

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.020

三峡库区水位变动下推移式滑坡监测变形分析

易朋莹^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 400016)

摘要:三峡水库蓄水诱发了多处推移式滑坡变形加剧,为了加强对该类滑坡在三峡水库水位调节下变形特征的认识和灾害的预防,以三峡库区典型推移式滑坡——云阳凉水井滑坡地质条件和变形特征为例,制定监测方案;通过对滑坡地表位移、地表裂缝、深部位移、地表水位、降雨量及宏观巡查等方面的监测,分析监测指标的变化规律及相互关系,研究降雨及库水位升降对滑坡变形影响,分析了降雨、库水位变化时滑坡体变形和变形速度的规律;结合条块自身稳定系数变化量,揭示了推移式滑坡在降雨和库水位两种不同作用机制下的变形规律:降雨对后部变形影响大,库水对前部变形影响大,水位越高影响越强烈;降水时动水压力对滑体变形影响较大;同时受降雨和降水作用时滑体变形最大。其变形规律为该类滑坡防灾减灾提供了科学依据。

关键词:水位变化;推移式;变形监测;变形规律;变形机制

中图分类号: TU 457

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)09-127-06

Monitoring and deformation analysis of pushed landslide changing water level in the Three Gorges reservoir

YI Pengying^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Hi-Tech Engineering Reconnaissance & Design Institute, Chongqing 400016, China)

Abstract: The typical pushed landslide deform becomes stronger when water fills in the Three Gorges reservoir. In order to better recognize the landslides deformation characteristics and prevent the disaster by the water change regulation, the paper takes an example of the features of geological conditions and deformation of Liangshuijing landslide in Yunyang which is the typical pushed landslide in the Three Gorges reservoir, and designs monitoring project. Through monitoring data including the surface displacement, ground fissure, deep displacement, ground water level, rainfall and macroscopic patrol, the variety law and relationship among monitoring data are obtained. The regularity of landslide deformation and its deformation velocity are concluded when the variation of the rainfall and water level change. Combined the variation of bands-stabilization coefficient, deformation laws of the pushed landslide by the rainfall or the reservoir water are obtained. The deformation caused by rainfall is large in the back landslide, while the deformation caused by hydrodynamic pressure is large in the front landslide. The higher the water level, the severelier of the influence. The deformation is largely influenced by hydrodynamic pressure when reservoir water declines sharply in the front landslide, and the deformation is the largest when rainfall and reservoir sharpe water decline happened simultaneously in the whole landslide.

收稿日期: 2013-04-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50625824);重庆市科委重点攻关项目(CSTC,2006AB7003)

作者简介: 易朋莹(1977-),男,重庆大学博士研究生,高级工程师,研究方向为地质灾害防治预警,(E-mail) yipyyipy@126.com。

The law provides scientific basis for reduction and prevention disaster of the pushed landslide.

Key words: changing water level; pushed landslide; deformation monitoring; deformation law; mechanism of deformation

滑坡监测是通过及时对滑坡的应力、应变及地下水等内部物理参数^[1-6]和地震、降雨量及地表水等外部条件参数^[7,8]的捕捉,了解和掌握滑坡的演变过程,为正确评价、预测滑坡及工程治理提供可靠资料和科学依据,是一种重要的滑坡灾害预防手段^[1-2]。大量研究者从滑坡降雨^[7]、土体蠕变^[8-11]等方面研究滑坡变形的影响因素,分析陆地滑坡的失稳规律^[2,4,11-15],其中仅文献^[2]、^[7]分析了水库水位变化对牵引型滑坡的变形规律。三峡库区内存在大量推移式滑坡,其致灾程度大,影响范围广,破坏力强,在库水位变动作用下失稳机制和变形特征与前述滑坡差异较大,目前三峡工程试验性蓄水期间出现多处推移式滑坡变形加剧,但这方面的研究成果较少,对其变形规律的认识较为缺乏,笔者以云阳凉水井滑坡为例,通过对该滑坡各区域的地表变形、裂缝变化和深部位移变化特征分析,研究库水和降雨对推移式滑坡作用机理,总结三峡库区推移式滑坡的变形规律,为滑坡灾害防治提供科学依据。

1 滑坡概况

1.1 滑坡地质条件及形态特征

凉水井滑坡位于云阳故陵镇的长江右岸斜坡地带,滑坡平面形态呈“U”形,为圈椅状地形,南高北低,后部和前部地形较陡,中部地形较缓,自然坡度 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。滑坡前缘高程约100 m,后缘高程约319.5 m,纵向长约434 m,横向宽约358 m,面积约 $11.82\times 10^4\text{ m}^2$,总体积约 $407.79\times 10^4\text{ m}^3$ 。滑体为滑坡堆积(Q_4^{del}),物质组成在竖向上变化较大,上部为含角砾粉质粘土、碎块石土,下部为砂岩、泥岩块石及未完全解体的巨块石。滑床为侏罗系中统沙溪庙组(J_2s)泥岩和砂岩互层,岩层产状为 $340^{\circ}\angle 45^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 。滑面后部较陡,从中部到前部逐渐变缓,整体略向左倾,为推移式滑坡,滑带为含角砾粉质粘土,厚3~5 cm,含水量高,滑动方向与现坡向基本一致。典型地质剖面见图1。

1.2 滑坡变形特征

2010年1月,三峡库区175 m试验性蓄水,受库水浮托作用滑坡中前部出现地表裂缝。2010年3月底水位降至160 m时遇暴雨,变形加剧,后缘张拉裂缝与两侧剪切裂缝贯通,裂缝宽40~410 mm,下挫高20~660 mm;中前部发育了鼓胀裂缝;前缘塌岸区发育了张拉裂缝,裂缝分布见图2。简易裂缝监测发现裂缝宽度持续增加,滑坡失稳后可能堵

塞长江航道,产生的涌浪可能威胁上下游数十公里船只的安全。为了确保航道及船只安全,为灾害预防提供科学依据,采用专业预警监测。

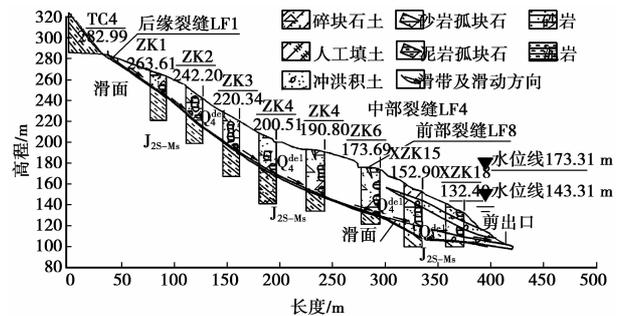


图1 典型工程地质剖面图

2 监测方法及监测点布置

本滑坡主要采用远程自动化实时监测,内容包括:地表位移监测、地裂缝监测、深部位移监测和雨量监测,监测方案见图2。各监测项目每4 h观测1次,汛期或变形加速期每2 h观测1次,变形强烈时1次/h,紧急情况连续监测。

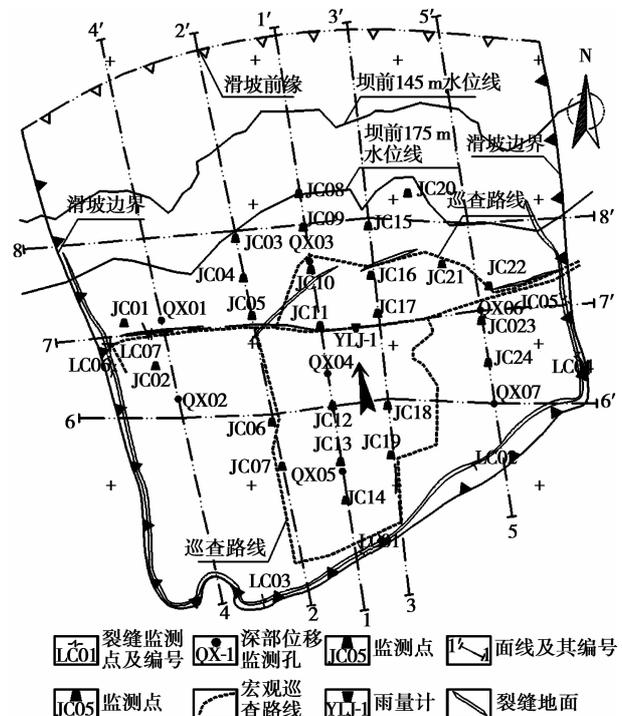


图2 滑坡监测点平面图

2.1 地表位移监测

在滑坡体上布设24个监测点,形成3横5纵8条

监测剖面。位移监测采用徕卡 TCRA1201R1000 自动全站仪(又称为测量机器人),静态测角精度为 $\pm 1''$,测距精度为 $1\text{ mm} + 1.5 \times 10^{-6}$,采用 ATR 模式自动目标识别,当全站仪发送的红外光被反射棱镜返回并经全站仪内置的 CCD 相机判别接受后自动转向棱镜,自动目标识别的有效距离 1 000 m,可进行 24 h 连续自动精确测定。

2.2 地表裂缝宽度监测

在滑坡后缘及两侧裂缝内外布置 7 个监测点。地表裂缝监测采用 KLA-1 型拉线式无线地裂缝监测系统,该系统将传统的拉线测量原理与现代化通讯技术有机结合,已在宜昌、重庆万州等地的滑坡监测中应用,监测效果较好。

2.3 深部位移监测

深部位移监测点共布设 7 个(3 传感器/点),采用固定式钻孔倾斜仪:量程 $\pm 30^\circ$ 、灵敏度 $8''$ 、精度 $0.1\%FS$ 。深部位移监测系统由安装在测斜管内的传感器(若干个探头串)、数据传输设备、微机数据处理系统组成。探头通过自身斜度变化输出响应信号,通过通讯网络传输给远程上位机绘制位移曲线图,及时反应位移变化情况。

2.4 降雨量监测

滑坡区内布置一个雨量计,采用降雨量实时遥测系统,该系统基于翻斗式雨量计的工作原理,并集成了无线实时监测装置,将测量成果输入 GSM 网络。

3 变形特征分析

3.1 地表位移监测

由于数据量大,笔者根据滑坡变形特征将滑坡分为中前部(JC03),左侧(JC02),右侧(JC22),后缘(JC14)4 个区,按照降雨和库水位变化情况分为 5 个阶段,选择有代表性的监测点来分析滑坡变形特征,其水平位移累计曲线见图 3,变形速度见表 1。

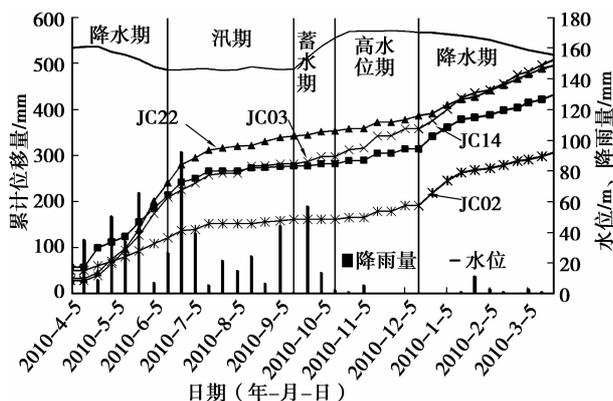


图 3 累计位移量-时间-水位-降雨量曲线图

表 1 水平位移变形速度表

监测点	变形速度/(mm·d ⁻¹)				
	降水期	汛期	蓄水期	高水位期	降水期
	4.5~ 6.10	6.11~ 9.15	9.16~ 10.23	10.24~ 12.17	12.18~ 11.3.25
JC2(左)	1.655	0.513	0.098	0.481	1.179
JC3(前)	2.779	0.806	0.822	0.817	1.545
JC14(后)	2.942	0.878	0.218	0.510	1.217
JC22(右)	3.336	1.202	0.315	0.579	1.129
平均速率	2.678	0.850	0.363	0.597	1.268
平均降雨量	3.369	2.616	1.958	0.140	0.468
平均水位 ¹⁾	-0.200	0.002	0.625	0.000	-0.151

1)单位为 m/d。

图 3 和表 1 表明,该滑坡各部位在各阶段变形趋势基本一致,整体变形缓慢,全年位移量平均为 400.73 mm,最大为 509.90 mm(JC03)。2010 年 4 月 5 日至 6 月 10 日三峡库水位下降且降雨量较大,各监测点累积位移曲线斜率均较大,主要受库水位下降和降雨影响,各区域变形速度关系为右侧>后缘>中前部>左侧;2010 年 6 月 11 日至 9 月 15 日,库水位在 145~146 m 之间波动,变形主要受降雨影响,平均速率较小,大小关系为右侧>后缘>前缘>左侧;2010 年 9 月 15 日至 10 月 23 日蓄水至 170 m 左右,主要受库水位影响,平均速率进一步减小,其大小关系为前缘>右侧>后缘>左侧;2010 年 10 月 24 日到 12 月 17 日库水位在 170~171.3 m 波动,滑坡各部位变形规律与蓄水期一致,变形主要受库水位控制;2010 年 12 月 18 日至 2011 年 3 月 25 日库水位下降,滑坡整体变形加剧,各区域变形速度关系为前缘>后缘>右侧>左侧。整体表明,2010 年 4 月~6 月由于库水位下降较快且有降雨作用滑坡变形最强烈,2010 年 12 月~2013 年 3 月库水位降落较慢变形强度次之,然后为汛期,再其次为高水位期,蓄水期变形最慢。降雨对滑坡后缘及右侧变形影响较大,库水位变化对滑坡前缘和后缘变化较大。

滑坡后部、右部及前部变形趋势一致,变形速率平均值为 1.13 mm/d,整体性较好。右侧前缘为陡斜坡,约束小变形较快,前缘变形速度最大,为 1.436 mm/d;文献[16]表明滑面略向左侧倾斜,埋深大受边界约束较强,变形速度为 0.87 mm/d(JC02),变形较慢。根据变形曲线斜率变化和监测

期间位移矢量发现,2010年9月15日前受右后部推移作用变形从滑坡后部到前部、从右侧到左侧轮流接替发生;2010年9月15日后受前缘浮托和牵引作用变形从前部到后部、从右侧到左侧轮流接替发生。

3.2 地表裂缝监测分析

选择 LC01(后缘)、LC05(右侧)、LC06(左侧)和 LC07(左前部)的裂缝监测点分析裂缝变形特征,裂缝宽度累计变化量曲线见图4,变形速度见表2。

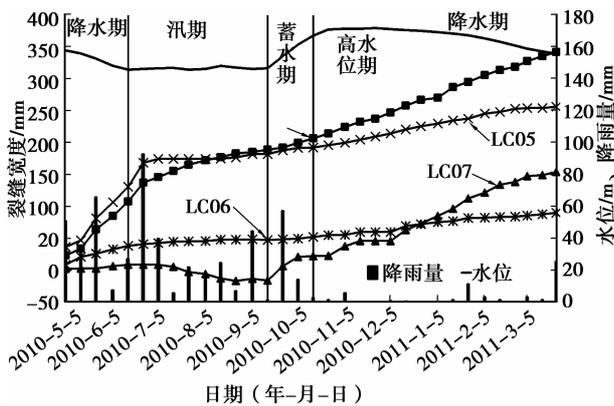


图4 地表裂缝宽度-时间-水位-降雨量曲线图

表2 裂缝宽度变形速度表

监测点	变形速度/(mm·d ⁻¹)				
	降水期	汛期	蓄水期	高水位期	降水期
	5.4~6.10	6.11~9.15	9.16~10.23	10.24~12.17	12.18~11.3.25
LC01(后)	1.970	0.894	0.644	0.837	0.841
LC05(右)	2.223	0.592	0.329	0.499	0.349
LC06(左)	0.707	0.110	0.197	0.273	0.207
LC07(中)	0.158	-0.26	1.019	0.753	0.923

图4和表2表明:滑坡后缘、右侧及左侧在各阶段变形趋势一致,为缓慢变形,最大裂缝宽度为341.79 mm。2010年5月4日至6月10日水位下降且降雨量较大,各点变形速度较快,曲线斜率总体较稳定,但在降雨量大时有突变;右侧裂缝变形最快,后缘次之,左侧最慢。2010年6月11日至9月15日为汛期,库水位变化不大,变形主要受降雨影响,裂缝变形减弱,但后缘变形最快,右侧较慢,左侧最慢。2010年9月15日至2011年3月为水位变化期,裂缝变形加剧,后缘变形最快,右侧稍慢,左侧最慢。滑坡后缘和右侧裂缝全年变形较大,左侧变形

较小。裂缝变形在2010年5月~6月变形最强烈,汛期滑坡变形稍次,2010年12月~2013年3月降水期次之,再次为高水位期,最慢为蓄水期。

滑坡左前部的 LC07 为在汛期受后侧滑体挤压裂缝宽度有减小的现象,与该区地表隆起变形相符,在库水位作用强烈时演变为张拉裂缝,且受库水位影响,变形较强烈。

3.3 地表变形分析

滑坡后缘、右侧及左侧的水平位移监测点和裂缝点变形对比曲线如图5所示:裂缝变形和水平位移在各阶段的变形特征基本相同,但水平位移曲线在降雨或水位变化期突变较明显,准确地反映了滑坡的变形情况,裂缝变形曲线较圆滑,对外界条件反应不敏感。

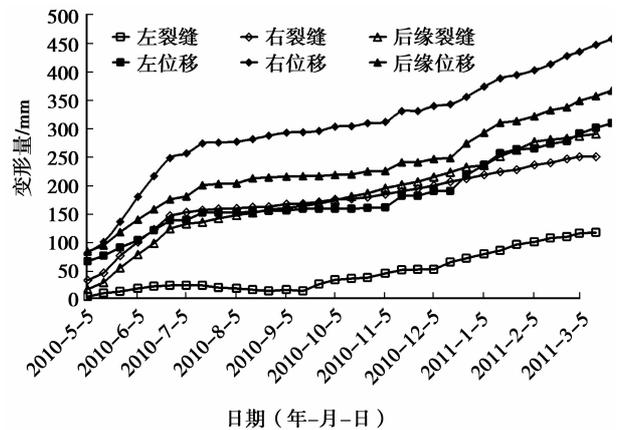


图5 不同部位裂缝宽度、水平位移对比图(平均值)

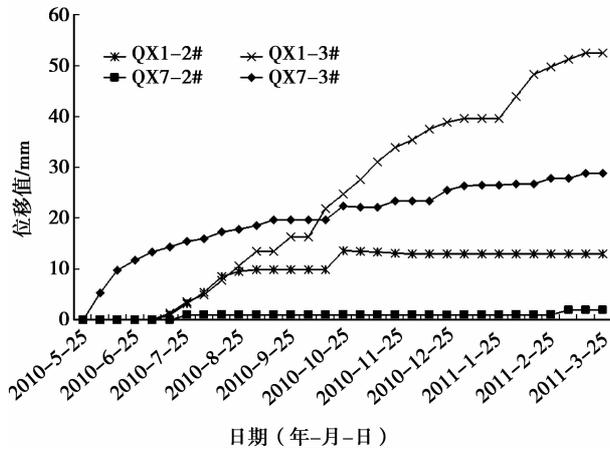
3.4 深部位移监测分析

选取具有代表性的深部位移监测点 QX1、QX7 位移曲线图进行分析(1#、2#、3#分别代表滑床、滑带附近及滑体中的传感器)。

QX1 位于滑坡左前部, QX7 位于滑坡右后部位,2010年5月25日至6月10日,滑坡变形主要受水位降落和暴雨影响, QX1 距离水位变动区较远,且受左侧边界约束,滑坡深部无变形, QX7 变形较强烈,变形速度较快;2010年6月11日至9月15日汛期, QX7 曲线较缓,后缘深部变形略有减小, QX1 曲线斜率较稳定,变形较快;2010年9月15日蓄水以后 QX1 受水位变化较大,变形速度快,但具有间歇性, QX7 变形较慢,曲线呈台阶状,变形的间歇期更长。总体表明,低水位时滑坡变形从右后到左前,蓄水后滑坡变形从左前到右后;后部受降雨影响强烈,前部受水位变动影响强烈。

对比图3、图4和图6,深部位移监测成果与相

应的位移监测和裂缝监测成果在时间上较吻合,当深部位移变形时,地表和裂缝也发生变形,但表层变形比深部变形强烈。



QX1-1# 和 QX7-1# 位移曲线与时间轴重合

图6 QX1 和 QX7 深部位移曲线图

4 变形机制分析

根据滑坡左中右3条剖面在各时期所处工况进行稳定性分析,计算方法采用传递系数法,计算结果见表3。计算结果表明:滑坡稳定系数从右到左逐渐增加,与滑坡横向变形趋势大致相符,与文献[16]滑面左倾约束较强相符。各剖面条块在降雨和库水位变时自身稳定系数 F' (阻滑力除以下滑力)不断变化,该滑坡勘察期间(160 m 静水位且无降雨影响)与各工况条块稳定系数相差后对比分析,汛期库水位在145~146 m 之间波动,受降雨控制,后部条块自身稳定系数减少量较大;蓄水期和高水位期中部和前部条块自身稳定系数减少量较小;降水期中部和前部条块自身稳定系数减少量较大,在4月~6月受降雨和库水位下降的双重作用,自身稳定系数减少量最大,与滑坡各部位在各时期的变形特征相符。

表3 稳定性分析结果表

位置	不同工况下的稳定系数				
	降水期	汛期	蓄水期	高水位期	降水期
	4.5~6.10	6.11~9.15	9.16~10.23	10.24~12.17	12.18~11.3.25
1-1'剖面	1.038	1.067	1.074	1.065	1.048
4-4'剖面	1.080	1.112	1.132	1.128	1.090
5-5'剖面	1.010	1.048	1.056	1.050	1.018
后部条块	0.035~0.057	0.035~0.057	0	0	0
中部条块	0.036~0.055	0.044~0.055	0~0.002	0~0.002	0.023~0.043
前部条块	0.143~0.211	0.010~0.013	0.001~0.028	0.001~0.028	0.145~0.232

结合文献[16],滑坡后侧汇水面积较大,大气降水经地表汇集至滑坡后缘平台区,滑体为透水性好的碎块石土和块石,地表水下渗后在滑面附近富集,能较快降低后部滑面强度,因此降雨期间后部变形较大,滑体自身稳定系数降低快。随着库水位上升前缘阻滑段滑体逐渐进入水库,受水浮托作用有效重度降低,阻滑力减小自身稳定系数降低,变形增大;高水位时滑体受浮托力最大,前缘滑体变形比蓄水期大;水位降落时,滑体在受到库水浮托作用的同时,地下水下降的动水压力增大了滑坡牵引力,滑块自身稳定系数进一步降低,变形加剧,如果时逢降雨,在降雨和水位降落双重因素作用下,滑体前缘和后缘同时发力,滑坡变形最快,稳定系数最低,滑坡失稳可能性最大。

5 结论

通过对凉水井滑坡变形的综合分析,推移式滑坡在降雨和库水位两种不同的作用机制下,变形规

律如下:

1)降雨汇集并快速下渗降低推移式滑坡后部滑面强度,对后部变形影响强烈。

2)库水位上升的浮托作用减小了前部滑体有效重度而减小了阻滑力,对前缘影响强烈,水位越高变形越大。

3)水位下降时地下水动水压力增大了滑坡牵引力,前部变形加剧,同时受降雨作用时滑坡整体变形最大,稳定性最差。

4)根据当前库水位调节模式,2010年4月~6月由于库水位下降较快且有降雨作用滑坡整体变形最强烈,2010年12月~2011年3月库水位降落较慢变形强度次之,然后为汛期,再其次为高水位期,蓄水期变形最慢。

5)位移监测比裂缝监测更能准确地反映滑坡的即时变形情况;表层变形比深部位移强烈,水位降落对滑坡的影响比降雨的影响大。

参考文献:

- [1] 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): 1081-1090.
HE Manchao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disaster of landslides and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090.
- [2] 徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2188-2196.
XU Jinjun, WANG Haicheng, LUO Yuzhen, et al. Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2188-2196.
- [3] Schneider D. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams[C/OL]// Proceedings of the 3th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structure Engineering and the 12th FIG Symposium on Deformation Measurement, May 22-24, 2006, Baden, Austria. [2012-03-10]. <http://130.203.133.150/showteitng;jsessionid=01D3B7C18A5FBACA3D014943C785410F?cid=13855352>.
- [4] 王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 等. D-INSAR 技术在大范围滑坡监测中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1337-1344.
WANG Guijie, XIE Mowen, QIU Chi, et al. Application of D-INSAR technique to landslide monitoring [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1337-1344.
- [5] Singhroy V, Couture R, Alasset P J, et al. In SAR monitoring of landslides on permafrost terrain in Canada[C]// Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 23-28, 2007, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2008: 2451-2454.
- [6] 王义锋. 基于测斜仪监测成果的蠕滑体变形机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 212-216.
WANG Yifeng. Analysis of creep deformation mechanism based on inclinometer monitoring results [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 212-216.
- [7] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060.
GAO Huaxi, YIN Kunlong. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1055-1060.
- [8] Simeoni L, Mongiovi L. Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6): 653-666.
- [9] Gibo S, Egashira K, Ohtsubo M, et al. Strength recovery from residual state in reactivated landslide[J]. Geotechnique, 2002, 52(9): 683-686.
- [10] 许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099-1106.
XU Qiang, ZENG Yuping. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1099-1106.
- [11] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112.
XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early-warning prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104-1112.
- [12] 阮波, 李亮, 刘宝琛, 等. 浒家洞滑坡治理工程监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1445-1449.
RUAN Bo, LI Liang, LIU Baochen, et al. Analysis on deformation monitoring and tendency of Xujiadong landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1445-1449.
- [13] 祝建, 蔡庆娥, 姜海波. 西藏樟木口岸古滑坡变形监测分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 66-71.
ZHU Jian, CAI Qing'e, JIANG Haibo. Deformation monitoring & analysis of ancient landslide at Zhangmu port in Tibet [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 66-71.
- [14] 白俊光, 吕生弟, 韩建设. 李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1723-1731.
BAI Junguang, Lü Shengdi, HAN Jianshe, et al. Stability prediction of reservoir landslide of Lijiaxia hydropower station before and after reservoir impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 29(7): 1723-1731.
- [15] 薛星桥, 金泉豪, 王刚, 等. 三峡库区塘角村 1 号滑坡变形特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 125-129.
XUE Xingqiao, JIN Xiaohao, WANG Gang, et al. An analysis of the deformation characteristics of the No. 1 landslide of Tangjiao Village in the Three Gorges reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 125-129.
- [16] 重庆市高新岩土工程勘察设计院. 三峡工程 175 米试验性蓄水地质灾害(灾)险情应急项目重庆市云阳县故陵镇凉水井滑坡详细勘察报告[R]. 重庆: 重庆市云阳县国土局, 2009.