

阳南沟隧道出口边坡安全风险分析

刘松¹, 罗红明², 翟全礼¹, 徐晓波¹, 胡五洲¹, 陈维伟¹, 刘光平¹

(1. 湖北省十白高速公路建设指挥部, 湖北十堰 442000;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 公路边坡一旦失稳可能对人类生命、财产、经济活动造成重大损失, 开展边坡安全风险评估一直以来都是工程建设中的一项重要工作。以湖北省十堰至白河公路阳南沟隧道出口边坡为例, 采用 Monte Carlo 模拟方法得到了正常工况和非正常工况 \bar{N} 条件下边坡的稳定性系数和破坏概率, 并针对边坡影响范围内的承灾体进行易损性分析, 从而得出边坡可能的经济损失价值和人口伤亡状况。结果表明, 阳南沟隧道出口边坡在正常工况条件下的风险等级为 \bar{N} 级, 在非正常工况 \bar{N} 条件下的风险等级为 $\bar{0}$ 级、中度。根据风险接受准则, 该边坡在正常工况条件下风险较小, 处于接受范围之内; 在非正常工况 \bar{N} 条件下风险次之, 应予以监测, 尤其在施工过程和不利自然条件下更应加强边坡变形情况监测。

关键词: 公路边坡; 破坏概率; 易损性; 风险分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0127-05

Safety Risk Analysis of the Slope at Yangnangou Tunnel Exit

LIU Song¹, LUO Hong-ming², ZHAI Quan-li¹, XU Xiao-bo¹, HU Wu-zhou¹, CHEN Wei-wei¹, LIU Guang-ping¹

(1. Hubei Province Shiba Expressway Construction Command, Shiyan 442000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Road slope instability is likely to cause significant losses of human life, property, and economic activities; therefore the slope safety risk assessment is an important task in the engineering construction. In this paper, the slope at the outlet of Yangnangou tunnel on the road between Shiyan and Baihe of Hubei Province was investigated using the Monte Carlo simulation to obtain its stability coefficient and probability to failure under the conditions of normal and abnormal conditions. Additionally, the vulnerability for the hazard affected body within the impacted area was analyzed, which can provide the possible economic losses and population casualties through the risk calculation formula. The results showed that the level of risk of the slope at the Yangnangou tunnel exit under the normal working conditions is class I, while the level of risk under the abnormal working conditions is class II. According to the risk acceptance criteria, this slope had less risk under the normal working conditions and the risk was within the acceptable range. This slope had higher risk under the abnormal working conditions; therefore the deformation of the slope needs to be monitored, especially under the construction process and adverse natural conditions.

Key words: road slope; failure probability; vulnerability; risk analysis

在山区高速公路的建设过程中, 由于路线等级高、路面宽、开挖量大, 出现了大量边坡, 易发生边坡变形和破坏, 一旦发生失稳和破坏, 不仅增加投资, 延误工期, 甚至造成已有工程破坏或给当地经济发展、人民生活造成极大危害。由于边坡体存在地质体复杂性、多变性和不均质性, 因此边坡稳定性

设计问题十分复杂, 至今还作为一种特殊设计而无章可循。

在我国每年因公路边坡灾害给国家和人民生命财产带来了巨大的损失, 产生了严重的社会影响。边坡在施工和使用中的安全风险状态, 对山区公路的建设效果和营运使用安全具有重大影响^[1]。由于形成和影响公路边坡稳定风险的因

收稿日期: 2012-11-02 修回日期: 2013-05-13 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.037.html>

基金项目: 湖北省交通科技项目“环境变化与工程活动条件下滑坡体演化特征及其防治技术研究”(2011-700-3-11)

作者简介: 刘松(1966), 男, 湖北麻城人, 教授级高工, 主要从事公路工程方面的研究。E-mail: Lius68@sohu.com

通讯作者: 罗红明(1980), 男, 湖北孝感人, 助理研究员, 博士, 主要从事地质灾害稳定性预测与防治研究。E-mail: luohm1980@163.com

素众多而复杂,理论上尚缺乏针对多因素系统有效的风险分析评价理论^[2,4]。因此,探索和研究在山区公路建设中不可避免存在的边坡引起的风险问题,是我国山区公路建设的现实性需要。开展公路边坡的安全风险预测与评价不仅具有重要理论意义,并且对优化公路建设方案、提高边坡支护工程措施的科学性和使用安全性等都具有十分重要的现实意义^[9]。

阳南沟隧道出口段出露地层为武当山群片岩,风化程度较高,且隧道顶板较薄,在隧道开挖、爆破振动等因素的影响下斜坡有可能失稳破坏。隧道出口段上方边坡一旦失稳将会对隧道及其下方桥梁的施工造成较大影响,且影响区域内工程规模较大,工程投资高,地质条件十分复杂。如何避免考虑不周使得规划、设计、施工和运营阶段发生事故,造成不必要的重大的损失和社会负面影响,有必要对阳南沟隧道出口边坡进行风险评估。

1 阳南沟隧道出口边坡工程地质环境

1.1 边坡工程地质概况

阳南沟隧道为一座高速公路分离式长隧道,出口位于十堰市张湾区黄龙镇泰山沟村东侧,轴线方向约 290°,呈南东-北西向展布。隧道出口洞门左幅为台阶式,右幅为端墙式。隧道出口斜坡较陡,沟隧道出口以上为较缓边坡,边坡坡度约为 23°,隧道出口以下自然坡角约 30°~40°,植被较发育。坡脚处分布有零星居民点和乡村公路。

隧址出口边坡位于秦岭褶皱系之东段,属于南秦岭印支冒地槽褶皱带(南秦岭构造带)二级构造单元之武当山复背斜范围内,可见明显的揉皱现象。边坡区主要出露地层为中元古界武当山群(Pt₂w d)片岩,片理产状 20°∠47°,节理裂隙较发育。

1.2 边坡可能破坏模式分析

通过勘察,阳南沟隧道出口边坡地质结构依次为:表层残坡积层,其下为强风化-微风化片岩;隧道出口以下边坡为较陡边坡,边坡坡度约为 34°,边坡地质结构为弱风化-微风化片岩,为向内倾的斜交坡。从边坡的平面特征来看,隧道出口左线以上边坡残坡积层中后部地形平缓,前部地形坡度相比中后部较陡;隧道右线地形坡度总体较缓。

根据邻近地区边坡失稳模式调查结果,该区边坡失稳大多是沿残坡积物与基岩分界面发生滑移,其滑面受风化界面控制呈折线状,微呈弧形结构。根据阳南沟隧道出口边坡地质特征(见图 1),采用宏观地质判断方法,确定阳南沟隧道出口边坡左幅剖面破坏模式为左线前部残坡积层沿风化界面近似弧形滑移(见图 2),右幅剖面破坏模式为残坡积层沿风化界面发生折线滑移(见图 1(b))。

2 阳南沟隧道出口边坡危险性预测

2.1 边坡失稳概率预测

根据边坡可能破坏模式分析,阳南沟隧道出口边坡分别采用不同的计算方法进行稳定性分析,并运用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟方法进行边坡失稳概率计算^[6,8]。

根据滑动面的形态和计算方法的适宜性,左幅剖面拟采用 Bishop 法和 Janbu 法;右幅剖面拟采用传递系数法和 Morgensterr Price 法。运用 Geoslope 软件及其自带的概率

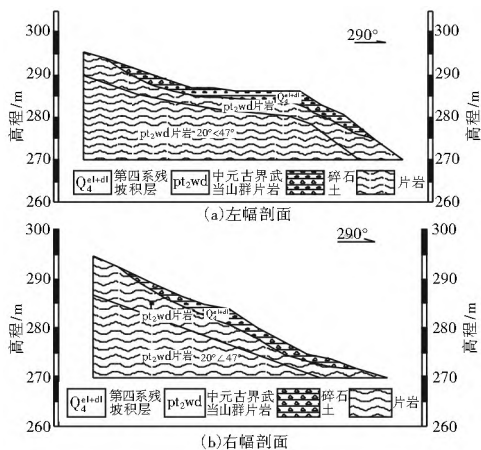


图 1 阳南沟隧道地质剖面

Fig. 1 The geological profile of the Yangnan tunnel

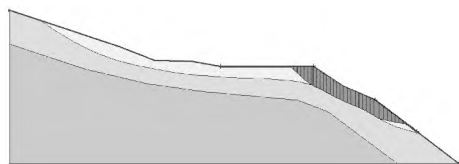


图 2 边坡左幅剖面滑移面搜索结果

Fig. 2 The search result figure of slip surface of the left profile of the slope

计算程序对边坡左幅剖面和右幅剖面进行计算,而传递系数法则是通过自编的计算程序对右幅剖面进行计算,得到了正常工况和非正常工况 \bar{N} 条件下边坡的稳定性系数和破坏概率,结果见表 1。其中非正常工况 \bar{N} 条件下,岩土体饱和,浸润线位于强风化层与弱风化层分界面。

表 1 边坡失稳概率计算结果

Table 1 The failure probability of the slope

计算剖面	计算工况	降雨条件	计算方法	稳定性系数	破坏概率(%)
左幅	正常工况		Bishop	1.812	1.6
			Janbu	1.786	1.9
	非正常工况 \bar{N}	暴雨或连续降雨	Bishop	1.416	21.2
			Janbu	1.393	21.9
右幅	正常工况	/	传递系数法	2.125	0.6
			Morgensterr Price	2.209	0.4
	非正常工况 \bar{N}	暴雨或连续降雨	传递系数法	1.665	13.5
			Morgensterr Price	1.720	10.5

由边坡稳定性计算结果可以看出,阳南沟隧道出口边坡在正常工况条件下左幅剖面的稳定性系数为 1.786,右幅剖面的稳定性系数为 2.125,大于表 2 所规定的稳定性系数,边坡处于稳定状态,有一定的安全储备;在非正常工况 \bar{N} 条件下边坡左幅剖面稳定性系数为 1.393,处于基本稳定状态,右幅剖面的稳定性系数为 1.665,处于稳定状态,但边坡开挖后

表 2 边坡允许安全系数

Table 2 The allowable safety coefficient of the slope

公路等级	边坡安全系数	
高速公路、一级公路	正常工况	1.20~1.30
	非正常工况 \bar{N}	1.10~1.20

揭露出的岩体易环境条件的影响,工程性质易发生劣化,在本计算中没有考虑这一点,从而得到的稳定性计算结果只适用于目前现状,对于长期的稳定性还需进一步研究。

从计算结果来看,右幅剖面的稳定性比左幅剖面的稳定性要好,主要原因是左幅剖面的中前部地形坡度和残坡积层分界线相比右幅来说都要陡一些,从边坡失稳模式来看右幅剖面计算结果代表了斜坡的整体稳定性,左幅剖面计算结果代表了斜坡的局部稳定性。

斜坡稳定性分级见表3。阳南沟隧道出口边坡左幅剖面在正常工况条件下破坏概率为1.9%,处于安全;在非正常工况条件下破坏概率为21.9%,处于低危险性。阳南沟隧道出口边坡右幅剖面在正常工况条件下破坏概率为0.6%,处于安全;在非正常工况条件下破坏概率为13.5%,处于低危险性。

表3 斜坡稳定性程度分级

Table 3 Classification of slope stability degrees

破坏概率	< 5%	5% ~ 30%	30% ~ 60%	60% ~ 90%	> 90%
危险程度	安全	低危险性	中等危险性	高危险性	不安全

2.2 边坡失稳范围预测

进行边坡灾害风险预测的前提条件是要确定出灾害的影响范围。可从两个方面考虑:一是边坡在孕育、变形过程中所涉及的范围,可以结合边坡区内裂缝发育规律、地层产状以及建筑物变形情况圈定;二是边坡破坏后的运动距离大小^{[9][10]}。

根据有关公式^[11]对阳南沟隧道出口边坡滑移距离进行了估算,估算结果见表4。

表4 边坡失稳滑动距离计算结果

Table 4 The calculated results of slope sliding distance

序号	计算公式	滑移位移/m
1	$L = H/f$	49.00
2	$\log L = 0.109 + 1.010 \log H - 0.506 \log(\tan \beta)$	42.52
3	$H/L = 0.73 \tan \varphi - 0.07$	55.13
4	$\log(H/L) = 0.1 - 0.09 \log V$	16.38

注:公式L为边坡失稳滑移的距离,H为边坡高度,f为动摩擦系数,β为边坡坡角,φ为边坡前缘坡脚,V为边坡体积。

公式1至4是目前常用的边坡失稳滑动距离大小估算模型,其中公式1反映了边坡体滑动距离与滑动面动摩擦系数f、边坡高度H有关;公式2反映了边坡的滑移距离L与滑体的滑移高差H存在一定的关系,通过历史边坡的调查统计可以分析L与H的关系;公式3反映了边坡滑动距离与前缘坡脚有关;而公式4反映了边坡滑动距离与边坡体体积有关。但是边坡体滑动的距离与与滑动面动摩擦系数、滑体高差、坡度及水平距离、边坡体剪出初始速度等因素息息相关,这些公式不能全部反映出影响滑移距离的各个因素,存在一定的局限性且有一定适用条件,因此计算结果之间存在一定差异。

采用上述估算公式可以大致了解边坡滑移距离,计算出来的滑动距离只能作为参考值,在进行风险评估时还应结合边坡失稳的运动方向、边坡周界和实际地形特征综合确定。通过对阳南沟隧道出口边坡周边工程地质特征调查,确定边坡后缘和侧缘的影响范围见图3。

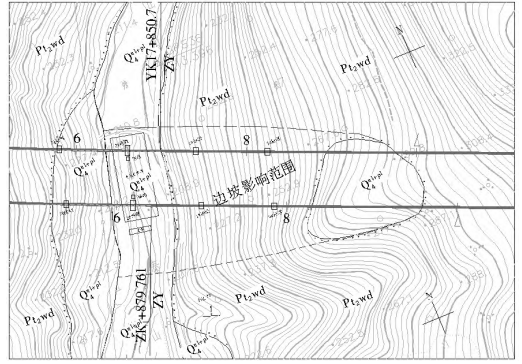


图3 边坡失稳影响范围

Fig. 3 The affected area of slope failure

3 边坡影响范围内承灾体易损性预测

3.1 承灾体调查和分类

要确定承灾体,需确定边坡影响范围及此范围内可能遭受损害的人和物。根据承灾体分类原则,将承灾体分为:人员、房屋建筑、公路桥墩、乡村公路、建设机械、农田、林地等。对本工程边坡影响范围内不同类别的承灾体分别进行调查,统计其特征及数量,统计结果见表5和表6。

表5 承灾体人口统计

Table 5 The population in the hazard affected body

年龄段	20~ 30	30~ 40	40~ 50	50~ 60
人数	2	4	6	3

表6 其他承灾体分类统计

Table 6 Classification of other hazard affected bodies

类别名称	临时建	交通实施		农田	林地	其他
	筑/间	公路桥墩/个	乡村公路/m	/m ²	/m ²	塔吊/台
数量	2	6	100	435	11 183.9	2

3.2 承灾体易损性预测

在单体滑坡灾害风险评价中,影响承灾体易损性的因素较为复杂,从承灾体的种类、数量、不同承灾体的承灾能力和可能损失程度等几个因素来看,同等灾害规模条件下,承灾体的数量越多,承灾体对灾害的抗御能力和可恢复性越差,灾害造成的破坏损失越严重。本文根据承灾体类型,主要分析人口易损性和经济易损性^[12]。

3.2.1 人口易损性评价

人口易损性是指在边坡灾害中最大可能的死伤人数占灾前人口总数的比例或百分比。对边坡进行人口易损性分析,主要是将该区域影响范围内的人口作为承灾体,研究人口的风险观念和减灾防灾意识,包括人口年龄结构、居民对边坡灾害的防范意识、政府对边坡灾害的重视程度等。除此之外,边坡性质也是重要的影响因素,包括边坡滑动速度、边坡体积等。根据文献[6]对人口易损性评价的方法,采用以下公式进行计算:

$$V_{pi} = \sum_{m=1}^5 W_{mi} C_{mi} = W_1 C_1 + W_2 C_2 + W_3 C_3 + W_4 (1 - C_4) + W_5 (1 - C_5)$$

式中:V_{pi}为边坡影响范围内的易损性指数,V_{pi}=0~1,0表示无人易损性,1表示100%的人口易损性;W₁为边坡速

度对易损性影响的权重; W_2 为边坡体积对易损性影响的权重; W_3 为人口年龄结构评价因素的权重; W_4 为受教育程度评价因素的权重; W_5 为政府重视程度评价因素的权重; C_1 为滑动速度评价系数; C_2 为边坡体积评价系数; C_3 为人口年龄结构系数; C_4 为教育程度系数; C_5 为政府重视程度系数。

相对于其他因素, C_3 、 C_4 是内因。不难看出, 边坡体滑动的速度和体积对易损性影响也较为明显。阳南沟隧道边坡影响范围内人口类型分为边坡分布区人口和边坡影响区人口, 根据政府部门的统计数据, 采用工程类比法将这两部分区域的影响因素量化, 并确定相应的系数。参考已有数据, 综合确定人口易损性指数为: 边坡区内易损性为 0.498, 边坡影响区内易损性为 0.376。

3.2.2 经济易损性评价

除了人的生命健康、风险观念外, 其他承灾体都可以用货币形式反映其价值。承灾体价值损失的程度可以用承灾体价值损失率来表示, 即承灾体遭受灾害破坏损失的价值与受灾前承灾体价值的比率。承灾体损毁程度和价值损失率除了与承灾体抗破坏能力有关外, 主要还受到地质灾害危害程度的控制, 危害程度越高, 则损毁越严重, 其损失率也越高。

因此, 根据历史灾害资料, 将不同承灾体价值损失率与地质灾害损坏程度进行了统计分析, 结合边坡特点, 同时参考其它自然灾害的研究成果^[13-14], 可初步建立滑坡灾害受灾体损毁程度与受灾体价值损失率的对应关系(见表 7)。这些数据可作为灾害评估的参考值, 具体应用时可根据实际情况在区间内取值, 或者作必要的修正。在难以获取实际资料情况下, 可采用平均值。

表 7 承灾体易损性值

Table 7 The vulnerability value of the hazard affected body

损坏程度	完好、基本完好	轻微损坏	中等损坏	严重损坏
易损性区间	0	0~ 0.3	0.3~ 0.7	0.7~ 1.0
平均值	0	0.15	0.5	0.85

4 阳南沟隧道出口边坡安全风险评价

阳南沟隧道出口边坡安全风险评价是建立在破坏概率、易损性评价、承灾体价值分析的基础上进行的。根据风险计算方法得出各工况下人口伤亡风险和各工况下经济损失风险, 如表 8 和图 4 所示。

表 8 人口伤亡风险预测结果

Table 8 The predicted results of risk of population casualties

剖面位置	工况	破坏概率 (%)	易损性	灾前人数	伤亡人数	伤亡人数比例 (%)
左幅	正常工况	1.9	0.498	15	0.14	0.9
	非正常工况 \tilde{N}	21.9	0.498	15	1.64	10.9
右幅	正常工况	0.6	0.498	15	0.04	0.3
	非正常工况 \tilde{N}	13.5	0.498	15	1.01	6.7

计算结果表明: 当边坡处于低危险性状态时, 伤亡预测人数均占总人数的 14.6% 以上, 经济损失在 275 万元以上。将所得数据与不同工况的破坏概率相比较, 可以看出破坏概率越高, 承灾体损失越严重。

根据交通部《公路桥梁与隧道工程安全风险评估指南》

中风险等级标准评定方法^[15], 阳南沟隧道出口边坡在正常工况条件下的风险等级为 \tilde{N} 级、低度, 在非正常工况 \tilde{N} 条件下的风险等级为 $\tilde{0}$ 级、中度。

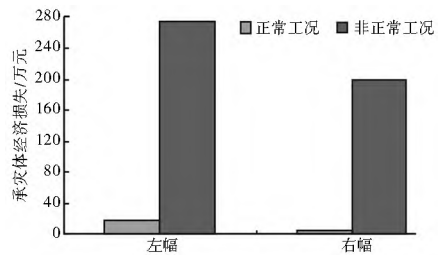


图 4 各工况下经济损失风险

Fig. 4 The predicted results of risk of economic losses under different working conditions

根据风险接受准则^[15-16], 阳南沟隧道出口边坡在正常工况条件下风险较小, 在接受范围之内, 但需要予以监测; 在非正常工况 \tilde{N} 条件下风险较大, 必须采取措施降低风险并加强监测, 特别在隧道出口段施工过程和不利自然条件下应该对边坡变形情况加强监测, 一旦发生异常情况, 需要通知建设和设计单位, 立即采取加固处理措施, 确保隧道出口边坡稳定。

5 结语

(1) 阳南沟隧道出口边坡稳定性和破坏概率分析结果表明: 边坡在正常工况和非正常工况 \tilde{N} 条件下处于稳定状态; 依据边坡稳定程度分类标准, 边坡在正常工况条件下处于安全程度, 在非正常工况 \tilde{N} 条件下处于低危险性。

(2) 阳南沟隧道出口边坡风险分析结果表明: 边坡在正常工况条件下的风险等级为 \tilde{N} 级, 在非正常工况 \tilde{N} 条件下的风险等级为 $\tilde{0}$ 级。根据风险接受准则, 阳南沟隧道出口边坡在正常工况条件下风险较小, 在接受范围之内; 在非正常工况 \tilde{N} 条件下风险次之, 但需要予以监测, 尤其在施工过程和不利自然条件下对边坡变形情况加强监测。

通过对边坡进行安全风险评价, 可以大致确定阳南沟隧道出口边坡风险及风险的大小, 为边坡工程技术人员分析和处理各种不确定因素提供可行的技术手段, 指导设计人员选择合适的边坡工程技术措施。但是, 本文没有考虑边坡失稳发生的时间问题, 如果发生在夜间, 其风险显然会高于边坡失稳发生在白天的值。所以, 对于公路边坡安全风险预测问题还应与时间预测研究结合, 对于这一点, 将在后续阶段进行研究。

参考文献(References):

[1] 罗元华, 张梁, 张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998. (LUO Yuanhua, ZHANG Liang, ZHANG Yecheng. Risk Assessment Method for Geological Hazard[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese))

[2] 马寅生, 张业成, 张春山, 等. 地质灾害风险评估的理论与方法[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 7-18. (MA Yirsheng, ZHANG Yecheng, ZHANG Chunshan, et al. Theory and Approaches to the Risk Evaluation of Geological Hazards[J]. Journal of Geomechanics. 2004, 10(1): 7-18. (in Chinese))

[3] 王开风, 张谢东, 王小璜, 等. 大规模山区高速公路施工危险源

- 辨识与风险控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(6): 1096-1099. (WANG Kai feng, ZHANG Xie dong, WANG Xiao-huang, et al. Hazard Identification and Risk Control in Freeway Construction of Large Scale Mountainous Region [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2009, 33(6): 1096-1099. (in Chinese))
- [4] 张勇慧, 李红旭, 盛谦, 等. 山区公路岩质边坡危险源安全性评价研究[J]. 公路, 2010, (2): 55-59. (ZHANG Yong hui, LI Hong xu, SHENG Qian, et al. A Study on Safety Assessment of Rock Slope Hazard of Mountain Highway [J]. Highway, 2010, (2): 55-59. (in Chinese))
- [5] 张业成, 张梁. 论地质灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境, 1996, 7(3): 1-6. (ZHANG Ye cheng, ZHANG Liang. On Risk Evaluation of Geological Hazards [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(3): 1-6. (in Chinese))
- [6] 罗文强, 黄润秋, 张倬元. 斜坡稳定性概率分析的理论与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003. (LUO Wen qiang, HUANG Run qiu, ZHANG Zhuo yuan. Theory and Method to the Probability Analysis of Slope Stability [M]. China University of Geosciences Press, 2003. (in Chinese))
- [7] 黄超, 王水林. 基于不平衡推力法的边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 613-615. (HUANG Chao, WANG Shui lin. Slope's Reliability Analysis Based on Imbalance Thrust Force Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup.): 613-615. (in Chinese))
- [8] 彭振斌, 李俊, 彭文祥. 基于 Bishop 条分法的边坡可靠度应用研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 668-672. (PENG Zhen bin, LI Jun, PENG Wen xiang. Application Analysis of Slope Reliability Based on Bishop Analytical Method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(2): 668-672. (in Chinese))
- [9] 鲁涛. 三峡库首区某滑坡变形特征及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 106-108. (LU Tao. Deformation Characteristics and Influencing Factors Analysis of Landslide in Head Region of Three Gorges Reservoir [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 106-108. (in Chinese))
- [10] 陈丽霞, 殷坤龙, 汪洋. 单体滑坡灾害风险预测[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 65-70. (CHEN Li xia, YIN Kun long, WANG Yang. Discussion on Risk Prediction for Single Landslide [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 65-70. (in Chinese))
- [11] 刘鑫, 陈奇, 吴树仁, 等. 陕西陇县李家下滑坡风险评价[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 895-903. (LIU Xing, CHEN Qi, WU Shu ren, et al. Risk Assessment of the Lijiaxia Landslide in Longxian County, Shanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 895-903. (in Chinese))
- [12] 陈红旗, 张若琳. 单体滑坡灾害风险简易评价研究[J]. 地质灾害与环境, 2010, 21(12): 45-48. (CHEN Hong qi, ZHANG Ruo lin. Study on Simple Assessment of Monomer Landslide Risk [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(12): 45-48. (in Chinese))
- [13] 吴越, 刘东升, 陆新, 等. 单体滑坡灾害财产风险定量评估模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 342-348. (WU Yue, LIU Dong sheng, LU Xin, et al. A Quantitative Assessment Model for Property Risk Caused by Single Landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 342-348. (in Chinese))
- [14] 陈红旗, 张若琳. 单体滑坡灾害风险简易评价研究[J]. 地质灾害与环境, 2010, 21(1): 45-48. (CHEN Hong qi, ZHANG Ruo lin. Study on Simple Assessment of Monomer Landslide Risk [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(1): 45-48. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁与隧道工程安全风险评估指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Safety risk assessment guidelines for Road bridge and tunnel engineering [S]. China Communications Press. (in Chinese))
- [16] 向喜琼, 黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境, 2003, 11(1): 38-41. (XIANG Xi qiong, HUANG Run qiu. Risk Assessment and Risk Management for Slope Geohazards [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 11(1): 38-41. (in Chinese))

(上接第 85 页)

- [14] 李志军, 杨宇, 彭旭明, 等. 黑龙江红旗泡水库冰生长过程现场观测数据的剖析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(10): 270-274. (LI Zhi jun, YANG Yu, PENG Xu ming et al. The Analysis of the Field Observation Data of Fresh Ice Growing Process in Hongqipao Reservoir of Heilongjiang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(10): 270-274. (in Chinese)).
- [15] 蔡之瑞, 孙泊涛, 郭世容等. 冰荷载的实验研究和计算方法[J]. 地震工程与工程震动, 1997, 17(4): 49-55. (CAI Zhi rui, SUN Bo tao, GUO Shi rong, et al. Experimental Research On Ice Load And Its Calculation Method [J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 1997, 17(4): 49-55. (in Chinese)).