

聚氨酯护坡结构静冰力学试验研究

张术彬, 常俊德, 张 滨

(黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 碎石聚氨酯护坡是一种新开发的水利技术。其结构与碎石沥青护坡相似,不同的是碎石以聚氨酯黏合而不是沥青。为了研究碎石聚氨酯护坡在寒区工程中应用的特性,以大庆红旗泡水库的冰厚过程和温度过程为原型试验条件,开展了碎石聚氨酯护坡在冻胀力和冰推力联合作用下的稳定特性研究。通过分析碎石聚氨酯护坡结构内部温度变化过程、冰厚生长过程、变形过程以及受力过程得到如下结论:碎石聚氨酯护坡多孔的结果有利于其下基土温度场的均匀分布;在冻融周期内,会产生较大的竖向变形和较小的坡向变形,且均不会完全恢复,因此在设计过程中应考虑对护顶和固脚进行加固;冰在融化阶段产生的冰推力较大,应注意在春季融冰期冰推力对护坡结构的破坏。

关键词: 聚氨酯护坡; 模型试验; 冰推力; 冰厚过程; 冻胀变形; 温度场; 受力特性

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0082-04

Experimental Study on Ice Mechanics of PUR Revetment Structure

ZHANG Shu bin, CHANG Jun de, ZHANG Bin

(Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: PUR revetment is a newly developed method for hydraulic engineering application. Its structure is similar to that of open stone asphalt revetment, but the crushed stones are glued by polyurethane (PUR) instead of bitumen. In order to study the characteristics of applying PUR revetment in cold regions, an experimental research of the stability of PUR revetment under the frost heave force and ice pushing was conducted based on the prototype test conditions of ice thickness and temperature processes in the Hongqipao Reservoir of Daqing. The process curves of internal temperature, ice growing, deformation, and mechanical characteristics were analyzed to obtain the following conclusions: (1) the porous structure of PUR revetment can result in the uniform distribution of temperature field under the revetment; (2) during the freeze thaw cycle, a larger vertical deformation and a smaller slope deformation of PUR revetment occur, but both deformations cannot recovery completely, thus it is necessary to take reinforcement measures at the roof support and slope foot during the designing process; and (3) the maximum ice pushing occurs during the thawing period, therefore appropriate icebreaking measures need to be performed to eliminate the effects of ice pushing on the revetment structure.

Key words: PUR revetment; model test; ice pushing; ice growing; frost deformation; temperature field; mechanical characteristics

碎石聚氨酯是将碎石与聚氨酯混合搅拌,使聚氨酯包裹在碎石表面,利用聚氨酯本身的黏结性将石块牢牢地黏结在一起,形成的一种新型弹性组合材料。该组合料具有黏结力强、弹性好,同时兼具透水、透气等生态的特点^[1]。近年来已在德国、荷兰和美国的海、河岸护坡工程中广泛应用,经济性、实用性和生态效益明显^[2,3]。马苏里等^[4]通过冰推力对水库护坡的危害进行了阐述。童长江等^[5]也对寒冷地区开展工程冻害研究的意义和方法进行了论述和总结。为了研究其在寒冷地区应用的效果,结合实际工程应用条件,开

展冰力学模型试验,对聚氨酯护坡结构在静冰压力和冻胀力的联合作用下的稳定性进行研究和评价,为该结构在寒冷地区的设计应用以及运行管理提供参考。

1 试验设计

1.1 模型比尺推求

关于冰力学模型试验,史庆增等^[6]和黄焱等^[7]提出了冰力模型试验应遵循弗汝德数相等的相似准则,但该准则适用于流冰情况,本次冰处于非流动状态,不适用该准则。朱林

收稿日期: 2013-01-16 修回日期: 2013-05-07 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.021.html>

基金项目: 冰排流场测量与分析系统研究(GC12A301)

作者简介: 张术彬(1965-),男,辽宁辽阳人,高级工程师,从事水力学河流动力学研究。E-mail: szsw_jz_sb@126.com

楠等^[8]提出了适用于冻土模型试验的相似准则,且韩雷等^[9]应用该准则成功开展了静冰压力对铰链式护坡系统作用的低温模型试验,鉴于此,本次亦采用该准则,准则可描述为:

$$\pi_1 = \frac{l^2}{aT}, \pi_2 = \frac{Ql^2}{\lambda T}$$

进一步分析得到相似判据如下:

$$\frac{c_1^2}{c_a c_T} = 1, \frac{c_0 c_1^2}{c_\lambda c_i c_T} = 1$$

式中: c 为相似常数; l 为几何尺寸; a 为导温系数; λ 为导热系数; t 为温度; Q 为单位体积水的潜热; T 为时间。

可以看出在6个相似常数中4个相似常数可以任意选定(基本常数 c_a 、 c_0 、 c_λ 和 c_i),2个由相似准则导出(c_T 和 c_l)。试验选用原状土,因此:

$$c_a = c_0 = c_\lambda = 1$$

则上述相似判据变为:

$$c_T = c_l^2, c_i = 1$$

根据实验室现有条件,选取 $c_l = 4$,计算得到 $c_T = 16$ 。

1.2 试验装置和试验设备

1.2.1 模型试验箱

模型试验箱为全钢结构矩形箱体,尺寸4.5 m×3.0 m×1.5 m,土层、边界和初始条件可控,四周密封、内壁光滑。底部及四周均用10 cm聚苯乙烯保温板保温,可实现单向冻结、双向融化的环境条件。模型箱体底层结构分为3层,即第一层底板加热层,由直径2.0 cm的铜管弯曲构成;第二层,无纺布和5 cm砂垫层;第三层为底板补水层,由盘曲的塑料管制成,塑料管周围铺设5 cm卵石,其上覆盖无纺布。

1.2.2 试验温度控制系统

温度控制系统分为两部分:第一部分是低温实验室提供低温环境,按设计要求控制降温过程;第二部分是模型试验箱底板温度控制系统,模拟季节冻土层下部的暖土层。低温实验室的温度控制范围为-35℃~+25℃,控制精度为±1.0℃;模型试验箱底板温度控制范围为0℃~+15℃,控制精度为±1.0℃。

1.2.3 数据采集与处理系统

数据采集与处理系统包括澳大利亚Dataaker公司的DT 515/615系列数据采集仪、XLD系列温度巡检仪、冻土远程实时监测软件系统和传感器(PT 100温度传感器、WYD-50位移传感器和ANCL0-250荷载传感器)。

1.3 模型制作

1.3.1 土料力学指标

模型试验土料为黏土,取自吉林省哈达山输水干渠,土样按《土工试验规程》(SL 237 1999)^[10]的要求进行试验,主要物理力学指标见表1。

表1 模型用土料主要物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil

最优含水率 ω (%)	最大干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	比重 G_s	液限 ω_L (%)	塑限 ω_p (%)	塑性指数 I_p	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
13.2	1.67	2.65	24.4	15.1	9.3	15.7	28.6

1.3.2 模型制作过程

碎石聚氨酯护坡采用现场浇注,护坡结构厚度为3.75

cm,采用的碎石粒径为10~20 mm,聚氨酯材料掺量质量百分数为260%。模型制作过程如下:向模型箱内分层填土、压实、在设定位置埋设传感器、做坡、铺设无纺布、现浇碎石聚氨酯护坡、安装冻胀量测量装置^[11],护坡结构见图1。

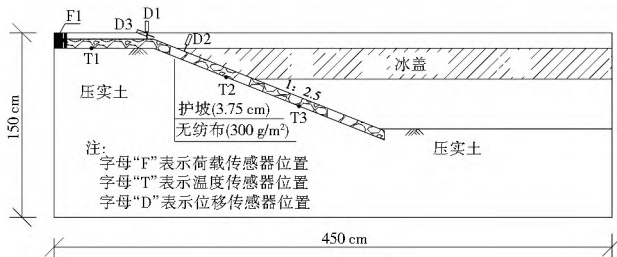


图1 护坡结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PU R Revetments

1.4 温度控制方案

1.4.1 温度模拟过程设计

茅泽育等^[12]在论述河冰生长演变规律时指出冰冻过程是一个热交换过程,该过程的模拟需要水温记录和详细的气象资料。大庆红旗泡水库属(A)型平原水库,是北部引嫩工程蓄水工程的重要组成部分,是寒冷地区典型的受冰推和冻胀作用的水库工程^[13],大连理工大学的李志军等^[14]曾对该水库的库冰特性进行过研究,观测的2008年-2009年度的冰厚过程比较完整,因此本文选用该水库2008年-2009年度温度与冰厚过程作为原型试验条件。水库冰厚过程线和温度过程线见图2。可以看出,红旗泡水库从封库到开库历时166 d,最大冰厚出现在128 d。根据选择的模型比尺,室内模拟此过程需要249 h,其中冻结过程需要进行192 h,融化过程需要进行57 h。试验模拟从冰封库后到融化的整个过程,试验水深65 cm,根据大庆红旗泡水库提供的资料,红旗泡水库封库时气温在-3℃~-4℃之间,综合考虑太阳辐射、风以及室内温度损失等因素设定室内封库前温度为-10.0℃,封库冰厚取1 cm。

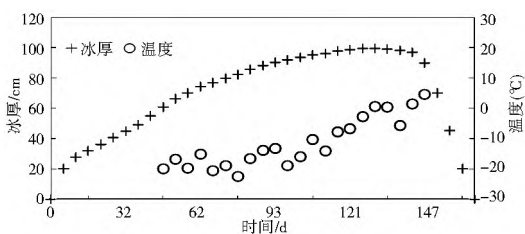


图2 大庆红旗泡水库2008年-2009年度冰厚及温度过程线

Fig. 2 Temperature and ice thickness curves of Hongqipao Reservoir in Daqing in 2007-2008

1.4.2 降温方案

根据图2反映的冰厚变化规律,结合红旗泡水库气温特点及试验室多年室内模型经验,考虑太阳辐射以及制冷量和吸热量平衡等各种因素,选定本次温度控制方案如下。本次温度控制过程分为4阶段:(1)降温阶段:试验时间0~9 h,环境温度-10℃~-22℃;(2)恒低温阶段:试验时间9~188 h,环境温度保持-22℃;(3)升温阶段:试验时间188~197 h,环境温度-22℃~30℃;(4)恒高温阶段:试验时间197~249 h,环境温度30℃。降温曲线见图3。

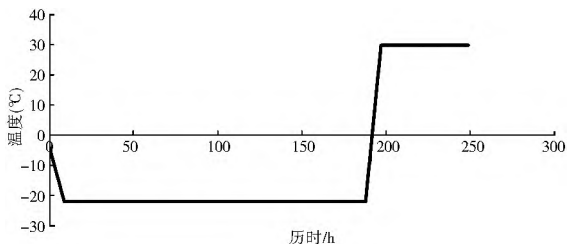


图 3 设计温度控制曲线

Fig. 3 Temperature controlling curve

2 试验结果与分析

2.1 温度控制过程校核

试验开始时,控制室内温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 h 水面开始结冰, 13 h 室内实测冰厚为 1.0 cm, 达到封库标准, 开始试验。至试验结束共进行了 192 h, 比设计过程 (249 h) 少 57 h, 其中恒低温阶段少了 51 h, 恒高温阶段少了 6 h。在试验过程中,进行了三次除霜操作,分别在 56 h、92 h 和 129 h。实测温度过程线见图 4。

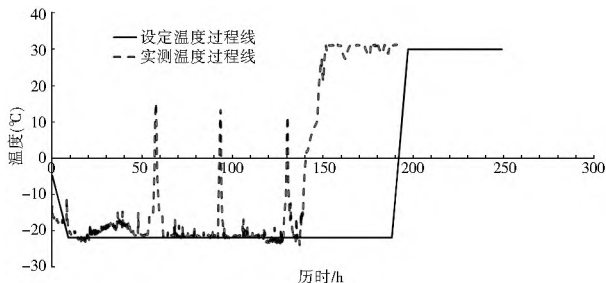


图 4 实测温度过程线

Fig. 4 Temperature controlling program

试验过程中,利用数据采集仪对模型试验中的温度、变形和荷载等参数进行监测,得到了碎石聚氨酯护坡结构内部温度变化过程线、冰厚生长过程线和变形过程线、受力过程线。

2.2 结构体内部温度过程线

图 5 所示为聚氨酯护坡与基土交界面处温度过程线。从图 5 可以看出,护顶位置的温度过程线要较环境温度过程线明显光滑,这是由于聚氨酯护坡具有多孔结构,可使基土温度场分布更加均匀,这种特性可以有效预防基土不均匀冻胀的发生,有利于护坡结构在冻胀作用下的稳定性。另外两个位置由于在水面以下,温度变化过程更平稳,水越深,温度变化幅度越小。

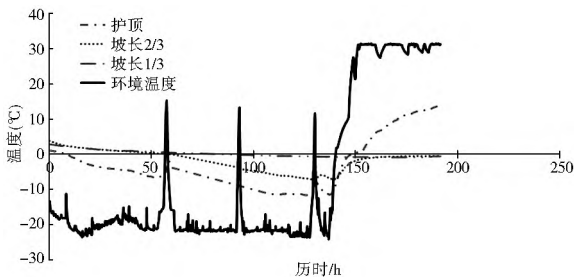


图 5 聚氨酯护坡与基土交界面处温度过程线

Fig. 5 The curve of temperature for interface between PUR Revetments and foundation soil

2.3 冰厚变化过程

图 6 为试验测得的冰厚发展与温度过程线。根据模型比尺 $c_l=4$ 和 $c_T=16$, 将室内实测冰厚放大 4 倍, 时间放大 16 倍后与野外实测冰厚过程线进行对比, 对比结果见图 7。从图 6 和图 7 可以看出: 最大冰厚出现在 141 h 左右, 此时气温为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这与水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 结冰的物理性质一致; 室内实测冰厚发展过程线的总用时要比野外冰厚发展过程线的短, 室内模拟冻结过程偏快; 两者在冻结初期符合的很好, 但在冻结后期, 室内模拟的冻结过程要明显快于野外冻结过程, 这是因为室内试验和能量损失要远远小于野外天然情况, 室内的空间狭小, 具有储能功能, 能量损失小, 冻结速度快, 但野外条件下能量流通的通道畅通, 能量损失大, 冻结速度慢。

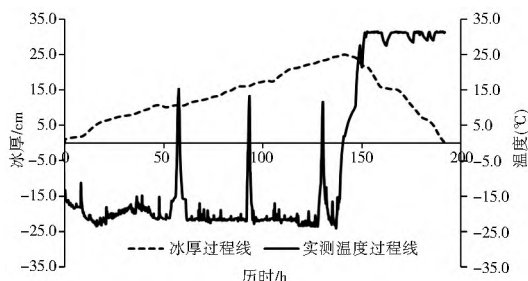


图 6 冰厚与温度过程线

Fig. 6 The curves of ice thickness and temperature

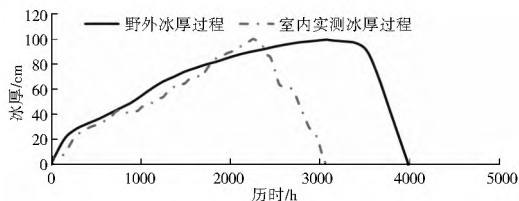


图 7 野外与室内实测冰厚发展过程的对比

Fig. 7 The comparison of ice thickness process between field and test

2.4 变形特性

图 8 为聚氨酯护坡结构的变形过程线。如图所示,在冻胀和冰推联合作用下,护坡结构的竖向变形远大于坡向变形; 竖向变形在整个降温周期内会出现峰值, 在升温结束后竖向变形没有完全恢复, 残余变形相当于最大竖向变形量的 94%, 而坡向变形在降温周期内呈缓慢增大的趋势, 在升温结束后依然没有出现峰值, 可见坡向变形的持续时间更长, 会对结构产生较大威胁, 因此聚氨酯护坡在寒区工程应用时应加固护顶和固脚, 限制坡向变形的产生。

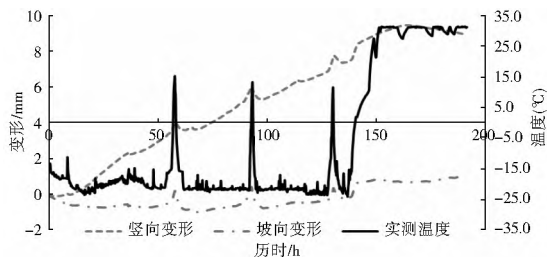


图 8 变形过程线

Fig. 8 The curve of deformation

2.5 受力特性

在试验进行 36 h 时, 在护顶与模型箱之间安装荷载传

感器,用于测量在试验过程中结构体的受力情况,此时冰厚 8.4 cm。由于结构体本身具有一定的弹性,因此只能定性分析结构体的受力过程。结构体受力过程见图 9。初始阶段,结构体所受压力值减小,这是由于冰和聚氨酯护坡具有明显的热胀冷缩的性质,因此,该阶段的压力值逐渐减小;当温度突然升高时,压力值也突然升高,这是由于冰层和聚氨酯护坡在温度急剧升高的过程中出现了膨胀,导致压力值迅速的增大,可见冰推力的破坏作用发生在冰具有一定的厚度且温度升高的过程。由此可见,天然水库在春季冰融化阶段是冰推力破坏作用最大的时期,为了减少冰推力的破坏,可在此时期采取破坏措施,以消除冰推力的破坏作用。冰推力的作用力很大,是寒冷地区滨水建筑物的重要威胁,蔡之瑞等^[15]对各国计算冰荷载的公式进行了总结,可以看出冰推力与冰层厚度、冰强度、结构物外形等密切相关。

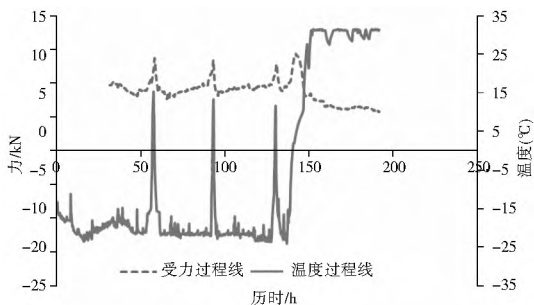


图 9 力与温度过程线

Fig. 9 Mechanical characteristics

3 结论

通过开展碎石聚氨酯护坡结构冻胀适应性试验研究,得出以下结论。

(1) 聚氨酯护坡具有多孔结构,可使基土温度场分布更加均匀,这种特性可以有效预防基土不均匀冻胀的发生,有利于护坡结构在冻胀作用下的稳定性。

(2) 由于室内的空间有限,因此在制定降温制度模拟成冰过程时,应充分意识到室内试验中能量损失小的问题,适当缩短降温的时间和强度。

(3) 聚氨酯护坡结构在冻胀力和冰推力作用下会产生较大竖向变形和较小坡向变形,试验模拟的冻融期内,竖向变形不会完全恢复,且残余变形很大,护坡结构设计时应该考虑不均匀变形的问题。坡向变形在试验模拟的冻融期内一直在缓慢增大,因此设计过程中应重视护顶和固脚,采取适当的加固措施,防止坡向变形引起结构失稳破坏。

(4) 在冰融化阶段会产生较大的冰推力,因此在春季融冰期要特别注意冰推力对护坡结构的破坏,必要时可以采取一些破冰措施。

本次试验只对结构体的受力进行了定性分析,未能对膨胀力的作用水平进行定量研究,这些问题需要在以后的研究工作中加以解决,同时增加原型观测的内容。

参考文献(References):

- [1] 顾德华. 碎石聚氨酯护坡材料特性的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (GU Dehua. Experimental Study in the Hydraulic Properties of PUR Revetments[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [2] Dehua Gu. Hydraulic Properties of PUR Revetments Compared to Those of Open Stone Asphalt Revetments[D]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [3] E. Bijlsma. The Elastocoast? system[D]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [4] 马苏里, 张来文, 范南耕. 冰推力作用对泥河水库工程的影响[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(2): 111-112. (MA Suli, ZHANG Laiwen, FAN Nangeng. The Effect of Ice Pushing To Nihe Reservoir[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2007, 35(2): 111-112. (in Chinese))
- [5] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985. (TONG Changjiang, GUAN Fengnian. Harm and Prevention and Cure of Frost Heaving of Soil to Construction[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. (in Chinese))
- [6] 史庆增, 徐继祖, 宋安. 冰力模型试验[J]. 冰川冻土, 1990, 12(2): 117-123. (SHI Qingzeng, XU Jizhu, SONG An. The Model Test of Ice Forces[J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 1990, 12(2): 117-123. (in Chinese))
- [7] 黄焱, 史庆增, 宋安. 冰力模型实验中的模型律[J]. 冰川冻土, 2003, 25(S2): 352-355. (HUANG Yan, SHI Qingzeng, SONG An. The Application of Scaling Laws to Ice Force Model Tests[J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 2003, 25(S2): 352-355. (in Chinese))
- [8] 朱林楠, 李东庆, 郭新民. 无外荷载作用下冻土模型试验的相似分析[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 166-169. (ZHU Linnan, LI Dongqing, GUOXinmin. Similarity Analysis of Modeling Test for Pressure in Freezing Thawing Process of Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 166-169. (in Chinese))
- [9] 韩雷, 张滨, 程卫国. 静冰压力对铰链式护坡系统作用的低温模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 1-6. (HAN Lei, ZHANG Bin, CHEHG Weigu. Low-Temperature Model Test of Static Ice Pressure on Articulating Slope Protection System[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 1-6. (in Chinese))
- [10] SL237 1999, 土工试验规程[S]. (SL237 1999, Geotechnical Testing Code[S]. (in Chinese))
- [11] 陈广思. 碎石聚氨酯护坡材料波浪作用特性试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011. (CHEN Guangsi. Experimental Study of the Elastocoast System With Wave Impact[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese))
- [12] 茅泽育, 吴剑疆, 余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报, 2002, 21(S1), 153-161. (MAO Zeyu, WU Jianjiang, SHE Yuntong. River Ice Processes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 21(S1), 153-161. (in Chinese))
- [13] 姜连杰, 卢永超, 韩红卫, 等. 红旗泡水库冰层变形及护坡破坏现象成因分析[J]. 水利水电技术, 2001, 42(7): 85-88. (JIANG Lianjie LU Yongchao HAN Hongwei et al. Causal Analysis on Ice Layer Deformation and Slope Protection Damage of Hongqipao Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 42(7): 85-88. (in Chinese))

(下转第 131 页)

- 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]. 地质灾害与环境保护, 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, 41(Suup.): 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]. 地质灾害与环境保护, 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]. 地质灾害与环境保护, 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]. 地质灾害与环境保护, 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)).