围。综合考虑提出两种优化设计方案,方案一采用多级锚固措施(表 7、图 8),其中坡顶到输电铁塔的距离为 18.0 m;方案二采用抗滑桩(表 8、图 9),坡顶到输电铁塔的距离为 42.4 m。

表 7 优化设计方案一

Table 7 Optimizational design of the Program One		
边坡级数	主控坡率	加固措施
第 1 级	1:0.75	片砟挡墙($h=4\text{ m}$)
第 2 级	1:0.75	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)
第 3 级	1:0.75	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)
第 4 级	1:0.75	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)
第 5 级	1:1.0	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)
第 6 级	1:1.0	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)

表 8 优化设计方案二

Table 8 Optimizational design of the Program Two		
边坡级数	主控坡率	加固措施
第 1 级	垂直开挖	16 m 高抗滑桩
第 2 级	1:0.75	拱形骨架植草灌
第 3 级	1:1.0	预应力锚索框架(单孔设计拉力 700 kN)
第 4 级	1:1.0	拱形骨架植草灌

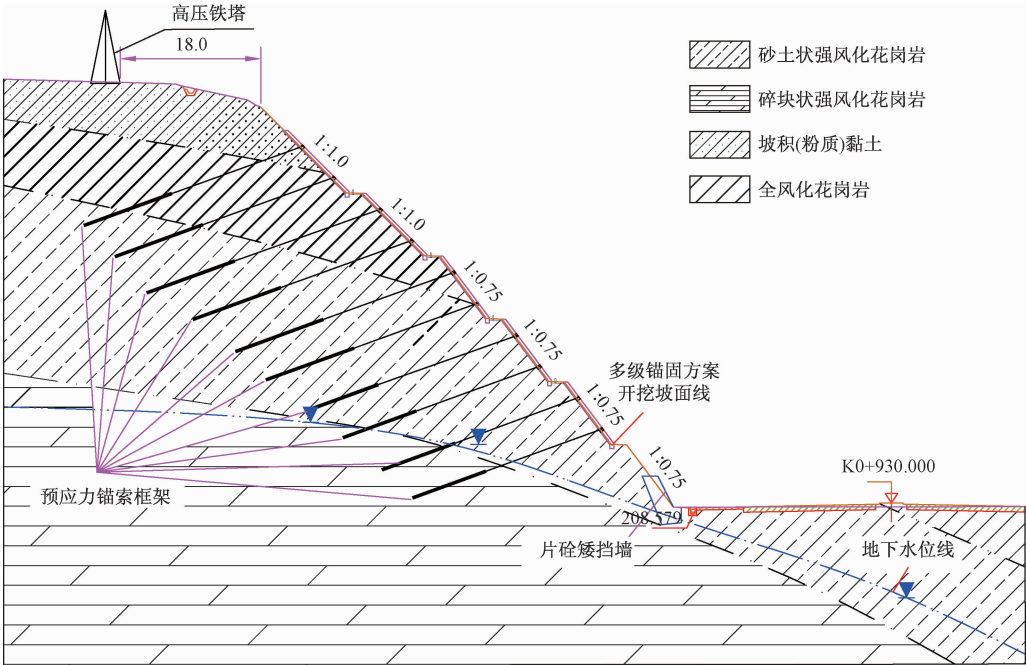


图 8 边坡优化设计方案一

Fig. 8 Optimizational design of the Program One

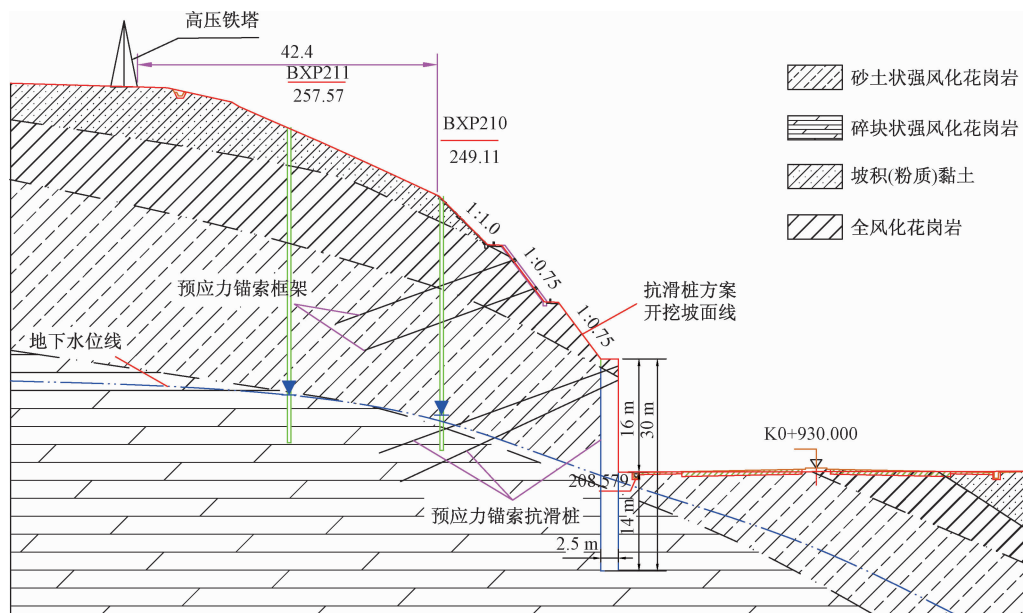


图 9 边坡优化设计方案二

Fig. 9 Optimizational design of the Program Two

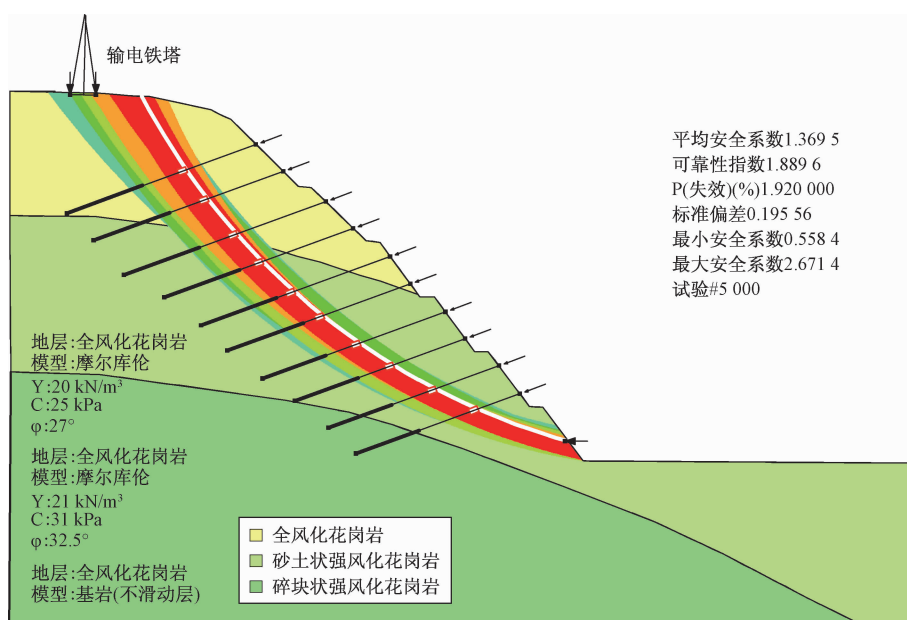


图 10 方案一边坡概率分析结果图

Fig. 10 Slope probability analysis result of the Program One

3.2 危险性分析

沿用前文方法,利用 GeoStudio 软件对边坡优化设计方案重新进行破坏概率及稳定性计算,得方案一安全系数 F_s 为 $1.369 > 1.30$,破坏概率 $P_{L3} = 1.92\% < 5\%$,满足要求;方案二安全系数 F_s 为 $1.332 > 1.30$,破坏概率 $P_{L4} = 2.48\% < 5\%$,满足要求。

3.3 危害后果分析

根据概率分析结果,方案一输电铁塔远离最危险

破坏面,处于边坡运动路径范围内,取 $P_{T:L} = 0.5$;方案二输电铁塔位于边坡潜在危害边界上,取 $P_{T:L} = 0.3$ 。其他概率取值同上(表 9、图 10、图 11)。

3.4 危害损失评估

根据前文,承灾体主要包括输电铁塔、普通路基工程和路堑边坡工程。

(1)普通路基工程 A_{21} 、 A_{31}

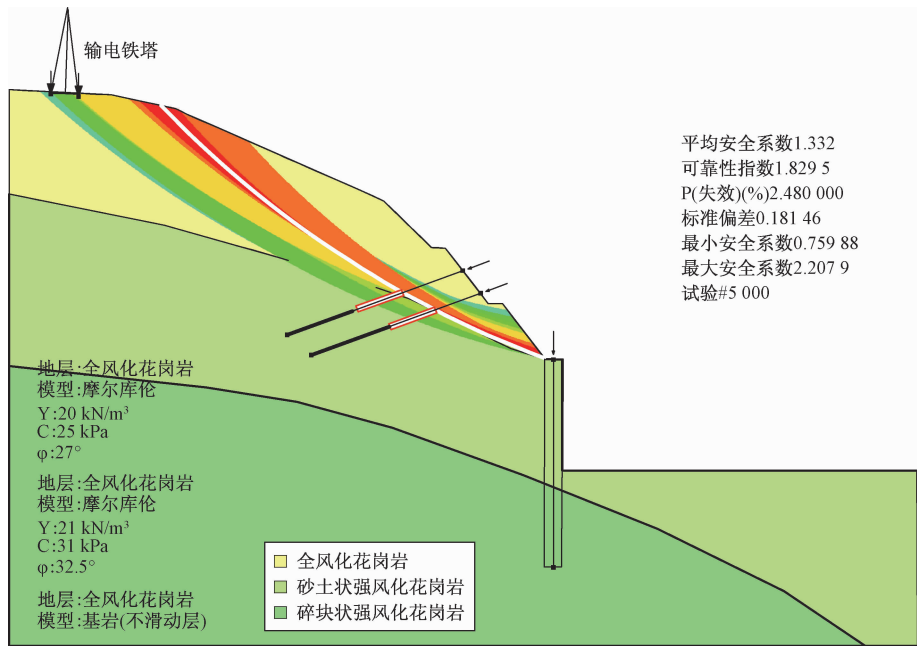


图 11 方案二边坡概率分析结果图

Fig. 11 Slope probability analysis result of the Program Two

表 9 各个承灾体的 $P_{T:L}$ 、 $P_{S:T}$ 、 V 取值

Table 9 Values of the $P_{T:L}$ 、 $P_{S:T}$ 、 V for the disaster-bearing bodies

承灾体	结构类型	$P_{T:L}$	$P_{S:T}$	V
路面	沥青结构	1	1	0.7
路基	钢筋混凝土结构	1	1	0.7
路堑边坡工程	钢筋混凝土结构	1	1	0.7
输电铁塔	方案一 钢结构	0.5	1	0.5
	方案二 钢结构	0.3	1	0.5

根据前文,该工点对公路工程的影响范围为 230 m,由公路为双向 8 车道,其路基工程每延米造价为 2.1 万元、路面工程每延米造价为 1.6 万元,故普通路基工程直接损失 $A_{21} = A_{31} = 851$ 万元。

(2)路堑边坡工程

延续前文思路,可得方案一和方案二的边坡工程成本估算如表 10、表 11 所示,边坡加固费用 $A_{22} = 467.52$ 万元、 $A_{32} = 512.93$ 万元。

(3)输电铁塔

根据前文计算方法及流程,输电铁塔直接经济损失 $A_{23} = A_{33} = 118.99$ 万元。

综上,可得方案一直接经济损失 $A_3 = 1\,437.51$ 万元、间接经济损失 $B_3 = 1.1 \times A_3 = 1\,581.26$ 万元,总体经济损失 $E_3 = A_3 + B_3 = 3\,018.77$ 万元;

方案二的直接经济损失 $A_4 = 1\,482.92$ 万元、间接经济损失 $B_4 = 1.1 \times A_4 = 1\,631.21$ 万元,总体经济损失 $E_4 = A_4 + B_4 = 3\,114.13$ 万元。

表 10 方案一工程成本估算表

Table 10 Project costs estimating of the Program One

工程名称	工程量	单价/元	费用/元
挖方	32 375.65 m ³	18	582 761.7
支挡工程			
700 kN 预应力锚索	4 456 m	3	1 604 160
C30 混凝土框架梁	470 m ³	1 420	667 400
挡墙 C20 片石砼	4 361 m ³	320	1 395 520
防护工程			
C25 砼预制拱形骨架	176.9 m ³	750	132 675
喷播植草灌	6 503.3 m ²	45	292 648.5
造价成本			4 675 165.2

表 11 方案二工程成本估算表

Table 11 Project costs estimating of Pogram Two

工程名称	工程量	单价/元	费用/元
挖方	28 699.28 m ³	18	516 587
支挡工程			
C25 混凝土桩身	1 800 m ³	1480	266 400 0
700 kN 预应力锚索	2 194 m	270	789 840
C30 混凝土框架梁	49 m ³	1420	69 580
挡墙 C20 片石砼	2 537.3 m ³	320	811 936
防护工程			
C25 砼预制拱形骨架	202.7 m ³	750	152 025
喷播植草灌	2 786.1 m ²	45	125 374.5
造价成本			5 129 353.0

3.5 风险定量估算

按公式 2 计算,优化设计后两个不同方案的财产损失为:

$$R_{prop3} = P_{L3} \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V \times E_2 = 38.41 \text{ 万元}$$

$$R_{\text{prop4}} = P_{L4} \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V \times E_3 = 50.65 \text{ 万元}$$

4 分析与讨论

4.1 工程效果对比分析

根据两者风险评估结果,可知两者安全系数相近,破坏概率均在允许范围内,输电铁塔远离最危险破坏面,工程效果相差无几。

4.2 技术经济对比分析

根据风险评估及管理结果,方案一的财产损失 $R_{\text{prop3}} = 38.41$ 万元,边坡加固费用 $A_{22} = 467.52$ 万元;而方案二的财产损失为 $R_{\text{prop4}} = 50.65$ 万元,边坡加固费用 $A_{32} = 512.93$ 万元,均大于方案一;且坡体下部为碎块状强风化花岗岩,方案二施工难度大,综合考虑选择方案一多级锚固方案。

4.3 讨论

本文初步实现了规划设计阶段开展路堑边坡风险定量评估及管理的技术体系,但评估精度还有待提高,拟从以下思路进行完善:

(1) 研究分析边坡破坏机制,找出影响边坡稳定因素,利用有限元软件结合概率分析更加准确地模拟边坡破坏,得到更精确的边坡破坏概率。

(2) 本文对灾害到达承灾体的概率 $P_{T:L}$ 取值较为宽泛,可以分析边坡各个破坏面的概率与破坏面到承灾体的距离关系,建立相对应的关系式来确定 $P_{T:L}$ 。

(3) 承灾体易损性的确定是风险评估中的难点,本文参照了前人的类似研究成果,可以结合承灾体结构、灾害体强度等因素来综合分析提高取值的合理性。

(4) 由于在规划设计阶段,所能获取的资料有限,本文对于承灾体价值的判断不够准确,一般取均值或经验值,建议在勘察前期,可加强对重点工点的勘察深度,以便于设计者进行更为准确的风险评估及管理。

5 结论

本文从设计阶段路堑边坡风险评估及管理的角度,以龙岩市永定大道某邻近输电线路路堑边坡为例,在风险分析、风险评估及风险管理的过程中贯彻定量风险评估的思路和方法,基于风险调控的理念,根据工程效果和技术经济来遴选最优设计方案,得出以下结论:

(1) 经过对边坡初始设计方案的开挖及加固两个工况的综合分析,边坡在实施加固之后,不仅安全系数得以提高满足了规范规定要求,而且边坡破坏概率也能够显著降低,其潜在的财产损失还相对较少,从而验

证了加固工程的必要性和有效性。

(2) 因该段公路拓宽,边坡挖方与坡顶输电铁塔占位重叠,需要进行边坡设计优化,提出了多级锚固和抗滑桩两种优化方案,并实施了这两个方案的定量风险评估对比分析。研究表明在边坡设计安全系数基本相当条件下,多级锚固方案具有较低的破坏概率和较少的潜在财产损失,具有明显的优势。

(3) 高速公路在设计阶段可变性较大,采用本文提出的边坡工程定量风险评估方法,可以预测工程实施过程中路堑边坡的风险状态,从风险、效益和技术等层面来比选不同设计方案,提高风险防控对策的科学性和前瞻性,从而达到在源头上控制风险的目标。

参考文献:

- [1] 王浩,林一夫,梁涛,等. 福建山区高速公路路堑高边坡风险分级方法研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 492-500.
WANG Hao, LIN Yifu, LIANG Tao, et al. Risk classification method for high cut slopes of Highway in Mountains of Fujian Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 492-500.
- [2] 吴树仁. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WU Shuren. Theory and technology of landslide risk evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 殷坤龙. 滑坡灾害风险分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
YIN Kunlong. Landslide risk analysis[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] 乔建平, 田宏岭, 杨宗信, 等. 滑坡风险区划理论与实践[M]. 四川大学出版社, 2010.
QIAO Jianping, TIAN Hongling, YANG Zongji, et al. Theory and practice of landslide risk regionalization[M]. Sichuan University Press, 2010.
- [5] TURNER, K A, SCHUSTER R L. Rockfall: characterization and control [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2012: 13-173.
- [6] HUNGR O, FLETCHER L, JAKOB M, et al. A system of rock fall and rock slide hazard rating for a railway-geo-hazard [R]. Edmonton, Alberta, Canada, 2003: 277-283.
- [7] 张雷, 顾文红, 王晓雪, 等. 高等级公路边坡工程风险因子识别及评估[J]. 地下空间与工程学报, 2007(增刊1): 1265-1268+1273.
ZHANG Lei, GU Wenhong, WANG Xiaoxue, et al. Risk factors identification and evaluation for slopes in

- highway engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(S1): 1265 - 1268 + 1273.
- [8] 梁涛, 王浩, 泮俊, 等. 公路边坡风险评估软件 RASlope 的研发与应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 62 - 70.
LIANG Tao, WANG Hao, PAN Jun, et al. Development and application of software RASlope for highway slope risk assessment [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 62 - 70.
- [9] 吴忠广, 申瑞君, 万福茂, 等. 岩质高边坡运营安全风险源辨识方法 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 8 - 15 + 27.
WU Zhongguang, SHEN Ruijun, WAN Fumao, et al. A method for identifying operation safety risk source of rocky high slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 8 - 15 + 27.
- [10] 王浩, 豆红强, 谢永宁, 等. 路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的技术框架 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3505 - 3516.
WANG Hao, DOU Hongqiang, XIE Yongning, et al. A technical framework for life cycle risk assessment and management of highway cut slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3505 - 3516.
- [11] 唐亚明, 冯卫, 李政国, 等. 滑坡风险管理综述 [J]. 灾害学, 2015, 30(1): 141 - 149.
TANG Yaming, FENG Wei, LI Zhengguo, et al. An overview of landslide risk management [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 141 - 149.
- [12] FELL R, HO K K S, LACASSE S, et al. A framework for landslide risk assessment and management [C]// International Conference on Landslide Risk Management, 2005: 599 - 600.
- [13] PRIEST S D, BROWN E T. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, 1983 [C]. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A; Min. industry).
- [14] 李侃, 巨能攀. 基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 23 - 27.
LI kan, JU Nengpan. Reliability evaluation of slope based on montecarlo method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 23 - 27.
- [15] 康雷闪. 重置成本保险: 法理基础及制度建构 [J]. 法商研究, 2012, 29(3): 46 - 55.
KANG Leishan. Replacement cost insurance: legal foundation and system constructio [J]. Studies in Law and Business, 2012, 29(3): 46 - 55.
- [16] 潘懋, 李铁峰. 灾害地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
PAN Mao, LI Tiefeng. Disaster geology [M]. Beijing: Peking University Press, 2012.

《中国地质灾害与防治学报》第七届编委会

主 任: 马 军 主 编: 殷跃平

副 主 任: 张作辰

副 主 编: 刘传正 唐辉明 李铁峰 文宝萍 许 强 李 晓 李善峰

委 员: 马凤山 马 军 王立朝 王来贵 王贤能 王树仁 王 清 王雁林 牛瑞卿 文宝萍

乔建平 向喜琼 刘东升 刘传正 刘新荣 祁生文 许 强 李 忠 李 晓 李铁峰

李善峰 李 滨 杨湘奎 何发亮 余志山 宋 军 张永波 张进德 张作辰 张茂省

陈 平 陈红旗 陈昌彦 陈昌富 范 文 范宏喜 周平根 赵松江 胡凯衡 胡卸文

胡新丽 姜月华 聂洪峰 贾永刚 夏元友 钱江澎 徐则民 殷跃平 唐辉明 黄波林

曹修定 龚士良 温铭生 雷明堂 路新景 裴向军 薛翊国 魏云杰 (以姓氏笔画为序)