

破碎岩质边坡排水隧洞效果监测分析

孙红月, 尚岳全, 申永江, 高 杰

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 通过实际工程, 研究降雨量、地下水位、排水隧洞流量的监测数据资料。对比实施地下排水工程措施前后滑坡体的地下水位监测结果, 表明破碎岩质边坡中采用地下排水隧洞, 可使坡体中的地下水位明显下降。分析坡体地下水位与降雨的相关性, 表明所研究滑坡的地下水位上升一般滞后于降雨过程, 但在有前期降雨积累时, 后期的强降雨可能即时提高边坡地下水位而诱发滑坡。排水隧洞流量与降雨过程关系分析结果表明, 各时段的排水隧洞流量变化与降雨过程基本同步, 并且当降雨量大于某个阈值时, 才会引起排水隧洞流量的变化。分析对比排水隧洞流量和坡体地下水位各自的变化过程, 可以发现, 降雨首先是引起排水隧洞的流量增加, 而坡体地下水位上升有一定的时间滞后, 即排水隧洞流量增加先于地下水位上升, 表明排水隧洞的排水作用能有效地降低一次降雨过程可能引起的地下水位上升的最大高度。研究结果表明, 在破碎岩质边坡中实施地下排水隧洞措施是合理有效的, 对类似边坡的防灾治理可提供借鉴。

关键词: 边坡工程; 破碎岩质边坡; 地下排水隧洞; 监测分析

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)11 - 2267 - 05

MONITORING AND ANALYSIS OF EFFECTS OF DRAINAGE TUNNEL ON CRUSHED-ROCK SLOPE

SUN Hongyue, SHANG Yuequan, SHEN Yongjiang, GAO Jie

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

Abstract: The measured data of the groundwater level, rainfall and the drainage tunnel discharge about the landslide are studied. Compared with the data of the groundwater level monitored by artificial and automatic measures before and after the implementation of underground drainage works, it is shown that the slope groundwater level has declined after excavating the underground drainage tunnel in crushed-rock slope. By analyzing the correlation of the groundwater level and rainfall, it is shown that the rising of the groundwater level is generally lagged behind the rainfall process; and if there has any accumulation rainfall previously, the groundwater level may be raised immediately with the latter strong rainfall, and the landslide will be induced. By analyzing the relationship between the drainage tunnel discharge and rainfall, it presents that the change of the drainage tunnel discharge is basically synchronous with the rainfall. And only when the rainfall is larger than a certain threshold value, the tunnel drainage discharge will increase correspondingly. By studying the changes process both of the drainage tunnel discharge and the groundwater level, it is shown that the increase of the drainage tunnel discharge is earlier than the rising of the groundwater level. Therefore, the maximum height of the groundwater level can be effectively reduced for the drainage role of the drainage tunnel during a rainfall process. The correlation of the groundwater level, rainfall and the drainage tunnel discharge is discussed based on the

收稿日期: 2008 - 04 - 27; **修回日期:** 2008 - 07 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672185, 40502026); 浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13027)

作者简介: 孙红月(1970 -), 女, 博士, 1993年毕业于成都理工学院水文地质与工程地质系水文地质与工程地质专业, 现任副教授, 主要从事岩土体稳定性分析方面的教学与研究工作。E-mail: shy@zju.edu.cn

monitored data; and it is shown that the underground drainage tunnel measures in crushed-rock slope are reasonable and effective. If any similar crushed-rock slope needs to be controlled, the underground drainage tunnel would be a good choice.

Key words: slope engineering; crushed-rock slope; underground drainage tunnel; monitoring and analysis

1 引言

排水隧洞适用于截排或引排埋藏较深含水层的地下水。修筑排水隧洞，一方面可截断地下水流，疏干滑坡体，增加坡体稳定性；另一方面可避免因明挖沟太深而引起的施工困难。目前在疏松松散堆积土滑坡地下水方面，采用排水隧洞措施较多^[1~10]，而在其他破碎岩质滑坡中，采用排水隧洞措施相对较少。地下水作用对边坡稳定性有较大的影响，因此在进行稳定性分析时，一般会研究地下水位变化情况，因此对其所做的监测工作也较多^[11~15]。杭金衢高速公路 K103 滑坡为一破碎岩质滑坡，在对其进行治理过程中，采用了排水隧洞工程措施，由于是一项探索性工作，需要通过监测了解其作用效果。

2 K103 滑坡特征与工程治理措施

K103 滑坡位于公路右侧(见图 1)，前后缘高差 130 m，水平距离约 400 m，滑体总方量为 160×10⁴ m³。滑坡方向大致为正东向，与公路延伸方向近于正交。滑坡所在区域的原始地形自然坡角一般为 20°~35°。高速公路路堑边坡最大开挖高度 45 m，开挖边坡坡度一般小于 45°。滑坡区岩体破碎，在高速公路建设期间、路堑开挖过程中，曾多次发生坡面裂缝和坍塌。

滑坡区地层岩性主要为灰色、紫红色凝灰岩、灰绿色沉凝灰岩和紫红色砾岩。岩体破碎，风化强烈。从地质钻探资料分析，滑面主要沿构造破碎带发展，滑面分布次生夹泥，强度低。滑床主要为砾岩，完整性较好，灰紫色，砾状结构，钙泥质胶结。

2004 年底至 2005 年初的阴雨连绵，使得杭金衢高速公路沿线降雨量大大超出一般年份的同期降雨量。2005 年 2 月中旬以后，路堑边坡和坡脚挡墙出现加速变形，边坡有整体变形滑动迹象。在坡体后缘及两侧出现大量的裂缝，最大裂缝宽度近 1.0 m，上下错动高差达 0.5~0.8 m。边坡和路基变形破坏现象非常明显，存在着整体失稳危险，对高速公路安全运行构成了威胁。

滑坡的稳定性与降雨关系密切，如果排水措施能够达到理想效果，则可能使滑坡的稳定性大幅提高。为了使滑坡在正常情况下处于稳定状态，针对滑坡方量大、稳定性差的情况，采取了以抗滑桩为主的滑坡治理方案。受布桩条件的限制，仅在滑坡体中部设置了抗滑桩(见图 1，2)，使滑坡基本保持稳定，但安全系数达不到规范要求。稳定性计算结果表明，当坡体中后缘地下水位能比勘察期间的地下水位降低 4 m 或以上时，就能达到工程边坡的安全要求。为此设置了两个地下排水隧洞，其位置见图 1 和 2。排水隧洞位于滑动面以下的完整基岩内，设 3% 排水纵坡，断面结构见图 3，从地表打设直径为 15 cm、垂直的纵向排水孔与洞顶贯通，拦截并排除滑动体内的地下水。为确定其排水效果，开展了系统监测工作。

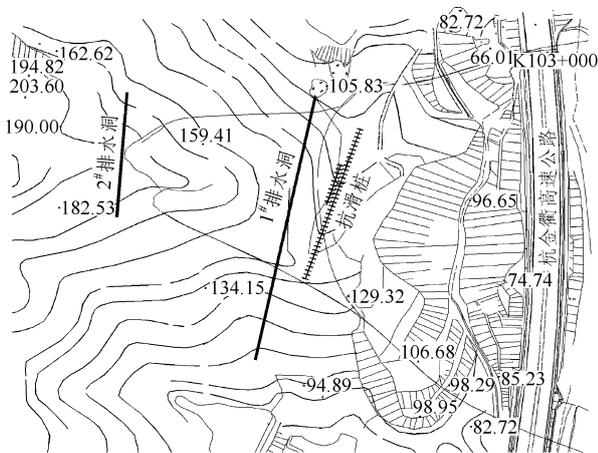


图 1 滑坡平面图(单位: m)

Fig.1 Plan scheme of the landslide(unit: m)

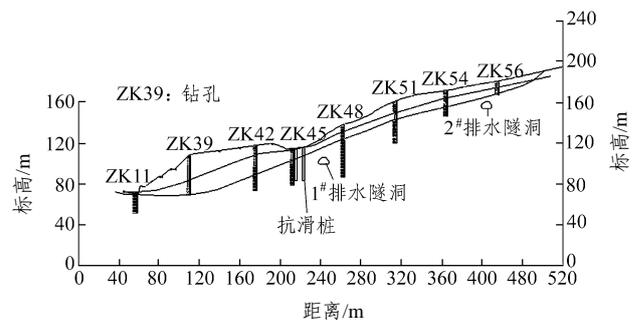


图 2 滑坡剖面图

Fig.2 Section of the landslide

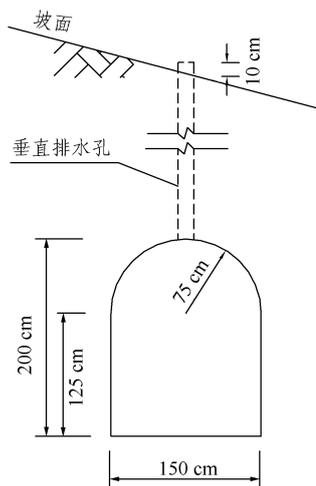


图 3 排水隧洞横断面

Fig.3 Cross-section of the drainage tunnel

3 地下水位监测分析

2005 年春季, 在滑坡地质勘察期间, 对部分钻孔进行了地下水位监测, 结果表明, 在实施排水工程之前, 处于 1#和 2#排水隧洞之间的各钻孔 ZK48, ZK51, ZK52, ZK54 和 ZK55(见图 4)的地下水位埋深为 6.60~12.00 m, 处于 1#排水隧洞附近的 ZK45, ZK46 和 ZK49 的地下水位埋深为 2.00~14.02 m, 滑坡的中前部 ZK39~ZK44, ZK50 和 ZK53 的地下水位埋深为 8.90~26.31 m。

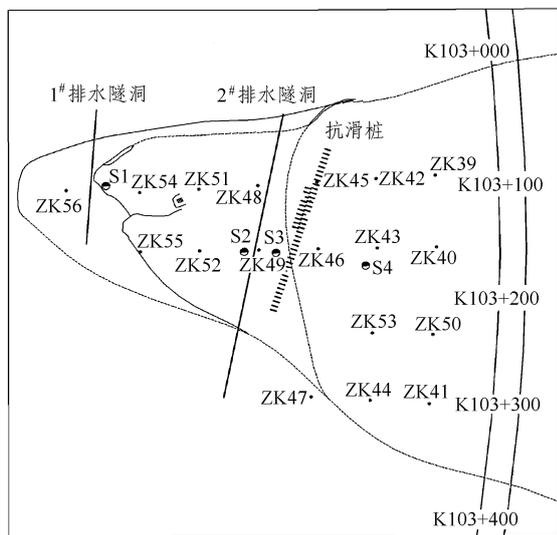


图 4 滑坡区地下水监测孔的平面位置图

Fig.4 Plane scheme of the groundwater monitoring holes at landslide area

2005 年 4~5 月开始实施地下排水工程, 2005 年 10 月排水隧洞工程完成, 2005 年 11 月人工监测数据显示, 各监测孔的地下水位均有明显的降低。

ZK56 位于滑坡体后缘的 2#排水隧洞以上, 地下水位埋深增大大约 6 m; 位于 2 个排水隧洞之间的 ZK51, ZK52, ZK54 和 ZK55 地下水位埋深增大 5~8 m(见图 5); ZK41 位于滑坡体的前缘, 地下水位埋深至少增大了 3 m。

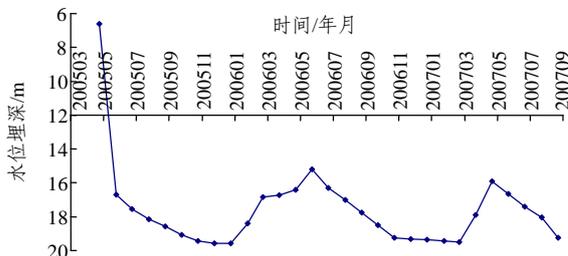


图 5 排水隧洞开挖前后钻孔 ZK52 地下水位埋深变化
Fig.5 Groundwater level fluctuation of borehole ZK52 before and after drain tunnel excavation

为了有效评价排水隧洞的效果及分析滑坡地下水位与降雨的关系, 在原有地下水人工监测孔的基础上, 于 2006 年 5 月增加了 4 个地下水位自动监测孔, 编号为 S1~S4(见图 4), 进行地下水位的连续监测。S1 监测孔位于滑坡体的后缘, 监测期间地下水位埋深在 18.70~19.00m 之间波动; S2 监测孔位于滑坡体的中后缘、1#排水隧洞的上部, 监测期间地下水位埋深在 21.50~24.50 m 之间(见图 6); S3 监测孔位于滑坡体的中部、1#排水隧洞的下部, 监测期间地下水位埋深在 17.22~18.85 m 之间; S4 监测孔位于滑坡体的中前缘, 监测期间地下水位埋深随降雨呈大幅变化, 为 21.50~34.0 m, 最大变化幅度达 12.50 m, 其原因可能是钻孔的破碎带导水与地表径流发生了水力联系, 使得雨后水位骤然升高, 雨止后则快速回落。

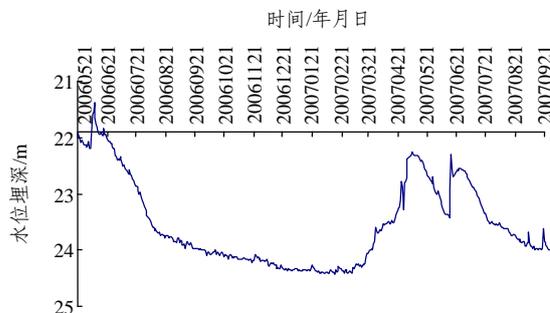


图 6 S2 监测孔的地下水位埋深变化

Fig.6 Groundwater level fluctuation of monitoring hole S2

从 2006 年 5 月至今的长期自动地下水位监测结果显示: 代表 1#和 2#排水隧洞之间的 S1 监测孔的

地下水位埋深大于 18.50 m, S2 监测孔的地下水位埋深大于 21.00 m(见图 6), 与实施排水工程之前 6.60~12.00 m 相比, 降幅达 6.50 m 以上; 代表 1# 排水隧洞和抗滑桩附近的 S3 监测孔的地下水位埋深大于 17.60 m, 与处于相对区域的 ZK45, ZK46 和 ZK49 的地下水位埋深 2.00~14.02 m 相比, 降幅达 3.60 m 以上。监测结果充分显示, 在实施地下排水工程措施后, 滑坡体的地下水位埋深大幅增加。

4 边坡地下水位与降雨相关性分析

为了分析边坡地下水位变化与降雨过程的关系, 选择 2007 年 10 月上旬(1 时段)和 9 月上旬(2 时段)的 2 个时段降雨过程进行相关性分析。利用实时的降雨过程监测数据和遥测地下水位监测数据进行对应分析。

在 2007 年 10 月 6~12 日降雨过程前 20 d 中, 除 10 月 2 日有 15 mm 降雨外, 其余时间均为晴天。从 S2 监测孔监测到的地下水位变化关系中可以看出, 钻孔地下水位滞后于降雨过程约 18 h(见图 7)。监测结果表明, K103 滑坡的地下水位上升一般滞后于降雨过程。

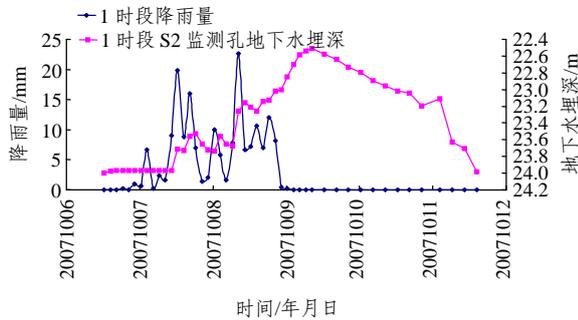


图 7 2007 年 10 月 6~12 日降雨过程与 S2 监测孔地下水位变化关系

Fig.7 Relationship of Groundwater level in monitoring hole S2 and rainfall from October 6 to 12, 2007

在 2007 年 9 月 2~6 日降雨过程前的 9 月 1 日有 26 mm 降雨。从 S2 监测孔监测到的地下水位变化关系中可以看出(见图 8), 该时段 S2 监测孔地下水位与降雨过程基本同步变化, 说明有前期降雨积累时, 后期的强降雨可能即时提高边坡地下水位。

5 排水隧洞水流量与降雨关系分析

为了分析排水隧洞水流量与降雨过程的关系, 选择 2007 年 9 月上旬(2 时段)发生典型降雨过程的

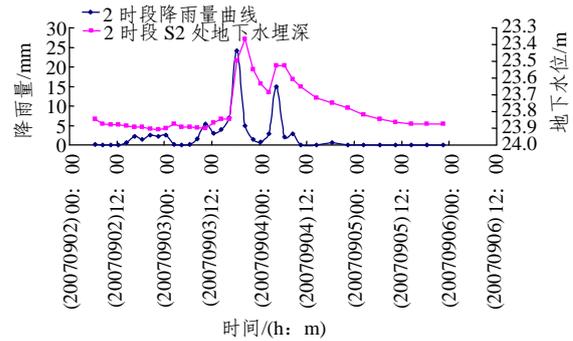


图 8 2007 年 9 月 2~6 日降雨过程与 S2 监测孔地下水位变化关系

Fig.8 Relationship of Groundwater level in monitoring hole S2 and rainfall from September 2 to 6, 2007

时间段, 利用实时的降雨过程监测数据和 1#排水隧洞北洞口水流量自动监测数据进行对比分析。

从图 9 可以看出, 各时段的排水隧洞水流量变化与降雨过程基本同步变化, 说明排水隧洞发挥了有效的降排水作用。分析降雨量与排水隧洞水流量关系, 还可以看到, 降雨量大于某个阈值时, 才会引起排水隧洞水流量的变化, 这个阈值为 10~24 mm/d。分析 K103 滑坡排水隧洞水流量变化过程与坡体地下水位变化过程, 还可以看到降雨后首先是排水隧洞的流量增加, 然后再导致坡体地下水位上升, 即排水隧洞流量先于地下水位上升。因此, 排水隧洞的排水作用有效地降低了一次降雨过程可能引起的地下水位上升的最大高度。

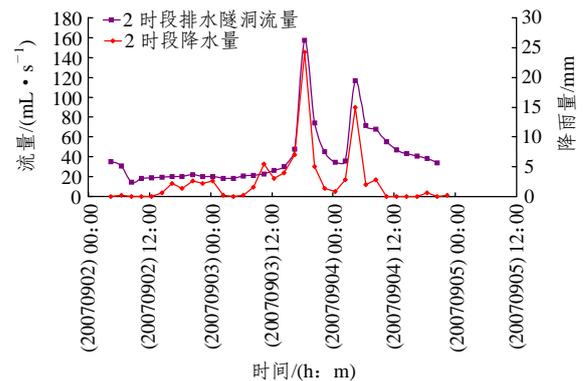


图 9 2007 年 9 月 2~5 日降雨过程与 1#排水隧洞北洞口水流量变化关系

Fig.9 Variation relationship of north adit of drainage tunnel No.1 in discharge and rainfall from September 2 to 5, 2007

6 结 论

(1) 监测结果表明, 实施地下排水隧洞工程措

施后, 坡体中的地下水位均有明显的降低, 达到了预期的效果。

(2) 降雨引起的地下水位上升过程与前期是否有降雨相关。当前期无明显降雨时, 地下水位上升一般滞后于降雨过程, 反之则会随强降雨过程快速上升。

(3) 排水隧洞水流量变化与降雨过程基本同步变化, 当降雨量大于某个阈值时, 才会引起排水隧洞水流量的变化。

(4) 降雨后排水隧洞流量先于地下水位上升, 排水隧洞的排水作用有效地降低了一次降雨过程可能引起的地下水位上升的最大高度。

参考文献(References):

- [1] 姚尧, 盛建龙, 夏卜敬. 地下水位对土质边坡的影响研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(3): 120 - 121.(YAO Yao, SHENG Jianlong, XIA Bujing. Research on effect of ground water level on soil property slope[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(3): 120 - 121.(in Chinese))
- [2] 章普标, 唐晓武. 超长距离水平排水滤管在高速公路边坡滑坡处治中的应用[J]. 公路, 2006, (1): 80 - 85.(ZHANG Pubiao, TANG Xiaowu. Application of ultra-long-range drainage pipe on expressway landslide treatment[J]. Highway, 2006, (1): 80 - 85.(in Chinese))
- [3] 霍三胜. 公路滑坡治理技术总结[J]. 山西交通科技, 2007, (1): 11 - 13.(HUO Sansheng. Study on highway slide treatment technology[J]. Shanxi Science and Technology of Communications, 2007, (1): 11 - 13.(in Chinese))
- [4] 王浩, 廖小平, 程建军, 等. 三福高速公路 K201 滑坡病害的应急工程效果与根治工程对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 22 - 26.(WANG Hao, LIAO Xiaoping, CHENG Jianjun, et al. Emergency measures and permanent control works for K201 landslide hazard along Sanming—Fuzhou expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 22 - 26.(in Chinese))
- [5] 张玉芳. 京珠高速公路 108 滑坡及防治工程分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 633 - 637.(ZHANG Yufang. Analyses of landslide No.108 in Beijing—Zhuhai highway and its treatment measures[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(6): 633 - 637.(in Chinese))
- [6] 祝辉, 唐红梅, 李明, 等. 重庆—贵州高速公路向家坡滑坡稳定性分析及防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2 687 - 2 693.(ZHU Hui, TANG Hongmei, LI Ming, et al. Stability analysis and preventive treatment measures to Xiangjiapo landslide along Chongqing—Guizhou expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 687 - 2 693.(in Chinese))
- [7] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 818 - 3 827.(WANG Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 818 - 3 827.(in Chinese))
- [8] 孙红月, 尚岳全. 浙江上三公路 6# 滑坡的地下水作用与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 505 - 510.(SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Groundwater effect on landslide and its control along Shangyu—Sanmen highway in Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 505 - 510.(in Chinese))
- [9] 李光慧. 楚大高速公路 K348 古滑坡治理设计与施工[J]. 路基工程, 2006, (6): 152 - 154.(LI Guanghui. Treatment design of ancient landslide K348 of Chuxiong—Dali expressway and its construction[J]. Subgrade Engineering, 2006, (6): 152 - 154.(in Chinese))
- [10] 曾裕平, 许强, 胡莹, 等. 东部某土质古滑坡形成机制及防治措施[J]. 铁道建筑, 2006, (5): 52 - 54.(ZENG Yuping, XU Qiang, HU Ying, et al. One ancient soil landslide in East China formation mechanism and prevention measures[J]. Railway Engineering, 2006, (5): 52 - 54.(in Chinese))
- [11] 任大春, 刘义城, 朱国胜, 等. 三峡船闸高边坡裂隙岩体渗流监测成果分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 180 - 183.(REN Dachun, LIU Yicheng, ZHU Guosheng, et al. Analysis of seepage of high excavated slopes of cracked rock in the ship locks of Three Gorges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 180 - 183.(in Chinese))
- [12] GUGLIELMI Y, CAPPALÀ F, RUTQVIST J, et al. Mesoscale characterization of coupled hydromechanical behavior of a fractured-porous slope in response to free water-surface movement Source[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(6): 862 - 878.
- [13] KURAS P K, WEILER M, ALILA Y. The spatiotemporal variability of runoff generation and groundwater dynamics in a snow-dominated catchment[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 50 - 66.
- [14] ELFRIEDE O, STEFAN L. Monitoring of slope deformation and groundwater during construction of the Ladenburg lock[C]// Geotechnical Special Publication, FMGM 2007—Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. [S. l.]: [s. n.], 2007: 55.
- [15] 刘润, 闫钊, 闫澍旺, 等. 强风化岩质边坡滑坡治理及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2 790 - 2 794.(LIU Run, YAN Yue, YAN Shuwang, et al. Improvement and finite element analysis of an intense weathering rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 790 - 2 794.(in Chinese))