

# 公路岩质边坡应力监测离心模型试验与应用

郭永建<sup>1</sup>, 谢永利<sup>2</sup>, 牛富生<sup>1</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 对公路岩质边坡的支护锚杆进行应力监测, 并依此评价边坡稳定性时, 存在应力变化规律与预警值难以准确确定的问题。基于离心模型试验与现场试验的方法, 以广陕高速一段岩质边坡为例, 对该问题进行研究。结果表明: 通过模型试验可得出边坡失稳前的应力变化曲线, 利用幂函数对其进行拟合, 结合预警百分比的方法确定应力监测的预警范围; 根据现场试验监测结果得出, 采用离心模型试验的成果对边坡的稳定性进行应力监测评价具有可行性, 监测过程中应兼顾周边环境的影响。

**关键词:** 公路岩质边坡; 应力监测; 离心模型试验; 预警

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

## Centrifugal Model Test Research and Application on Stress Monitoring for Highway Rock Slope

GUO Yongjian<sup>1</sup>, XIE Yongli<sup>2</sup>, NIU Fusheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Undergroud Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** When the stress monitoring is used to evaluate the highway rock slope stability, the problem to determine the variable regularity of stress and warning value appears. A case study was made of a typical slope along Guang-shaan Expressway to research the problems with the method of centrifugal model test and field test. The model test results show that the model test get the variable regularity of stress before failure, the variable curves are fitted with the power function, and the method of warning percentage is adopted to determine the warning value area. The field test results show that centrifugal model test results can be applied to evaluating the highway rock slope stability with stress monitoring; in the course of the stress monitoring, the researcher should notice the influence of the surrounding environment on slope.

**Key words:** highway rock slope; stress monitoring;

centrifugal model test; early-warning

随着我国西部山区高速公路建设的不断发展, 人为开挖产生的大量岩质边坡的稳定性影响着公路安全运营。一般在设计与施工中均对该类边坡进行锚杆支护, 若能够对支护锚杆进行应力监测评价边坡的安全状况, 则既经济又能及时预警。

在岩质边坡的失稳过程中, 研究人员可以通过现场试验监测的方式获得应力的变化规律, 继而提出应力监测的预警值。因此如何获取应力变化规律变得尤为重要, 仅仅依靠现场监测很难满足预警研究的要求。鉴于此, 本文提出离心模型试验与现场试验相结合的研究手段来实现岩质边坡内部应力变化规律的获取。离心模型试验的机理是通过增加岩体的自重使边坡失稳, 更加真实地重现实际边坡在重力作用下的失稳过程。

岩质边坡离心模型试验的研究由来已久。Stewart 等<sup>[1]</sup>利用离心模型试验研究边坡的倾倒破坏, 是使用离心模型试验研究边坡失稳的首次尝试。陈祖煜等<sup>[2-5]</sup>将倾斜台与离心机相结合研究岩质边坡的倾倒破坏, 同时首次将锚固系统施加到边坡当中, 并利用“人造石”作为岩体替代材料, 模拟结构面存在时的岩质边坡破坏模式。邓卫东等<sup>[6]</sup>采用碎石加泥浆胶结的方式模拟完全碎裂型路堑岩质边坡的破坏形式, 并利用离心模型试验得出了碎裂边坡的破坏形式是自上而下的过程。冯振等<sup>[7]</sup>通过离心模型试验重现了斜倾厚层岩质斜坡视向滑动的“后部块体驱动-前缘关键块体瞬时失稳”模式。在现场试验研究上, 何满潮等<sup>[8-9]</sup>在利用超前滑动力学的物理模型试验验证应力监测可行性的基础上, 将应力监测和远程监测预报系统相结合, 对多处滑坡做出了及时预警。

已有的文献中,国内外学者对于岩质边坡破坏机理进行离心模型试验和现场研究<sup>[10-20]</sup>,取得了一定的成果.但对于加入锚固系统并进行应力监测的离心模型试验研究还较少.因此,开展应力监测下的岩质边坡破坏过程的土工离心模型试验具有较大的研究和参考意义.本文以广陕高速公路的一段岩质边坡工程为例,采用离心模型试验与现场试验的方法对应力监测存在的问题做进一步研究.

## 1 工程概况

广陕高速 K54+240~K54+336 位置处的岩质边坡为三级边坡,高 30 m,每级边坡高均为 10 m,其中一、二级边坡坡度为 1.00:0.75,三级边坡坡度为 1:1.工程地质概况如图 1 所示,该边坡为砂岩夹泥岩,受多组结构面与软弱泥岩夹层的影响,实际岩层为单斜结构,岩层产状为  $339^{\circ}\angle 8^{\circ}$ .根据地表地质调绘和边坡区基岩露头量测统计,主要发育两组裂隙: $\angle 67^{\circ}$ ,微张,裂隙面较平直; $\angle 75^{\circ}$ ,闭合~微张,裂隙面较平直.结合地质勘察资料,认为该边坡潜在的滑动面有三种可能,如图 2 所示,分别为 3—6—7 型、2—5—6—7 型、1—4—5—6—7 型三种.

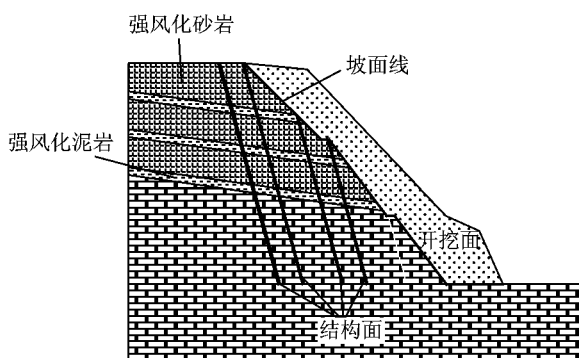


图 1 边坡工程地质

Fig.1 Slope engineering geology

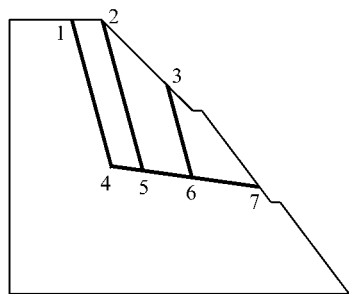


图 2 边坡潜在滑动面

Fig.2 The potential slip plane

## 2 边坡离心模型试验方案

### 2.1 替代材料的选择

模型试验所采用的设备为 TLJ-3 型土工离心机,最大离心加速度为  $200g$ ,最大容量为  $60\text{ g}\cdot\text{t}$ ,有效半径为  $2.0\text{ m}$ ,模型箱尺寸为  $70\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 36\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高).在离心模型试验中所选择的模型与原型尺寸相似比为 1:100.

砂岩替代材料采用重晶石粉、石英砂、石膏、水按照不同配比制备,岩石材料的相似主要考虑弹性模量、抗剪强度、重度的相似,砂岩替代材料的选取如表 1 所示,其中以石膏作为胶结剂.通过材料的对比得出替代材料基本同砂岩的刚度与强度以及重度相似,可以利用替代材料制备的岩体进行试验.其中,弱风化砂岩的重度要稍大于替代材料,但是由于弱风化岩位置不处于滑动面,所以较小的重度差异造成的影响基本可以忽略.

结构面与强风化泥岩位置处为边坡潜在滑动面位置,主要考虑抗剪强度的相似.用拌合好的泥浆模拟近似垂直的结构面和泥岩夹层,抗剪强度为  $13\text{ kPa}$ ,内摩擦角为  $19^{\circ}$ ,在强度上基本与实际结构面和泥岩夹层处的强度相似.

测试用全长黏结型锚杆替代材料应与实际锚杆保持弹性模量和锚杆直径的相似,若根据相似比选择锚杆尺寸,锚杆的替代材料类似极细的铁丝,直径数量级约为  $10^{-2}\text{ cm}$ ,除无法贴设测试元件以外,更无法模拟锚杆与注浆体的黏结效果.通过试验分析采用加工高刚度、高强度钢片(截面为矩形,弹性模量可达  $200\text{ GPa}$ )进行锚杆的模拟,钢片截面尺寸为  $1.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ ,钢片上部贴设应变计监测应力变化.锚杆轴力的计算按照弹性问题进行分析,锚杆的弹性模量和应变测量值与加速度没有换算关系,即锚杆应力也不随加速度改变,但轴力数值是与锚杆截面面积相关的量,由于截面面积随速度值变化转化为原型时也不断变化,轴力表达式可表述为

$$F = n^2 \sigma A$$

式中: $F$  为轴力, $n$  为离心加速度, $\sigma$  为应力, $A$  为锚杆模型截面面积.

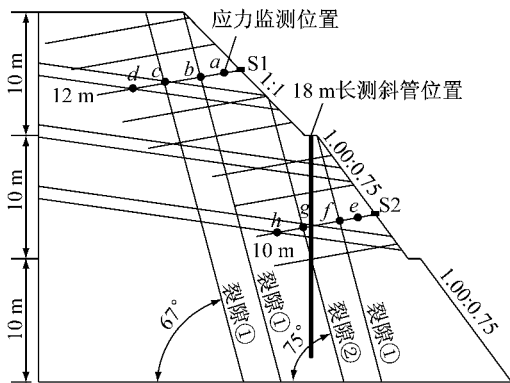
### 2.2 试验方案的选取

试验设计边坡与实际边坡的开挖支护形式相同,图 3a 为边坡实际支护与监测方式,二、三级采用锚杆支护,现场边坡开挖支护采用的是由上而下开挖,开挖完成二、三级边坡后再支护的形式,应力监

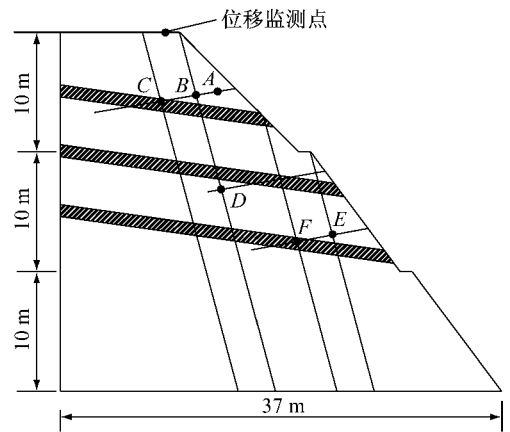
表 1 模型试验相似材料设计  
Tab.1 Similarity material design of model experiment

岩石类型	弹性模量/ GPa	石粉:石英砂: 石膏:水	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
强风化砂岩	0.58	—	21.0	114	28
强风化砂岩 替代材料	0.52	1.50:1.00:0.25:0.50	20.0	98	26
弱风化砂岩	6.70	—	26.7	1 350	35
弱风化砂岩 替代材料	6.90	1.0:1.2:0.7:0.5	24.0	1 200	33

测部位为三、二级边坡的 S1 与 S2 两处的锚杆. 图 3b 为试验采用的应力监测位置图, 选择 A~F 点作为离心模型试验应力监测点位, 利用激光位移传感器对坡顶一点的竖向位移进行监测. 模型试验的工况为: ① 无开挖状态的边坡在 100g 离心加速度下运行 30 min; ② 停机开挖三级边坡, 在 100g 离心加速度下运行 30 min; ③ 停机开挖二级边坡, 在 100g 离心加速度下运行 30 min; ④ 停机开挖一级边坡, 并支护监测三级、二级边坡, 之后不断增加离心加速度直至边坡破坏.



a 边坡实际开挖支护监测图



b 试验监测图

图 3 边坡监测模式

Fig.3 Slope monitoring form

3 试验结果分析

试验完成时的边坡破坏形式如图 4 所示, 滑动面为图 2 所示的 1—4—5—6—7 型滑动面, 属于最深层的破坏形式. 图 5 为边坡开挖支护后直至边坡破坏时的锚杆轴力变化图, 其中轴力数据换算为实际边坡尺寸下的锚杆轴力值. 边坡破坏时的离心加速度为 132g, 轴力最大点为 C 和 F 两点, 均为 1—4—5—6—7 型滑动面上的点位. 图 6 为换算为实际边坡尺寸下的坡顶点位的竖向位移随离心加速度变化曲线, 与锚杆轴力逐渐变化的曲线相比, 位移曲线存在一定的滞后性和突变性, 位移值在加速度 110g 以前基本为零; 在加速度增大为 122g 时位移突然出现明显变化, 位移值为 12.3 cm; 在 128g 时, 位移值增大到 1.02 m; 最终在 132g 时, 位移突变

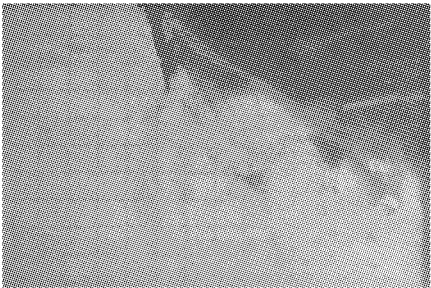


图 4 边坡破坏形式

Fig.4 Damage form of slope

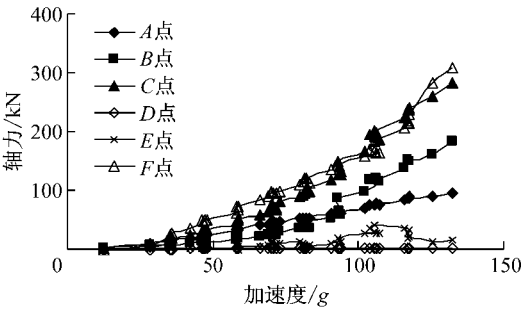


图 5 轴力-加速度曲线

Fig.5 Axial force-acceleration curve

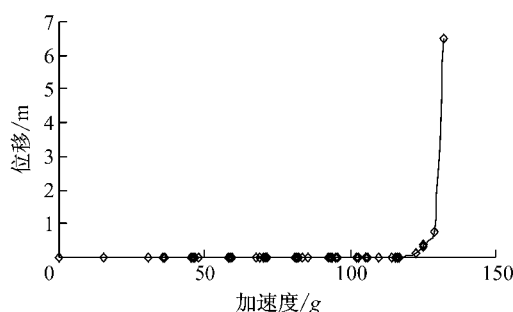


图6 位移-加速度曲线

Fig.6 Displacement-acceleration curve

为 6.51 m, 边坡破坏. 由此可得, 采用对边坡顶面位置的点位进行位移监测的方法对边坡失稳进行准确预警, 将存在一定难度.

对 C 和 F 两点的轴力-加速度变化曲线进行分析, 根据曲线形状, 采用幂函数进行拟合, 拟合结果如图 7 所示, 两者均具有较高的拟合度, 可以反映开挖支护后至边坡失稳前的锚杆轴力变化情况. 两者均符合幂指数的数学表达形式, 在机理上具有相通性, 可以用来拟合现场应力监测得出的曲线, 并预测其可能的应力增长规律. 文献[8]所示的预应力锚索与文献[20]所示的全长黏结锚杆在边坡失稳前的应力变化规律<sup>[8,20]</sup>, 也大致符合幂函数的增长形式, 表明离心模型试验的结果是合理的.

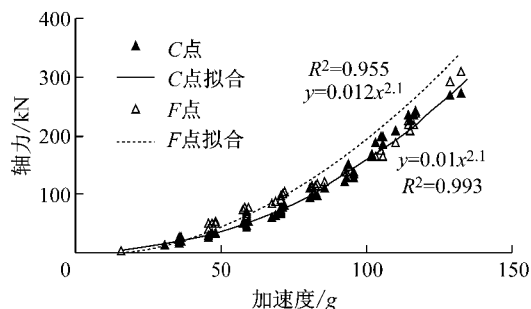


图7 轴力-加速度拟合曲线

Fig.7 Axial force-acceleration fit curves

根据图 7 所示的轴力-加速度拟合曲线和拟合式, 提出以离心加速度为  $105g \sim 115g$  作为加速度预警范围, 此时对应的 C 点的轴力预警范围为  $175 \sim 208$  kN, 为最大轴力的  $60\% \sim 73\%$ ; F 点的轴力预警范围为  $210 \sim 255$  kN, 为最大轴力的  $67\% \sim 82\%$ . 通过抗拔试验获得现场锚杆的极限抗拔力值为 184 kN, 由此可以根据预警百分比求解现场的应力监测的轴力预警范围: C 点的轴力预警范围为  $113 \sim 134$  kN; F 点的轴力预警范围为  $125 \sim 151$  kN.

以下通过现场试验方式对应力监测效果进行评价, 并将离心模型试验提出的预警范围进行应用.

## 4 现场监测结果分析

现场监测分为应力监测与深部位移监测, 根据离心模型试验所揭示的边坡潜在滑动面形式, 选择监测部位如图 3a 所示, 应力监测部位为三、二级边坡的 S1 与 S2 两处的锚杆, 监测点位表示为  $a \sim f$  点; 作为对比, 在二级平台位置处埋设长 18 m 的测斜管监测边坡内部的水平位移. 图 8 和 9 为现场试验应力监测结果, 二级边坡锚杆轴力最大值出现在 g 点(对应于离心模型试验的 F 点), 数值为 47.1 kN, 三级边坡锚杆轴力最大值出现在 c 点(对应于离心模型试验的 C 点), 数值为 13.6 kN, 出现较大数据变化的点位同离心模型试验基本相同, 均未达到离心模型试验得出的预警值. 通过监测结果近似可以推断该边坡可能产生的滑动面类型为 1—4—5—6—7 型, 与离心模型试验所揭示的滑动面形式相同.

初始监测时间段内锚杆轴力变化很小, 边坡开挖后的应力释放并没有造成太大的下滑力, 但在监测时间进行到 2010 年 5 月 11 日左右时, 锚杆轴力突然出现急剧的增加, 二级边坡 g 点的锚杆轴力在 20 天的时间内由 3 kN 剧增到 47.1 kN. 对应利用离心模型试验得出的预警范围  $125 \sim 151$  kN, 此时尚未达到预警值, 没有预警. 但针对该现象的出现相应地增加监测频率, 当监测持续到 2010 年 6 月 17 日时锚杆轴力开始下降, 并在数值上稳定于 28.5 kN 左右.

出现这种锚杆轴力剧增与下降的原因是由于该边坡附近的一处岩质边坡支护不利, 受强降雨等因素影响而失稳滑塌, 在破坏之前产生的下滑拉力对该边坡造成影响, 该影响通过应力监测得到了很好的把握.

边坡深部位移监测结果如图 10 所示, 位移在深度为 8 m 位置处变化明显, 该位置位于 1—4—5—6—7 型滑动面处, 同离心模型试验与应力监测结果相一致. 通过对比锚杆轴力变化图 8 和 9 与深部位移监测图 10, 可以得出锚杆轴力在 2010 年 5 月 11 日左右出现明显变化, 而位移则在 2010 年 6 月 10 日后才出现明显变化, 位移变化明显的时间要稍滞后于应力. 长期位移监测结果得出边坡变形趋于稳定, 稳定时的变形量约为 13.7 mm.

综合应力与位移监测的结果, 认为该边坡经历旁侧边坡失稳的影响后已基本趋于稳定.

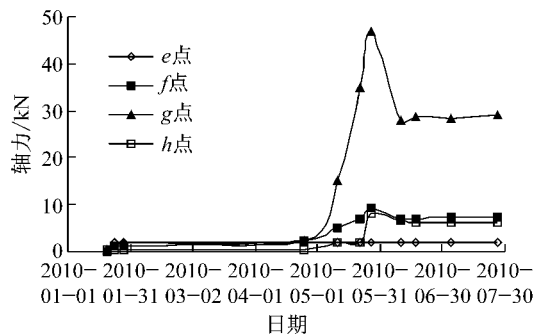


图 8 二级边坡锚杆轴力

Fig. 8 Rock bolt axial force of the second stage of slope

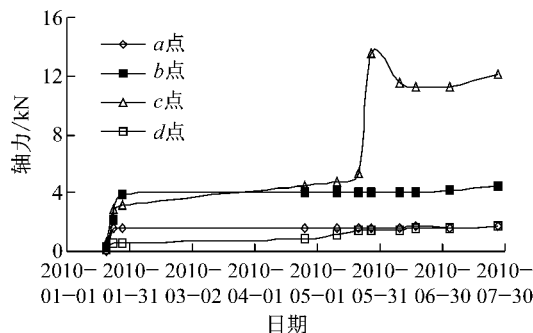


图 9 三级边坡锚杆轴力

Fig. 9 Rock bolt axial force of the third stage of slope

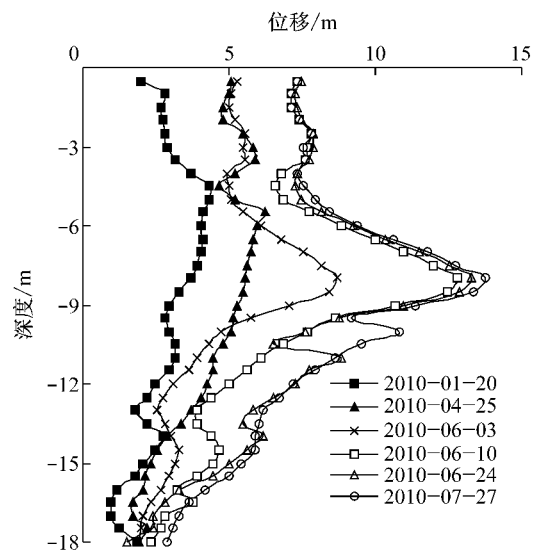


图 10 深部位移监测结果

Fig. 10 The monitoring result of depth displacement

## 5 结论

(1) 结合离心模型试验与现场试验监测的结果确定了岩质边坡的潜在滑动面。

(2) 应用离心模型试验揭示了边坡失稳之前的应力变化规律,利用幂函数对得出的监测曲线进行拟合,得出较好的拟合效果。

(3) 基于离心模型试验,提出了采用预警百分比的方法来定量地确定应力监测预警值的方法。

(4) 现场试验的监测结果表明在复杂的工程现场条件下,产生边坡失稳的因素众多,采用应力监测将能够及时预警各类因素诱发的滑坡。

## 参考文献:

- [1] STEWART D P, ADHIKARY D P, JEWELL R J. Studies on the Stability of Model Rock Slopes[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge 94. Singapore: A A Balkema, 1994: 629-634.
- [2] CHEN Z Y, ZHANG J H, WANG W X, et al. Centrifuge modeling for rock slopes [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. London: Laylor & Francis, 2006:19-28.
- [3] ZHANG J H, CHEN Z Y. Centrifuge modeling of rock slopes susceptible to block toppling[J] Rock Mechanical and Rock Engineering, 2007, 40(4):363.
- [4] 汪小刚,张建红,赵毓芝,等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5):14.  
WANG Xiaogang, ZHANG Jianhong, ZHAO Yuzhi, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5):14.
- [5] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩石边坡稳定分析——原理;方法;程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.  
CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Rock slope stability analysis—theory, method and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [6] 邓卫东,吴光勇,唐树名. 路堑边坡破坏机理的试验与计算分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 21.  
DENG Weidong, WU Guangyong, TANG Shuming. Test and calculation on the failure of cutting slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 21.
- [7] 冯振,殷跃平,李滨,等. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的土工离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 890.  
FENG Zhen, YIN Yueping, LI Bin et al. Centrifuge modeling of apparent dip slide from oblique thick bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 890.
- [8] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081.  
HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081.
- [9] 张鹏,何满潮,陶志刚,等. 滑坡灾害远程监控系统的改进及应用效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2026.  
ZHANG Peng, HE Manchao, TAO Zhigang, et al. Modification on sliding perturbation remote monitoring system and its application effect analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2026.

(下转第 1743 页)