

# 库水位升降作用下库岸滑坡稳定性研究

宋丹青<sup>1,2</sup>, 宋宏权<sup>3</sup>

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;  
3. 河南大学 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 为研究库水位升降对库岸滑坡稳定性的影响,以九甸峡库区某滑坡为例,采用 GPS 对其外部进行变形监测,结合详细的现场调查及水库运营资料,同时针对库水位升降条件下利用 Geo-slope 分析库岸滑坡的稳定性变化规律.结果表明:库水位 100~130 m 阶段,库水位快速持续上升及下降将会引起滑体发生滑动;滑体稳定性随库水位下降速度增加而减小,库水位下降速度超过 0.3 m/d 时,滑体将会发生失稳;库水位上升速率大于 0.4 m/d 时,将会诱发滑体失稳;库水位连续快速升降也对库岸滑坡稳定性不利,库水位快速升降与滑体滑动存在滞后期.

**关 键 词:** 库水位升降;库岸滑坡稳定性;GPS 监测;Geo-slope

中图分类号: P 642.22 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)05-0735-05

## Stability Studies of Reservoir Landslide Under Reservoir Water Level Fluctuation

SONG Dan-qing<sup>1,2</sup>, SONG Hong-quan<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China. Corresponding author: SONG Hong-quan, E-mail: hqsong@henu.edu.cn)

**Abstract:** For studying the influence of reservoir water fluctuation on reservoir landslide stability, taking a landslide in Jiudianxia reservoir area as an example, the external deformation of landslide is monitored by GPS, and the change law of landslide stability is analyzed in combination with detailed field investigation and reservoir operation data, which is also numerically analyzed by Geo-slope as well. The results show that the landslide has three fast movements in phase of 100~130 m, and continuous rapid water rise and fall will trigger landslide movement. The landslide stability decreases with the increase of water fall speed, and the landslide will occur if water fall speed is more than 0.3 m/d. The landslide also will occur when water rise speed is more than 0.5 m/d. The landslide movement presents a typical time-dependent characteristics, and a lag time can be identified between rapid water fluctuation and landslide movement.

**Key words:** reservoir water fluctuation; reservoir landslide stability; GPS monitoring; Geo-slope

随着我国水利水电事业的快速发展,为确保水电工程建设的顺利进行,研究库水位变化与库岸滑坡稳定性的关系已成为一项重要课题<sup>[1]</sup>. 针对库岸滑坡的研究,国内外学者已经通过多种方法获得了较多的优秀研究成果. Manzoor 等<sup>[2]</sup>通过详细现场调查和反演分析研究了蓄水作用下滑

坡复活的成因机制;Guo 等<sup>[3]</sup>采用实证模型研究了库水位升降作用下的滑坡稳定性变化规律;Komac 等<sup>[4]</sup>和 Benoit 等<sup>[5]</sup>采用现场监测方法研究了库水位升降条件下库岸滑坡的水力触发因素;Yin 等<sup>[6]</sup>以三峡库区玉皇阁滑坡为例,采用实时监测系统研究了 145~175 m 蓄水过程中,库岸

滑坡稳定性的变化规律;Jian 等<sup>[7]</sup>以三峡库区千将坪滑坡为例,采用 FLAC 3D 软件对滑坡的失稳机制及影响因素进行了分析,认为库水升降是库岸滑坡的主要诱因. 目前,由于 GPS 与其他监测系统相比具有实时、准确等优点<sup>[8]</sup>,许多国家和地区已经采用 GPS 进行滑坡稳定性的研究<sup>[9]</sup>.

针对库水位升降诱发库岸滑坡已经取得显著成果,但之前的研究方法较为单一,并且采用的监测系统精度不高,缺乏现场调查数据的支撑,监测系统的可靠性有待提高. 因此,亟需将现场调查及监测数据与数值模拟相结合,研究库水位变化对滑坡稳定性的影响. 本文以九甸峡库区某滑坡为例,采用 GPS 对滑坡外部变形进行长期监测,结合详细的现场调查和水库运营资料研究了库水位 100 ~ 130 m 范围升降与库岸滑坡稳定性的关系.

# 1 研究区概况

滑坡位于甘肃省洮河中游的九甸峡库区,库区属典型的山地和河谷型地貌. 在构造单元上位于西秦岭海西褶皱带北缘,断层主要包括近东西向逆断层和近南北向平移断层. 研究区内下游干旱温和,中、上游寒冷潮湿,年均气温约 7℃,年均降水量 588.2 mm,多集中在 7 ~ 9 月份. 滑坡平面宽约 400 m,形态呈长舌形,以水库底部为基准,分布高程 60 ~ 340 m,滑体基座面上覆盖有厚约 30 ~ 73 m 的松散堆积层,坡度为 30° ~ 40°,总体积为  $8.94 \times 10^6 \text{ m}^3$ . 滑坡前缘富含地下水,接受大气降水和基岩裂隙水补给,向河流排泄. 滑体中部和后缘局部形成上层滞水,受降雨及地下径流补给,丰水季节以泉水的形式溢出地表. 滑坡主要分为 3 层(图 1),上层以大块石为主,中层块石和土体混杂,下层以黄土类土为主. 地下水含水层厚度 10 ~ 35 m,埋深 1 ~ 15 m.

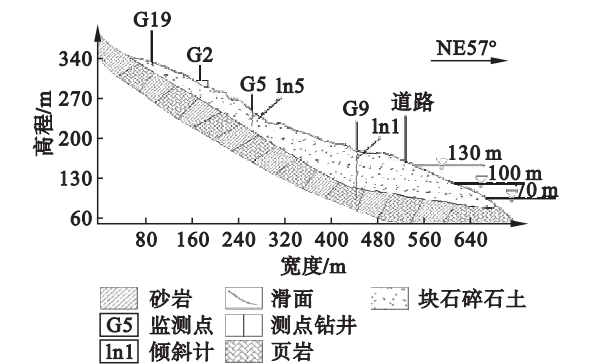


图 1 滑坡剖面图  
Fig. 1 Landslide profile

# 2 滑坡监测分析

采用北极星 9600 型 GPS 对库水位 100 ~ 130 m 进行长期监测,监测系统的水平及垂直方向误差分别为  $5 \text{ mm} \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$  和  $10.0 \text{ mm} \pm 2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$ . 采用二等 GPS 网确定滑体监测点的位置,图 2 为监测网布设方案及监测点示意图, GPS 数据每月采集 3 ~ 5 次. 根据监测资料及勘查资料显示:滑体中部及前缘为主滑动区域 (MDZ),中部为快速滑动区域 (FMZ), MDZ 包括监测点 G1 ~ 3, G5 ~ 6, G9, G13 ~ G16; FMZ 包括监测点 G1 ~ 3, G5 ~ 6, G9. 选取库水位 100 ~ 130 m 阶段 (2009. 1. 1 ~ 12. 31), 以 FMZ 内具有代表性的 6 个监测点的位移为例进行分析,可更为直观地反映库水位变化与滑坡变形的关系.

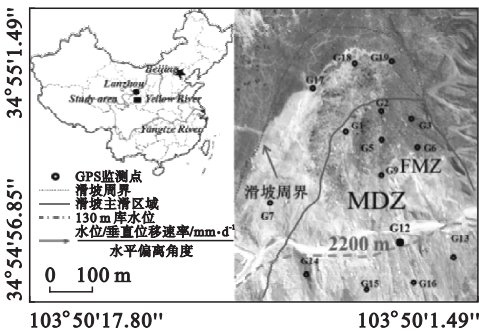


图 2 监测点布置图  
Fig. 2 Spatial distribution of the monitoring sites

1) 滑体滑动具有典型的时间特征. 由图 3 可知,库水位 100 ~ 130 m 阶段,滑体 FMZ 内监测点的位移大部分时间处于慢速增加状态,短时内发生大幅度的增加,其中 FM 阶段约占监测期的 1/4. 图 3 表明,存在 3 次快速滑动阶段 FM1 (2009. 6. 1 ~ 6. 30), FM2 (2009. 10. 15 ~ 11. 15), FM3 (2009. 11. 17 ~ 12. 21). 如 FM1 阶段 G6 的水平位移增量约为 500 mm, FM2 阶段约为 150 mm, FM3 阶段约为 300 mm,其他时间段内基本不变.

库水位快速升降与滑体快速滑动存在延迟时间 (lag time 1, 2), 其中 lag time 1 表示库水位快速升降与触发滑坡滑动存在的延迟时间, lag time 2 表示库水位快速升降结束后,滑体仍未停止滑动,存在滑动滞后时间. lag time 1, 2 是由于库水位快速升降过程中,滑体内地下水位未随库水位的升降而立即变化,而是表现为滞后性,且滞后期的长短与滑体的渗透系数有关,滑体渗透系数越小,地下水位随库水位波动的延迟时间越长.

2) 库水位快速上升将诱发滑体失稳. 图 4 表

明,监测期内存在 3 次库水位快速上升阶段,第 1 次未引起滑体发生快速滑动,第 2,3 次诱发滑体出现 FM1 和 FM2,这是由于第 1 次库水上升平

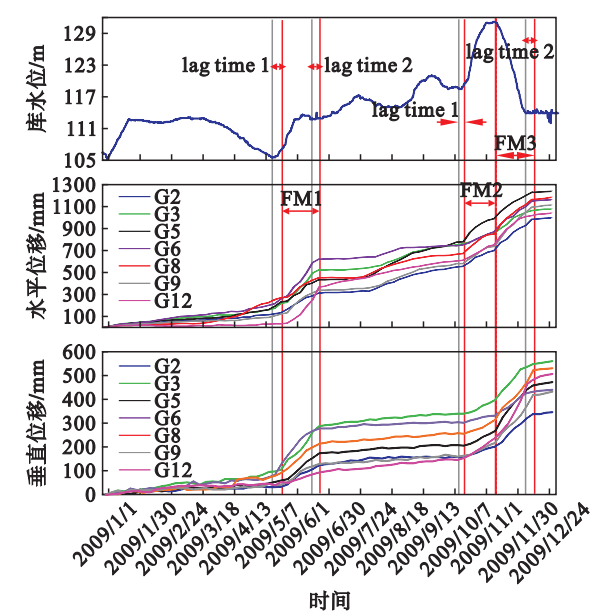


图 3 监测点累积位移及其速率  
Fig. 3 Cumulative displacement and velocities of monitoring stations

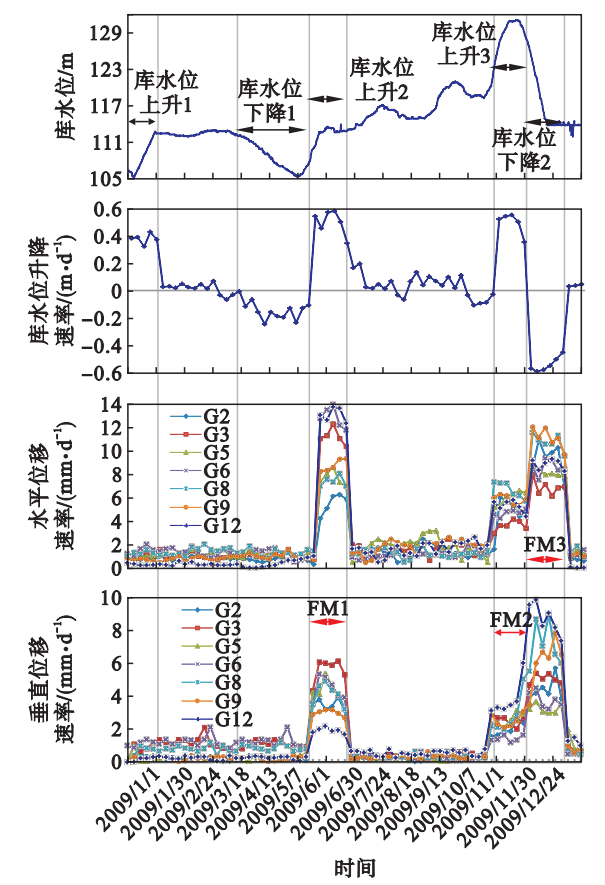


图 4 库水位、库水速率及滑坡位移变化图  
Fig. 4 Diagram of the water level fluctuation, water fluctuation rate, and landslide displacement

均速率小于 0.4 m/d,而其余 2 次平均速率大于 0.4 m/d.由此可知,库水位在 100 ~ 130 m 阶段,库水上升速率大于 0.5 m/d 时将容易诱发滑体失稳.该阶段内库水以较小速率上升时,滑体的位移变化基本不变,有利于滑体的稳定.

3) 库水位快速下降将诱发滑体失稳.由图 4 可知,监测期内有 2 次库水快速下降阶段,第 1 次库水位由 113 m 下降至 106 m,监测点的水平及垂直位移变化很小,未引起滑体出现大变形;第 2 次库水位由 130 m 下降至 114 m,滑体的位移出现大幅度的增加,诱发滑体出现 FM3.这是因为第 1 次库水位持续下降的平均速率较小,约为 0.25 m/d,而第 2 次库水位快速下降的平均速率较大,约为 0.5 m/d,并且第二次库水位下降超过 10 m,下降幅度较大.由此可知,大幅度库水位持续快速下降将引起滑体失稳.

### 3 现场调查

为研究库水位 100 ~ 130 m 阶段库水位快速升降对滑坡稳定性的影响,对滑坡进行现场调查.

根据现场调查资料可知,库水位 100 ~ 130 m 阶段库水位快速下降将会引起滑体产生局部失稳,其失稳过程如图 5 所示.图 5a 为库水位快速下降开始阶段,滑体中部开始出现拉张裂缝,但是裂缝的出现与库水位开始下降具有约 5d 的滞后期;图 5b 为库水位快速下降持续一段时间后,滑体中部及前缘出现进一步的前移及下陷变形滑动;图 5c 为库水位快速下降持续一段时间后,滑体中部及前缘发生整体性的滑动破坏.此外,根据调查资料可知,库水位快速持续上升也将诱发滑体出现滑动变形,这与采用 GPS 监测数据分析得到的结果吻合.

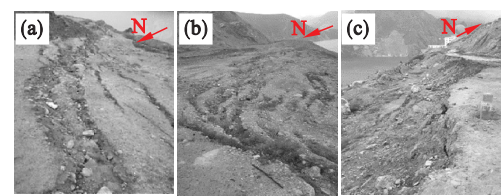


图 5 滑坡野外调查  
Fig. 5 Field investigation of the landslide  
(a)—开始阶段;(b)—部分变形滑动;(c)—整体破坏.

对库水位 100 ~ 130 m 内滑体的变形辅以现场调查,监测期内滑体基本处于稳定状态,未发生大幅度的变形.根据勘查资料可知,滑体每次滑动持续时间较短,这与采用 GPS 监测数据分析得到的结果符合.



4 滑坡稳定性计算

4.1 模型建立

边坡稳定性计算中采用极限平衡法中的摩根斯坦-普莱斯法,首先在 Geo-slope 软件中采用 Seep 中的暂态渗流问题进行分析,得到库水位条件下的渗流场水头分布,再将水头值输入到 Slope 中,在该模式下采用条分法计算滑动体的安全系数.为了将 Seep 中的水头值导入 Slope 中,首先将 Seep 中的有限元网格引入 Slope,在此网格下建立稳定性分析模型.采用 Seep 输入到 Slope 中的节点水头值,在 Slope 中找到土条底面中点所在单元的相对指标及插值函数矩阵,采用式(1)计算出传递给 Slope 的 Seep 的水头值( $h$ ),这样就可将极限平衡分析与动态渗流场进行耦合<sup>[10]</sup>.

$$h = N \cdot H. \tag{1}$$

式中: $N$ 为插值函数向量; $H$ 为水头向量.

采取如图 6 所示的计算剖面 and 渗流计算模型,库水位 100 ~ 130 m 阶段,设计 3 种工况分析库水位升降对库岸滑坡稳定性的影响,计算参数根据甘肃省水电院给出的参考值,黏聚力为 0.015 MPa,内摩擦角为 22.29°,工况 1,2 的渗透系数  $k = 5 \times 10^{-5}$  cm/s. 工况 1:库水位 100 ~ 130 m 阶段库水位快速上升( $v_1 = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  和  $0.6$  m/d);工况 2:库水位快速下降( $v_2 = -0.2, -0.3, -0.4, -0.5$  和  $-0.6$  m/d);工况 3:设定渗透系数  $k$  分别取  $5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-6}$  及  $5 \times 10^{-7}$  cm/s,库水位上升速率取 0.5 m/d.

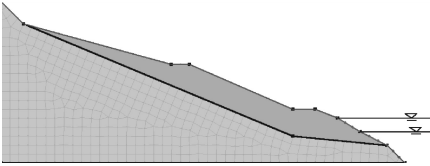


图 6 渗流计算模型示意图  
Fig. 6 Calculating model of seepage

4.2 计算结果分析

不同工况的计算结果如图 7 所示,由图 7a 可知,库水位上升速率小于 0.4 m/d 时,随着库水位的上升滑体的安全系数始终大于 1.0,滑体处于稳定状态;库水位上升速率为 0.5 m/d 时,随着库水位上升,滑体安全系数将会小于 1.0,滑体开始出现变形破坏,库水位上升速率越大,滑体失稳所需时间越短.由图 7b 可知,库水位由 130 m 下降至 100 m 过程中,随着库水位下降,滑体的安全系数逐渐减小,库水位下降速率小于 0.3 m/d 时,滑体的安全系数始终大于 1.0,但是,库水位下降速

率大于 0.3 m/d 时,滑体的安全系数将会小于 1.0,滑体将发生失稳,也即库水位下降速率越大,滑体的安全系数越小,滑体失稳时间越短.图 7c 表明,库水位上升速率相同时,不同渗透等级的滑体安全系数变化规律相似,随库水位上升安全系数为先减小后趋于稳定,且相同条件下渗透系数越大滑体的安全系数越小.这是由于滑体内地下水位随着库水位上升而不断抬升,滑体内将会出现孔隙水压力,渗透系数较大时地下水位抬升速度相对较快,滑体内产生的孔隙水压力也相对较大,将会削弱滑体的稳定性.

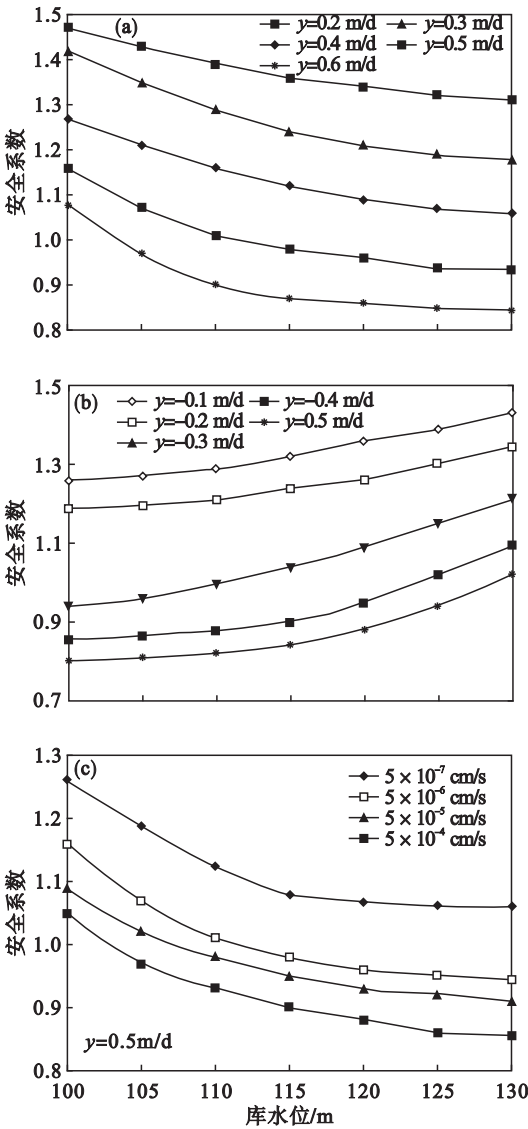


图 7 安全系数变化  
Fig. 7 Change of safety factors

(a) — 库水位上升时; (b) — 库水位下降时;  
(c) — 不同渗透系数时.

5 滑动机制

库水位变化使库岸边坡内部渗流场发生较大

变化,造成岸坡的稳定性发生变化<sup>[11-15]</sup>。库水位快速升降对岸坡稳定性影响可概括为2方面。

1) 库水使滑体内岩土体的物理力学性质发生不利性变化。滑体内岩土体的含水量随库水位升降而随之变化,使岩土体的结构发生变化,造成由岩土体内的土粒、水分子及离子等组成的平衡体系遭受不利性变化,导致滑体内岩土体的强度降低、压缩性增大。库水位快速上升增大了滑体的浸水面积,降低了滑面上的有效应力和滑带强度,导致滑体内颗粒间的黏结力和摩阻系数减小,削弱了滑体稳定性;库水位连续性快速升降将会使滑体内渗流场发生不利性变化,造成地下水渗流对滑体产生溶滤作用,使岩土体的物理力学性质发生不利性改变。

2) 库水位使岸坡内岩土体产生不利的力学效应。库水位快速上升过程中,滑体内地下水位不断升高使滑体的潜在滑动面饱和,削弱滑体内部抗剪强度;滑动面以上部分虚压力体大于实压力体,滑坡下部被淹没产生浮力,浸水土体的有效质量因孔隙水压力发生改变,降低了滑体稳定性。库水位快速下降过程中,滑体内地下水下降滞后于库水位下降,导致岸坡内在库水位下降后的浸润面仍然保持较高,使滑体内具有超孔隙水压力;库水位下降使滑坡的动水压力增大,增加滑体下滑力和产生向下的拖拽作用,也会使滑体出现卸荷作用、裂隙中出现水锤效应,削弱滑体稳定性。

## 6 结 论

1) 库水位 100 ~ 130 m 阶段,存在 3 次快速滑动(FM),库水位快速持续上升及下降将会引起滑体发生滑动。FM1 及 FM2 的诱发因素为库水位快速持续上升;FM3 的主要诱发因素为库水位快速出现下降,次要诱发因素为之前出现的库水位快速上升。滑坡运动具有典型的时间特征。滑体大部分时间处于稳定状态,小部分时间处于快速滑动状态。库水位快速升降与滑体滑动存在滞后期,这是由于滑体内地下水升降与库水位升降存在滞后时差造成的。

2) 渗透系数对滑体稳定性也具有影响,库水位上升过程中,库岸滑坡的渗透系数越大,滑体的安全系数越小,其稳定性较差;库岸滑坡的渗透系数较小时,滑体的安全系数较大,其稳定性较好。

3) 库水位升降速率与滑坡稳定性具有相关关系,库水位上升速率较小时,有利于滑体的稳

定,库水位升降速率越大,滑体失稳所需时间越短。九甸峡库区库水位上升速率大于 0.4 m/d,将诱发滑体失稳;滑体稳定性随库水位下降速率增加而减小,库水位下降速率大于 0.3m/d 时,滑体将会发生失稳。

致谢:感谢九甸峡水利枢纽公司提供数据。

## 参考文献:

- [1] Du J, Yin K, Lacasse S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2013, 10(2): 203 - 218.
- [2] Manzoor H, Timothy D. Back-analysis of Preexisting Landslides [J]. *Geo-Frontiers*, 2011, 32(10): 3659 - 3668.
- [3] Guo D, Masanori H, Jia H. Influential factors on slope stability and landslide mobility [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2013, 31(8): 247 - 254.
- [4] Komac M, Holley R, Mahapatra P, et al. Coupling of GPS/GNSS and radar interferometric data for a 3D surface displacement monitoring of landslides [J]. *Landslides*, 2014, 12(2): 241 - 257.
- [5] Benoit L, Briole P, Martin O, et al. Monitoring landslide displacements with the geocube wireless network of low-cost GPS [J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 111 - 121.
- [6] Yin Y, Wang H, Gao Y, et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2010, 7(3): 389 - 389.
- [7] Jian W, Xu Q, Yang H, et al. Mechanism and failure process of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2999 - 3013.
- [8] Massey C I, Petley D N, McSaveney M J. Patterns of movement in reactivated landslides [J]. *Engineering Geology*, 2013, 159(12): 1 - 19.
- [9] Wang G, Kearns T J, Yu J, et al. A stable reference frame for landslide monitoring using GPS in the Puerto Rico and Virgin Islands region [J]. *Landslides*, 2014, 11(1): 119 - 129.
- [10] Tian D. A slope stability analysis method based on unsaturated seepage of slope and its comparison with Geoseep software [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 540: 177 - 180.
- [11] Paronuzzi P, Rigo I E, Bolla A. Influence of filling-drawdown cycles of the Vajont reservoir on Mt. Toc slope stability [J]. *Geomorphology*, 2013, 191(5): 75 - 93.
- [12] Pastor M, Blanc T, Haddad B et al. Application of a SPH depth-integrated model to landslide run-out analysis [J]. *Landslides*, 2014, 11(5): 793 - 812.
- [13] Huang Q X, Wang J L, Xue X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide [J]. *Landslides*, 2016, 13(9): 1139 - 1149.
- [14] Song K, Yan E, Zhang G, et al. Effect of hydraulic properties of soil and fluctuation velocity of reservoir water on landslide stability [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 1 - 11.
- [15] Liu W, He S. A two-layer model for simulating landslide dam over mobile river beds [J]. *Landslides*, 2016, 13(3): 565 - 576.