

基于光纤光栅传感器的灾变滑坡模型试验研究*

王静^{①②} 施斌^① 严珺凡^① 朱鸿鹄^① 魏广庆^① 孙义杰^① 张昊晨^①

(^①南京大学地球科学与工程学院 南京 210093)

(^②山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要 为充分发挥光纤传感器测量精度高、体积小、网络容量大等优势,基于铝棒与光纤光栅串开发了FBG(Fiber Bragg Grating)锚杆传感器,并将FBG锚杆传感器与FBG应变传感器用于边坡模型试验中,用于实时监测加载过程中边坡内部的应变分布。边坡模型试验中共采用了15根光纤光栅锚杆传感器与6根光纤光栅应变传感器,应变监测点达85个。采用千斤顶在边坡顶部进行分级加载,光纤光栅锚杆传感器与光纤光栅应变传感器的测试结果一致表明,在锚杆传感器上第二支光栅处应变最大,最易形成滑移面,且边坡底部可能已经产生裂纹。该试验为研究边坡内部的应变分布及滑移面的形成提供了可靠的技术手段与数据支撑。

关键词 光纤光栅 滑坡 灾变过程 实时监测

中图分类号:TP212.14 **文献标识码**:A

MODEL TEST OF LANDSLIDES CATASTROPHE BASED ON FIBER BRAGG GRATING SENSORS

WANG Jing^{①②} SHI Bin^① YAN Junfan^① ZHU Honghu^① WEI Guangqing^① SUN Yijie^① ZHANG Haochen^①

(^①School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093)

(^②School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract Utilizing the advantages of fiber sensor such as high precision, small volume and large capacity, the fiber Bragg grating(FBG) anchor bar sensor based on aluminum stick and fiber Bragg grating was designed. The anchor bar sensor and FBG strain sensor were used in the slope model test to monitor strain distribution inside the slope model during load period. 15 FBG anchor bar sensors and 6 FBG strain sensors were adopted in the test model and the strain monitoring point is up to 85. A jack was used to load at the top of slope step by step, and both the anchor bar sensors and the strain sensors measurement result show that maximum strain occurred on the second FBG of the anchor bar sensor, where slip surface is susceptible to form. Moreover fissure may have been occurred at the bottom of the slope. The test results provide reliable data support for the research of strain distribution and form of slip surface inside the slope.

Key words Fiber bragg grating, Landslides, Catastrophe process, Real-time monitor

* 收稿日期:2012-05-20;收到修改稿日期:2012-07-07.

基金项目:国家“973”计划资助项目(2011CB710605),中国博士后基金资助项目(2012M511253)和国家自然科学基金项目(61074163).

第一作者简介:王静,主要从事光纤传感技术在地质工程中的应用研究,Email:wangjing329@mail.sdu.edu.cn

1 引言

随着我国水利水电、公路、铁路等基础设施建设的迅速发展,边坡工程随之剧增,滑坡灾害已成为重要的地质灾害之一^[1,2],此外,如汶川等灾区的滑坡灾害也不容忽视^[3]。加之勘察数据代表范围的局限性导致很多边坡在加固或填筑后的安全性与原设计可能会有较大出入,因此边坡内部应变等参数的实时监测尤为重要^[4,5]。

目前大多采用电类传感器及振弦式传感器进行监测,但电类传感器稳定性差、耐久性差、抗干扰性差,并且易发生的零点漂移。振弦式传感器易发生振弦蠕变失灵^[6]。此外,电类传感器普遍具有防潮性能差、易受电磁干扰、不能实现分布式测量等缺点。

光纤光栅应变传感器是近年来在工程中普遍应用的新型传感器,具有抗电磁干扰、防水防潮、灵敏度高、易实现多点及网络化传感等特点^[7~11]。但是光纤光栅传感器大多采用金属外壳封装,传感器体积大,尤其对于岩体较软边坡传感器与周围介质的匹配性较差。目前在边坡监测中,大多采用基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术^[1,2],但是该技术测量精度低,且空间分辨率较差。

地质力学模型试验是目前在地质工程领域普遍采用的一种研究手段,由于模型根据实际工程按照一定的相似比进行缩小,对传感器的精度与体积提出了更高的要求。王静等研制了基于模型材料的FBG应变传感器^[12],传感器体积小,与周围介质的匹配性好,但是该传感器适用于弹性模量较大的地质力学模型相似材料。项连清等开发了管式光纤光栅应变传感器^[13],测量精度较高,但也不适用于较软材料中应变的监测。董建华^[14]等采用未经封装的光纤光栅进行重力坝结构模型试验,取得了较好的试验结果,但光纤纤细易断。

本文针对吒溪河马家沟1号滑坡的特点,将光纤光栅串黏贴在锚杆上,开发了光纤光栅锚杆传感器,集支护与传感为一体。并将光纤光栅锚杆传感器与光纤光栅应变传感器用于边坡模型试验中,实时监测加载过程中边坡内部的应变分布。

2 光纤光栅传感器

FBG是光敏光纤的纤芯在强烈的紫外光照射

下,使纤芯的折射率发生周期性永久性改变的窄带滤波器件。温度与应变等参数都能够引起FBG中心波长的变化,可表示为:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon_x + (\alpha + \zeta) \cdot \Delta T \quad (1)$$

式(1)中, λ_B 和 $\delta\lambda_B$ 分别为FBG的中心波长和中心波长变化量; ε_x 为轴向应变; ΔT 为温度变化量; P_e 、 α 和 ζ 分别为光纤的有效弹光系数、热膨胀系数和热光系数。

在FBG应变传感中通常采用温度补偿的方式剔除温度对测量结果的影响。忽略温度的影响,则

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon_x - \left(\frac{n_{eff}^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \varepsilon_x \quad (2)$$

令

$$K_g = 1 - \left(\frac{n_{eff}^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$$

则:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_g \varepsilon_x \quad (3)$$

K_g 为FBG应变灵敏度系数,对于普通的石英光栅; K_g 为0.784。

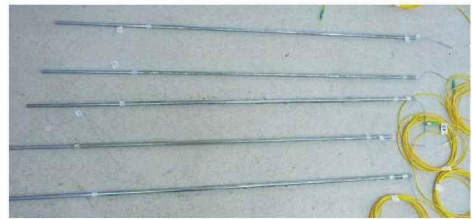


图1 光纤光栅锚杆传感器

Fig. 1 FBG anchor sensors

试验中主要采用了FBG锚杆传感器和FBG应变传感器。FBG应变传感器采用了塑料套管保护的方式。FBG锚杆传感器基体采用了直径10mm,长1.2m的铝棒,其中2根锚杆传感器在上下两侧分别等间距黏贴了4支光纤光栅,另外12根锚杆传感器在铝棒的一侧等间距黏贴了4支光栅(图1)。光栅的黏贴过程如下:

(1)将铝棒用砂纸打磨光滑,再分别用丙酮和酒精将光栅黏贴处清洗干净;

(2)将光栅串的两端分别用速干胶固定,并给光栅一定的初始应力,为了保持各传感器光栅的初始应力相同,黏贴时光栅两端都悬挂了相同的重物;

(3)沿光栅串均匀的涂上一层环氧胶,环氧胶的弹性模量与泊松比等参数对锚杆传感器的性能有重要影响,因此本步骤是制作光纤锚杆传感器的

关键。

3 滑坡模型试验

3.1 模型试验介绍

滑坡已经成为三峡库区面临的主要地质灾害之一,复杂的地质条件是滑坡灾害发生的主要诱发因素。马家沟滑坡地处湖北省秭归县归州镇澎家坡村,位于长江左岸的支流吒溪河左岸。属于上扬子台坪之秭归台褶束东缘,构造体系处于新华夏构造体系鄂西隆起带北端和淮阳山字型构造体系复合部位,褶皱构造主要为近南北向秭归向斜,断裂构造主要有北东向压扭性水田坝断裂及黄荆树坪断裂^[15]。滑坡目前处于基本稳定至临界状态。

本模型试验以长江三峡地区重大工程灾变滑坡为依托,以吒溪河马家沟1号滑坡为原型,主要研究应变场、应力场等在载荷变化过程中的响应规律及耦合特性,同时验证光纤光栅锚杆传感器及光纤光栅应变传感器等监测手段的有效性。制作的模型箱尺寸:长3.0m,宽1.5m,高1.5m(图2)。模型箱以槽钢为骨架,内部为钢化玻璃,模型箱的两侧设有水箱,水箱与箱体内部有小孔相连。



图2 光纤光栅边坡模型试验装置
Fig. 2 FBG slope model test device

模型试验材料为河砂、高岭土、水,按照重量比为9:1:1混合而成。边坡顶部长度、坡体水平距离、坡脚距模型箱的距离均为1m,坡体角度为45°。试验采用了顶部千斤顶加载的方式,在离坡肩25cm处进行分级加载。

3.2 光纤光栅传感器布置

光纤光栅锚杆传感器与水平面夹角为15°,竖向和水平向间距分别为25cm和30cm。锚杆传感器共15根,沿坡面不同高度布设3层,每层5根,如图3a所示。编号顺序为从左到右,由外及内,如最上层最外侧的锚杆传感器为M1-1,最底层中间位置的

锚杆传感器编号为M3-3。两侧分别黏贴4支光栅的锚杆传感器分别布置在M1-2与M1-4处,光栅串分别位于锚杆传感器的上侧与下侧,其余锚杆传感器的光栅均位于上侧。锚杆传感器上的光栅编号采用了由外及内的顺序(最靠近坡面的光栅编号最小)。

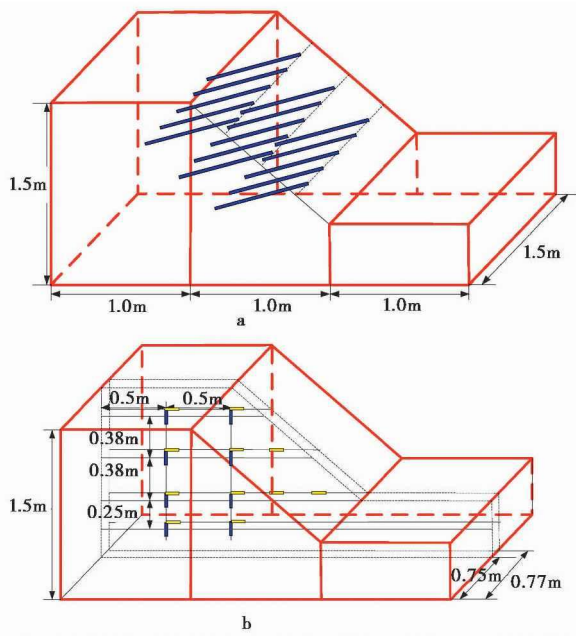


图3 光纤传感器布置

Fig. 3 Arrangement of FBG sensors

a. 光纤光栅锚杆传感器布置; b. 光纤光栅应变传感器布置

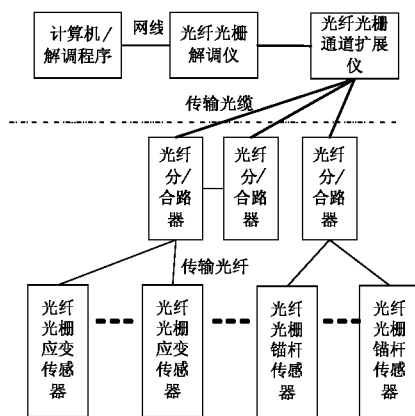


图4 光纤传感网络示意图

Fig. 4 Schematic diagram of FBG sensing network

同时,在高度为0.25m、0.5m、0.88m与1.26m处平面中线位置横向布设了4根光栅串;在坡肩及距坡肩0.5m距离处,沿坡体的中间切面纵向布设了2根光栅串(图3b)。应变传感光栅的编号方式采用了从上到下,从外及内的顺序,如0.88m处横

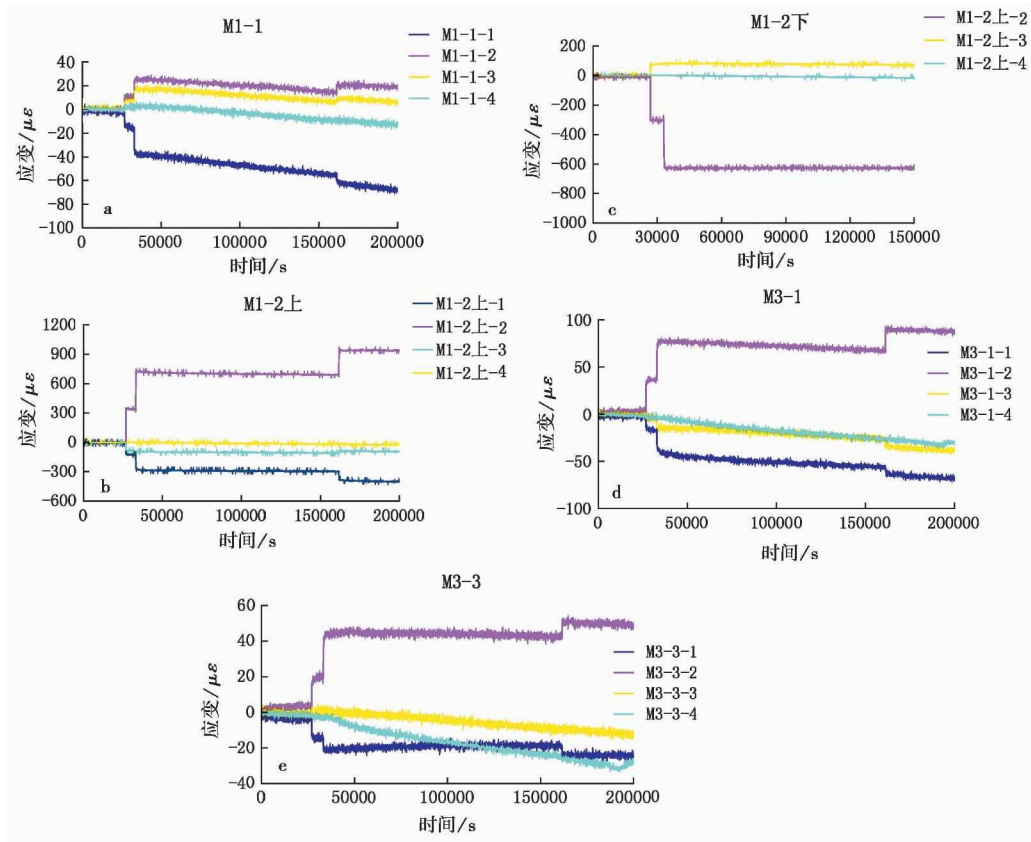


图5 光纤光栅锚杆传感器测试结果

Fig. 5 Test results of FBG anchor sensors

a. M1-1 的测试结果; b. M1-2 上侧光栅的测试结果; c. M1-2 下侧光栅的测试结果; d. M3-1 的测试结果; e. M3-3 的测试结果

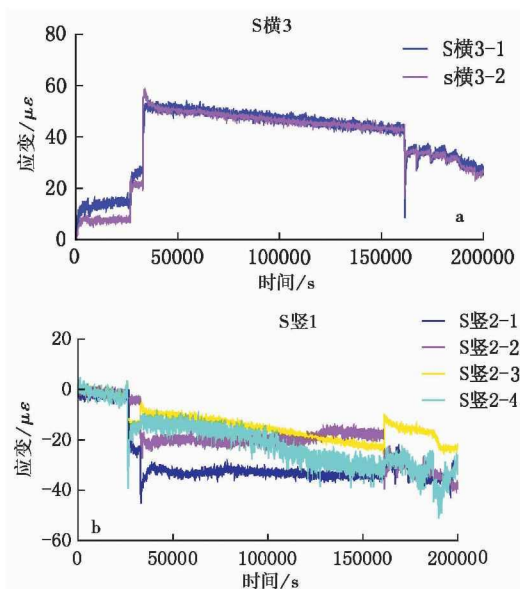


图6 光纤光栅应变传感器测试结果

Fig. 6 Test results of FBG strain sensors

a. 横向应变传感器的测试结果; b. 纵向应变传感器的测试结果



图7 边坡表面裂纹

Fig. 7 Cracks on slope surface

向光栅串最外侧的光栅为 s 横 2-1, 坡肩处纵向光栅串的最顶端的光栅编号为 s 纵 1-1。

3.3 光纤光栅传感网络

试验中包括温度补偿光栅在内共使用了 98 支光栅, 网络容量较大。传感网络采用了波分复用与时分复用相结合的组网方式(图 4)。FBG 锚杆传感器与 FBG 应变传感器连接到一个传感网络中, 它

们分别占用不同的光通道。光纤分/合路器的作用是将一束光等光强分为多路或将多路光合为一路,由于同一路中的光纤传感器中心波长各不相同,因此能够实现光纤传感器的波分复用。光纤光栅通道扩展仪的作用是将光纤光栅解调仪的一个通道通过时分复用技术扩展为多路,进一步增加传感网络中传感器的容量。光纤光栅解调仪为整个传感网络的核心装置,能够发射红外光,同时实现传感器波长信号的解调。

4 模型试验结果及分析

试验采用分级加载的方式,分4步进行,每步加载 10MPa。该试验采用的千斤顶加载面积为 12.6cm²,采用均布加载的方式。

4.1 锚杆传感器测试结果

在整个加载过程中,光纤光栅锚杆传感器的中心波长呈阶梯状变化,转化为应变后的测试结果如图 5 所示。

由图 5 可以得出,第 1 步加载对锚杆传感器的影响并不大,荷载主要起到了压实坡体的作用,以后 3 步加载则对锚杆传感器的影响较大。M1-2 上下两侧的光纤光栅中心波长变化趋势相反,即受力情况相反。M1-1、M1-2、M3-1 与 M3-3 上侧的光纤光栅受力趋势基本一致,且锚杆传感器最外侧的光栅为压应变,即坡面处有应力集中现象;而锚杆传感器上由外及内第二支光栅为拉应变,第三支与第四支光栅应变较小。同时,靠近模型箱及边坡边缘部分应变较小,中间位置处应变较大,M1-2 上-2 处的应变大 1000 $\mu\epsilon$,在较大的均布荷载下,锚杆已经达到了所能承载的最大荷载,逐步出现了变形,边坡逐步出现了破坏。因此,锚杆传感器第二支光栅所在的曲面最容易形成滑移面。

4.2 应变传感器测试结果

顶部与底部的横向应变传感器测试结果没有明显变化,内部的纵向应变传感器测试结果也变化不大。s 横 3 与 s 竖 1 的应变传感器测试结果如图 6 所示。

由图 6a 可以看出,横向应变传感器的变化趋势较为明显,坡脚处的 s 横 3 最外侧的两个光栅所受应变为拉应变,并且应变呈阶梯状增大,直至第四步加载,应变出现了回弹,可能在拉应变下边坡内部出

现了裂纹,拉力卸载。

同时,图 6b 中坡体处竖向光栅在第一步加载后应变很小,在第二步加载后受到压应变,也在第四步加载时应变出现了回弹,出现了压力释放现象。

4.3 综合分析

对光纤光栅锚杆传感器与光纤光栅应变传感器的测试结果进行综合分析,可以得出,随着加载的增大,边坡内部的应力分布不同,且随着荷载的增加,边坡内部会逐渐形成滑移面。同时,边坡表面开始出现裂纹与块状滑移(图 7)。

5 结 论

(1) 基于铝棒和光纤光栅串研制了光纤光栅锚杆传感器,具有测量精度高、对周围介质干扰小等优点。

(2) 采用河砂与高岭土为主体材料,建立了边坡顶部长度、坡体水平距离、坡脚距模型箱的距离均为 1m,坡体角度为 45°的边坡模型,并布置了 15 根光纤光栅锚杆传感器与 6 根光纤光栅应变传感器。

(3) 在边坡顶部进行分级加载,试验结果表明,锚杆传感器最外侧的光栅为压应变,而锚杆传感器上由外及内第二支光栅为拉应变;光纤应变传感器的监测结果也与此吻合。因此,锚杆传感器第二支光栅所在的曲面最容易形成滑移面。

(4) 本文为研究边坡滑移面的形成过程提供了较好的技术手段与试验数据,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 隋海波,施斌,张丹,等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3725 ~ 3731.
Sui Haibo, Shi Bin, Zhang Dan, et al. Distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3725 ~ 3732.
- [2] 王宝军,李科,施斌,等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 325 ~ 332.
Wang Baojun, Li Ke, Shi Bin, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 325 ~ 332.
- [3] 胡新丽,唐辉明,朱丽霞. 汶川震中岩浆岩高边坡破坏模式与崩塌机理[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2011, 36(6): 1149 ~ 1154.
Hu Xinli, Tang Huiming, Zhu Lixia. Collapse mode and mechanism of high magmatite rock slope in Wenchuan epicentral area.

- Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2011, **36**(6): 1149 ~ 1154.
- [4] 王宝军, 施斌. 边坡变形的分布式光纤监测试验研究及实践[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, **30**(1): 28 ~ 34.
Wang Baojun, Shi Bin. Distributed fiber monitoring test and its application to slope deformation. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, **30**(1): 28 ~ 34.
- [5] 张振华, 冯夏庭, 周辉, 等. 基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 603 ~ 612.
Zhang Zhenhua, Feng Xiating, Zhou Hui, et al. Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 603 ~ 612.
- [6] WY Lia, CC Chenga, YL Lob. Investigation of strain transmission of surface-bonded FBGs used as strain sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2009, **149**: 201 ~ 207.
- [7] William R Allan, Zachary W Graham, Jose R Zayas, et al. Multiplexed fiber bragg grating interrogation system using a microelectro-mechanical fabry-perot tunable filter[J]. Ieee Sensors Journal, 2009, **9**(8): 937 ~ 943.
- [8] 赵雪峰, 宋钢兵, Michael Fernandez 等. 一种预张拉大标距光纤光栅应变传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(5): 576 ~ 579.
Zhao Xuefeng, Song Gangbing, Michael Fernandez, et al. Research on one kind of long sensing gauge fiber bragg grating sensor with pretension. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, **20**(5): 576 ~ 579.
- [9] 王静, 冯德军, 隋青美, 等. 基于拉杆结构的光纤光栅渗压传感器研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 686 ~ 693.
Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei, et al. Study of optical fiber grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure. Acta Optica Sinica, 2010, **30**(3): 686 ~ 693.
- [10] A Kerrouche, WJO Boylea, Y Gebremichaela, et al. Field tests of fiber bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring[J]. Sensors and Actuators A, 2008, **148**: 68 ~ 74.
- [11] P Moyoa, JMW Brownjohnb, R Sureshc, et al. Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure[J]. Engineering Structures, 2005, **27**: 1828 ~ 1834.
- [12] 王静, 冯德军, 隋青美, 等. 新型光纤光栅渗压传感器在隧道涌水模型中的应用[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(10): 1286 ~ 1289.
Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei, et al. Application of a novel optical fiber grating seepage pressure sensor in tunnel water gushing model. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, **20**(10): 1286 ~ 1289.
- [13] 项连清, 李宏男, 任亮, 等. FBG 传感器在碾压仿真混凝土大坝模型实验中的应用[J]. 世界地震工程, 2006, **22**(4): 27 ~ 34.
Xiang Lianqing, Li Hongnan, Ren Liang, et al. Experimental study on models of artificial roller compacted concrete dam by using FBG sensor. World Earthquake Engineering, 2006, **22**(4): 27 ~ 34.
- [14] 董建华, 谢和平, 张林, 等. 光纤光栅传感器在重力坝结构模型试验中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, **41**(1): 41 ~ 46.
Dong Jianhua, Xie Heping, Zhang Lin, et al. Application of optical fiber grating sensor in gravity dam structure model test. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2009, **41**(1): 41 ~ 46.
- [15] 涂鹏飞, 岑仲阳, 余和元. 马家沟滑坡变形特征及稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2011, (4): 95 ~ 97.
Tu Pengfei, Cen Zhongyang, Yu Heyuan. Majiagou landslide deformation characteristics and stability analysis. Railway Engineering, 2011, (4): 95 ~ 97.