

光纤传感技术在边坡模型试验中的应用

李焕强, 孙红月, 刘永莉, 孙新民, 尚岳全

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 关于边坡模型的坡体变形监测较为困难, 将光纤传感技术应用于边坡模型试验尝试解决这一问题。构建边坡模型进行人工降雨试验, 采用光纤布里渊散射光时域反射测量技术(BOTDR)监测坡体变形和光纤光栅(FBG)传感技术监测坡面变形。将 BOTDR 光纤分层埋入坡体不同位置, 以边坡后缘模型箱为固定的参照点, 监测坡体内不同位置的应变变化; 将光纤光栅传感器铺设在坡面的不同位置, 以坡面后缘为固定参照点, 监测坡面各位置处位移变化。根据降雨前、降雨过程中及降雨后变形记录资料, 得到边坡在降雨作用下的变形规律: 在降雨初始一段时间内, 边坡并没有明显变形, 随着降雨时间的发展, 坡体和坡面位移会出现突发性的大幅度增长, 并且距坡面较近的土体产生较大的变形, 坡体底部变形较小。总体规律是随着坡体深度的增大, 坡体变形受降雨入渗的影响越来越不明显, 这解释了降雨诱发的均质土坡破坏容易出现在浅层的原因。在坡面上, 后缘产生较大位移, 而坡体前端位移较小。降雨停止后, 部分变形值会变小。试验结果表明, 用光纤 BOTDR 和 FBG 传感技术监测有众多的优点, 且光纤传感技术在岩土模型试验中具有良好的应用价值和前景。

关键词: 边坡工程; 边坡模型; 人工降雨; 布里渊散射光时域反射测量仪; 光纤光栅

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)08 - 1703 - 06

APPLICATION OF OPTICAL FIBER SENSING TECHNOLOGY TO SLOPE MODEL TEST

LI Huanqiang, SUN Hongyue, LIU Yongli, SUN Xinmin, SHANG Yuequan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: It is relatively difficult to monitor the deformation of slope body in model test. To solve this problem, the optical fiber sensing technique is applied to slope model test. By constructing physical model for slope under artificial rainfall, the deformation in slope body can be monitored by optical fiber sensing technology of Brillouin optical time domain reflectometer(BOTDR); and the deformation on slope surface can be monitored by fiber Bragg grating(FBG). Regarding the fixed point on the model box as the reference point, the variations in slope body can be monitored by the optical fiber preburied in the different locations of slope; and the deformation on slope surface can be achieved by the FBG sensor set on the slope surface. According to the recorded data of deformations before, during and after rainfalls, it can be found that the deformation of slope is not obvious in initial period of rainfall, but as the time goes on, there is a sudden growth of the deformation in the slope body and surface. The part of the slope closer to the surface has the larger deformation, but the part at the bottom of the slope has the least deformation. The overall law is that the influence of rainfall on slope body diminishes gradually with increase of depth of slope body. That can explain why the homogeneous soil-slope's failure induced by rainfall is easy to occur in shallow strata. In the slope surface, the maximum deformation appears in the trailing

收稿日期: 2008 - 03 - 12; **修回日期:** 2008 - 04 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40502026); 浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13027)

作者简介: 李焕强(1978 -), 男, 2002年毕业于成都理工大学地质工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡工程灾害方面的研究工作。E-mail: d05lihuanqiang@zju.edu.cn

edge of slope, and the minimum one appears in the front edge. After the rainfall, a part of the deformations in the slope reduces to a lower value. The experimental result has proven that the optical fiber sensing technologies of BOTDR and FBG have many advantages in the monitoring of geotechnical engineering, and they can offer practical references and prospects on application.

Key words: slope engineering; slope model; artificial rainfall; Brillouin optical time domain reflectometer(BOTDR); fiber Bragg grating(FBG)

1 引言

光纤传感^[1]作为一种新型的监测技术,由于其具有可靠性好、抗干扰能力强;量测精度高;长距离监测,测点多,测量范围广;抗电磁干扰、抗腐蚀、可在恶劣环境下工作的特点,近年来发展迅速。

1993年, A. Mendez 等^[2]首先提出了把光纤传感器用于混凝土结构的检测。随后,日本和美国的光纤传感器已经发展到对桩基、地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的测量或监测,如美国佛蒙大学 1992 年将分布式光纤应力应变传感器安装在威努期基河水电站坝内,以监测未来 50 a 内水坝的安全性,该传感器可实时报告大坝遭受洪水和巨大震动后的情况。

台湾国立交通大学防灾工程研究中心 2002 年研发了 FBG, BOTDR 边坡变形监测仪、TDR 边坡滑动监测系统,并用于监测石门水库边坡变形。武汉工业大学与湖北省岩崩滑坡研究所 1995 年合作研制了光纤位移计、光纤压力计,其性能稳定,线形关系好,在牢固性、抗冲击及振动、防潮、抗电磁干扰等方面优于传统的电磁传感器^[3]。南京大学地球环境计算工程研究所成功地将 BOTDR 分布式光纤应变监测技术应用到了南京市的隧道工程健康诊断和监控^[4];此外,光纤传感技术还在高陡边坡深部变形监测^[5]、堆石坝混凝土面板随机裂缝监测^[6]、三峡库区巫山县滑坡地质灾害预警示范站监测中获得应用。

虽然应用光纤传感技术进行变形监测有许多优点,并在岩土工程的广泛领域得到有效应用,但这些优势监测技术在岩土模型试验中还未得到发展。目前仅有蒋小珍等^[7]将光纤传感技术用于岩溶塌陷的模型试验中,而在边坡模型试验中还鲜见应用报道。

目前关于降雨对边坡变形的影响试验研究众多,但由于在坡体内布设监测设备比较困难,坡体不同深度、不同位置受降雨的变形规律及其与降雨

历时之间的关系还没有深入的研究。在前人研究的基础上^[8~12],为进一步揭示在降雨作用下边坡变形的规律,结合光纤传感器诸多优点,构建了用光纤传感技术监测的人工降雨边坡试验模型。

2 光纤传感原理

2.1 BOTDR 的测量原理

布里渊散射光时域反射测量仪(BOTDR)是国际上新近发展起来的一项分布式光纤应变监测技术。其测量原理是当单频光在光纤内传输时会发生布里渊背向散射光,而布里渊背向散射光的频移(Brillouin frequency shift)与应变和温度成正比。为了扣除温度变化对频移的影响,可利用一段不受外力作用的自由光纤进行温度补偿,并根据布里渊频移变化量与应变的关系,求得光纤的应变^[4, 13]为

$$\varepsilon = \frac{\Delta\nu_B}{\nu_B(0)C} = \frac{\nu_B(\varepsilon) - \nu_B(0)}{\nu_B(0)C} \quad (1)$$

式中: $\nu_B(\varepsilon)$ 为某应变下的布里渊频移, $\nu_B(0)$ 为无应变下的布里渊频移, C 为应变比例常数, ε 为应变。

目前研制仪器设备的最大测量距离为 80 km, 应变测量范围为 $-15\ 000 \sim +15\ 000 \mu\varepsilon$, 距离分辨率可达 1 m, 应变的测量精度达 $\pm 30 \mu\varepsilon$, 能基本满足边坡工程的监测要求。

2.2 FBG 的测量原理

布拉格光纤光栅传感器 FBG 的测量原理^[14, 15]是在光纤核心中一段纵向折射率周期性变化排列(光栅),其间周期性折射率改变间距以 Λ 表示,一般常使用的宽频光源入发光二极管、冷光二极管、半导体激光注入光纤中只有波长为 λ_B 的光会被反射回来。

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2)$$

式中: n 为光纤纤芯的有效折射率。

当光栅受到外力产生应变时,造成原本间距 Λ 的改变增加量为 $\Delta\Lambda$,代入式(2)可得

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta l \tag{3}$$

由应变公式得

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{4}$$

3 边坡模型及试验过程

3.1 边坡模型

模型包括降雨模拟系统、模型箱、坡体变形监测、坡面变形监测 4 部分。坡体内部的监测在布置监测位置上, 将坡体自下而上分为 5 个层次(如图 1 所示)。

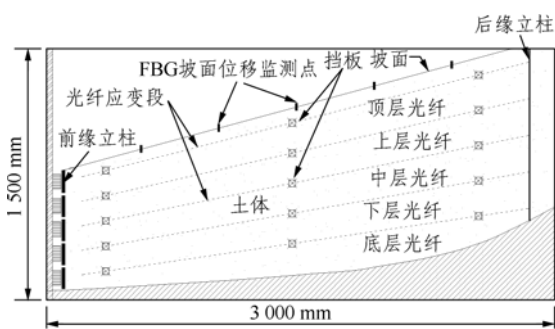


图 1 试验模型剖面图

Fig.1 Profile of experimental model

(1) 降雨模拟系统: 降雨主体是由 $\phi 20$ mm 的 PPR 承压管间隔 20 cm 并排焊接构成, 排管间隔每 10 cm 分布有 1 mm 小孔; 相应的试验模型及监测系统见图 2。供水系统是由自来水管和增压泵共同组成。



图 2 试验模型及监测系统

Fig.2 Experimental model and monitoring system

(2) 模型箱: 试验模型箱尺寸长宽高分别为

3.0, 2.0 和 1.5 m, 容积为 9.0 m³。模型箱底座和四周的骨架均采用型钢和钢板。模型底面做成斜面, 角度为 5°, 用砂浆抹平。模拟边坡底部基岩。箱体内坡体采用粉砂填充, 前端的厚度为 0.7 m, 坡角为 20°, 直到模型箱顶部。坡面铺一层粗石子, 防止降雨的明显冲刷(见图 2)。

(3) 坡体变形监测: 坡体变形监测采用 BOTDR 分布式光纤应变分析技术, 光纤铺设分 5 层分布在坡体中, 每层均设置应变段(见图 1)。试验采用 AQ8603 光纤应变分析仪分析采集数据。光纤应变分析仪采样分辨率设为 0.05 m。

(4) 坡面变形监测: 坡面变形监测采用 FBG 光纤光栅监测技术, 监测点等间距分布在坡面的后缘、中后、中部、中前、前端 5 个位置上(见图 1)。试验采用光纤光栅网络分析仪和微机结合实现自动监测存储数据, 其位移监测精度达到 1/1 000 mm。

3.2 光纤传感器埋设

(1) BOTDR 光纤传感器的敷设

BOTDR 光纤传感技术是以光纤本身作为传感器和信号传递介质的。在坡体中埋设光纤作为应变传感器, 监测坡体的变形。按深度将坡体分成 5 层, 每层敷设平行的 3 段传感光纤, 以充分测量坡体的变形, 如图 1 所示。每层光纤固定在后缘的立柱上作为监测基点。由于光纤与土体接触面很小, 其间摩擦力较小, 容易发生光纤与土体变形不协调的问题, 即土体发生位移变化而光纤没有随着土体变化。为解决这个问题, 在每个光纤应变段上设置 3 个与其垂直的挡板, 挡板固定在光纤上, 土体发生位移变化通过挡板传递给光纤, 达到光纤土体的变形协调(见图 3)。

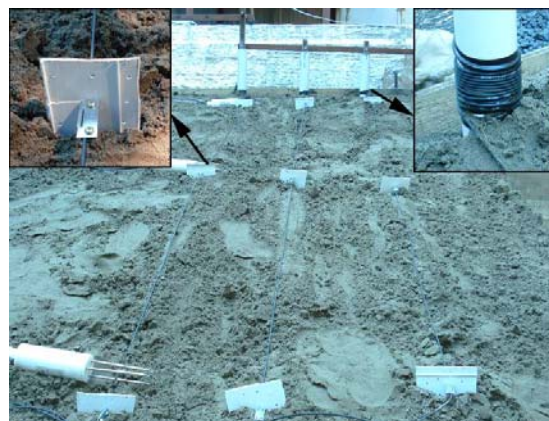


图 3 敷设光纤传感器

Fig.3 Laying of optical fiber

相邻层光纤之间均设有一段自由长度，将应变传感段区分开。在光纤应变段全部敷设完毕后，将光纤以不受力的方式埋入土体中，用于温度感应段，获得数据可对传感段光纤应变数据进行温度补偿处理，消除坡体内温度对光纤传感器的影响(见图 4)。

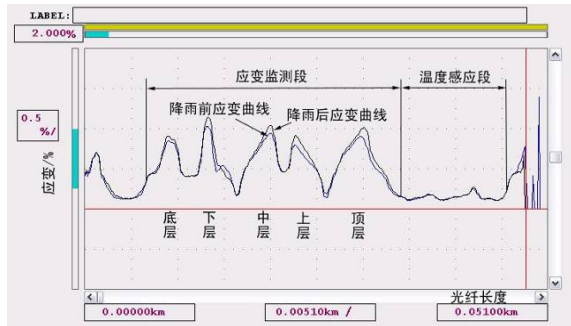


图 4 光纤 BOTDR 数据处理

Fig.4 Data processing of optical fiber BOTDR

(2) 光纤光栅FBG传感器的敷设

光纤光栅 FBG 传感器可以进行高精度的点位移测量。FBG 测点布置在坡面上(见图 1)。为使测点完全反映坡面位移而不影响降雨入渗的效果，将测点固定在充满粉土的铁网土柱上，将其埋入坡面表层(见图 5)。光纤 FBG 传感器固定在模型箱后缘(见图 6)，作为监测基点，用细钢丝与 FBG 传感器相连。



图 5 敷设 FBG 传感器测点

Fig.5 Laying FBG monitoring points

3.3 试验过程

首先对各个监测指标进行初始值测量，将模型静置一周，待各监测指标数值基本稳定后，开始进行降雨试验，坡面出现局部破坏后停止降雨。从降雨之前开始对各项指标进行不间断监测并记录，直到降雨停止后各项指标值基本稳定为止。降雨历时近 2 h，持续监测时间近 8 h。



图 6 FBG 传感器

Fig.6 FBG sensors

4 试验结果分析

4.1 试验数据处理

BOTDR 监测数据是用光纤应变分析仪记录，用其提供的分析软件对数据进行处理。试验中监测的数据减去试验前的初始数据，得到受降雨影响边坡坡体内光纤的应变值，如图 4 所示。由于试验中和试验前数据相比，温度感应段的数值基本没有变化，表明坡体内温度较恒定，可以不考虑温度对试验结果的影响。对每层的光纤应变监测段进行平均，就可以得到坡体每层的应变均值。

光纤光栅的监测数据按一定的时间等间隔自动保存成 dat 格式文件，可直接分析。

4.2 坡体变形分析

(1) 降雨过程及雨后的历时变化

从坡体位移监测结果来看，降雨开始最初一段时间对边坡没有明显影响，经历一段时间之后坡体变形会出现一个迅速增大的过程，并且变化幅度较大；当降雨停止后，变形会出现部分恢复的现象。所以，在短历时降雨作用下，坡体发生的变形不明显；持续长时间降雨，坡体会发生突发性的明显变形，如果此时坡体前端无支护结构或抗滑推力不足，就会导致边坡的失稳。

(2) 坡体不同深度变形量变化规律

从不同深度处坡体产生的变形来看，在经历降雨后，坡体顶层、上层产生的应变最大，变化速度较快，下层、底层应变较小，变化速度也较慢。在降雨停止后，坡体应变明显变小，其中顶层、上层应变下降幅度最大，速度也最快，底层下降幅度最小，速度也较慢(见图 7)。图 7 中降雨后部分应变曲线出现小范围波动，分析其原因，可能是由于坡体

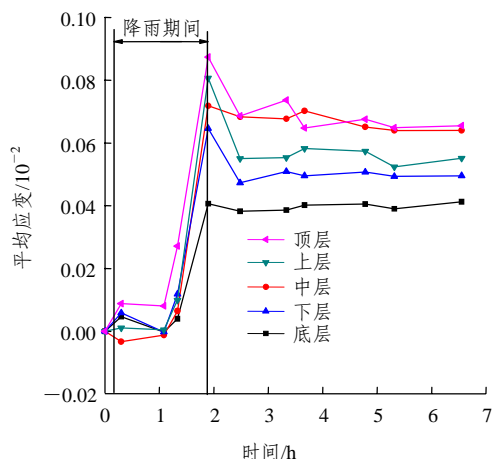


图 7 不同深度坡体平均应变与时间的关系

Fig.7 Relation between average strain in different depths and times

内含水量降低, 空隙水流失导致坡体内部部分区域存在小范围的应力变化, 也是对土体的变形时产生扰动所造成的。

因此, 随着坡体深度的增大, 边坡坡体的变形受降雨入渗的影响越来越不明显, 边坡的顶层受降雨影响的变形最为明显, 其次是上层, 底层受影响最小。这可以解释由降雨引起的均质土坡的破坏一般发生在浅层的原因。

4.3 坡面位移变形分析

坡面的位移监测结果表明: 和坡体变形一致, 在降雨过程初期, 坡面没有明显位移, 当经历一段时间的降雨过程之后, 会突发性出现沿坡面向下的位移, 其中后缘位移最大, 前端位移最小。在降雨过程结束坡体稳定以后, 坡面位移仍是后缘最大, 前端(见图 8), 这是由于试验模型将坡体的前端固定的原因, 与前端存在抗滑桩的情况相一致。坡面总体变形规律是从后缘至坡体前端变形由大变小。但是, 在坡面的中后、中部及中前部 3 个位置上的位移监测结果并没有严格符合这个规律, 其原因是在降雨作用下, 边坡坡面有些位置会出现平行坡面走向的裂缝, 这些裂缝的存在, 会使裂缝的上游监测点的位移值减小, 下游检测点的位移值增大, 所以才会出现这种现象。

因此, 在试验模型条件下, 边坡受降雨的影响产生变形的规律是: 短期的降雨作用对边坡的变形没有明显的影响, 但是足够长时间的降雨会使边坡变形产生一个突发性的发展过程, 并且在降雨过程中出现一个变形峰值, 在降雨停止充分稳定之后,

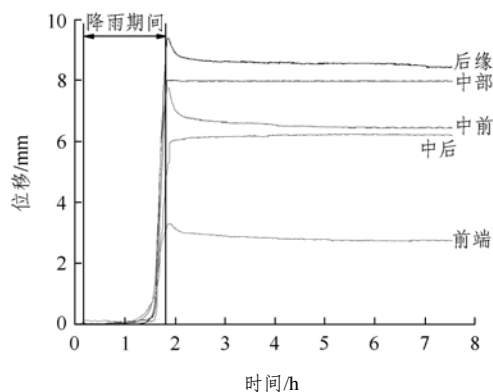


图 8 坡面位移随时间的关系

Fig.8 Relation between displacement in slope surface and times

位移有所恢复, 但是仍有大部分的残余变形。坡体不同深度受降雨作用的影响也不同, 随着与坡面距离的增大, 变形逐渐变小, 即坡面附近变形最大, 坡底附近变形最小; 坡面变形的总体规律是从后缘至坡体前端变形逐渐变小。

5 结 论

将光纤传感技术用于边坡人工模拟降雨模型试验中, 埋设在坡体的不同深度和位置进行监测, 可以弥补常规监测手段对坡体内部监测不足的缺陷, 得到边坡模型不同深度、坡面不同位置在降雨作用下变形的规律及其与降雨历时关系, 获得其他试验监测方法不易得到的数据和结论。

边坡模型试验证明光纤用于边坡模型试验中是成功的, 且具有以下优点:

- (1) 可以布设在坡体不同深度和位置, 监测坡体内部变形。
- (2) 监测工作方便, 容易控制, 不会产生因测量对模型产生扰动的影响。
- (3) 高精度, 受环境影响小, 应用条件不高。
- (4) 自动监测记录, 没有人为误差。

研究表明, 光纤 BOTDR 和 FBG 传感技术在岩土模型试验中有良好的应用价值和广阔的前景。

参考文献(References):

[1] 梁 伟, 薛晓辉. 光纤传感技术在边坡稳定监测中的应用与发展[J]. 山西建筑, 2007, 33(28): 132 - 133.(LIANG Wei, XUE Xiaohui.

- Development and application of optical fiber sensing technology of stability monitoring of slope[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(28): 132 - 133.(in Chinese))
- [2] MENDEZ A, MORSE T F, REINHART L J et al. Measurement of the internal strain in concrete elements using embedded fiber sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 2072: 362 - 369.
- [3] 刘 雄. 光纤传感技术在岩土力学与工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(LIU Xiong. On the application of optical fiber sensor to geomechanics and geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [4] 施 斌, 徐洪钟, 张 丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493 - 499.(SHI Bin, XU Hongzhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 493 - 499.(in Chinese))
- [5] 万华琳, 蔡德所, 何薪基, 等. 高陡边坡深部变形的光纤传感监测试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 20 - 23.(WAN Hualin, CAI Desuo, HE Xinji, et al. Experimental research on monitoring deep deformation of high steep slopes by using optical fiber sensing[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Science), 2003, 23(1): 20 - 23.(in Chinese))
- [6] 蔡德所, 何薪基, 郑 勇, 等. 混凝土面板堆石坝面板裂缝光纤传感技术研究[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 2000, 22(1): 1 - 4.(CAI Desuo, HE Xinji, ZHENG Yong, et al. Study on monitoring technique by using optical fiber sensing network for cracks of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering(Yichang), 2000, 22(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [7] 蒋小珍, 雷明堂, 陈 渊, 等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (6): 75 - 79.(JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, CHEN Yuan, et al. An experiment study of monitoring sinkhole collapse by using BOTDR optical fiber sensing technique[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (6): 75 - 79.(in Chinese))
- [8] 汤明高, 许 强, 黄润秋, 等. 滑坡体基质吸力的观测试验及变化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 355 - 362.(TANG Minggao, XU Qiang, HUANG Runqiu, et al. Experiment and analysis of suction of unsaturated soil in slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 355 - 362.(in Chinese))
- [9] 文高原, 姚鹏运, 曾宪明, 等. 降雨前、后夯实填土边坡破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 747 - 754.(WEN Gaoyuan, YAO Pengyun, ZENG Xianming, et al. Testing study on failure mode of filled-soil slope before and after rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 747 - 754.(in Chinese))
- [10] 罗先启, 刘德富, 吴 剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 476 - 2 483.(LUO Xianqi, LIU Defu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 476 - 2 483.(in Chinese))
- [11] 周 中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 堆积层边坡开挖致滑的原位监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 065 - 2 070.(ZHOU Zhong, FU Helin, LIU Baochen, et al. Study on in-situ monitoring of cutting tests on a well-instrumented colluvial slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 065 - 2 070.(in Chinese))
- [12] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机制离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 64 - 68.(YAO Yuchun, YAO Lingkan, YUAN Biyu. Analysis of a centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 64 - 68.(in Chinese))
- [13] 丁 勇, 施 斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 338 - 342.(DING Yong, SHI Bin, CUI Heliang, et al. An optic fiber sensing net applied to slope monitoring based on Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 338 - 342.(in Chinese))
- [14] 龙昊波. 光纤 Bragg 光栅传感器在边坡中的应用研究[硕士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.(LONG Haobo. Research on application of optical fiber Bragg grating sensor in slope[M. S. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.(in Chinese))
- [15] 吴晓冬. 光纤 Bragg 光栅应变传感技术及其应用研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2005.(WU Xiaodong. Fiber Bragg grating strain sensor technology and application study[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.(in Chinese))