

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.17

## 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

黄 达<sup>1</sup>, 匡希彬<sup>1</sup>, 罗世林<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;

2. 湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411100)

**摘要:** 为深入研究库区古滑坡变形特征及其复活机理, 文章以三峡库区藕塘滑坡为研究对象, 通过对钻孔、探槽及平硐等现场勘查资料和监测资料的深入分析, 并结合数值模拟方法, 探讨了藕塘滑坡的时-空变形特点及影响因素, 并揭示其复活机制。电子自旋共振试验和现场勘查结果表明藕塘滑坡由三个次级滑体组成。监测数据显示: 总体上, 地表累计位移-时间曲线呈阶跃状变化, 即雨季滑坡变形速率急剧加快, 旱季则骤减; 在空间上滑坡的变形速率随高程的增加而增加。库水和降雨是导致藕塘滑坡变形破坏的主要因素: 滑坡下部区域变形主要受库水影响, 而滑坡中、上部区域变形主要受降雨影响。数值模拟结果也进一步揭示了影响滑坡孔隙水压力响应的主控因素随滑坡高程的变化而变化。库水骤降使得坡体前部渗透压增大, 同时强降雨使得坡体中部及上部孔隙水压力升高, 二者共同作用下导致滑坡复活。此外库水位下降或降雨量增加, 均会不同程度降低边坡的稳定性。以上结论对于指导实际工程及深化库区古滑坡的研究具有一定的理论意义, 同时加强古滑坡的研究有助于丰富滑坡稳定性评价及预测预报方法, 为古滑坡的治理提供一定的理论依据。

**关键词:** 三峡库区; 藕塘滑坡; 古滑坡; 变形; 复活

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0127-09

## A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

HUANG Da<sup>1</sup>, KUANG Xibin<sup>1</sup>, LUO Shilin<sup>1,2</sup>

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

2. Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, China)

**Abstract:** To study the deformation characteristics and the triggering-mechanism of ancient landslide, the Outang landslide is selected as a research object and its temporal-spatial deformation characteristics, corresponding trigger factors and reactivated mechanism are examined based on detailed analyses of geological materials obtained by using boreholes, trench, adits and monitoring data sets as well as the simulation numerical model. Electron spin resonance tests and in-site investigations show that the Outang landslide is composed by three secondary sliding masses. Generally, the cumulative displacement-time curves are step-shaped, characterized by rapid displacement in the summer followed by almost imperceptible movement at dry seasons. The displacement velocities usually increase spatially with the rise of elevation. The deformation of the Outang landslide is primarily controlled by reservoir water and rainfall. The deformation of the lower part of the landslide is mainly affected by reservoir water, while the deformation of the middle and upper part of the landslide is mainly affected by rainfall. Numerical analyses further reveals that the main controlling factors influencing the pore water pressure of landslide vary with the change of the elevation. The coupled actions of

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41672300)

第一作者: 黄达(1976-), 男, 教授, 博导, 主要从事岩土工程方向的教学与研究工作。E-mail: hdcqy@126.com

通讯作者: 匡希彬(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: kxb4808059@163.com

increased in seepage pressure at the front and the pore water pressure at the middle and upper parts result in the reactivation of the Outang landslide. In addition, the slope stability will be reduced to different degrees when the water level of the reservoir decreases or the rainfall increases. The results are very useful not only in the practical engineering but also in the theoretical study of the ancient landslide in reservoir areas. Moreover, strengthening the study of old landslide would enrich the methods on landslide forecast and its stability evaluation, and provide the guideline of ancient landslide prevention.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; Outang landslide; ancient landslide ; deformation; reactivation

三峡库区自蓄水以来,水位在 145 ~ 175 m 高程之间波动(本文中水位高程均为吴淞高程),同时库区降雨充沛,暴雨较多,使得库水消落带岩体结构松散,局部侵蚀、崩塌现象严重。长期的库水位升降<sup>[1-2]</sup>和降雨入渗<sup>[3-4]</sup>诱发三峡库区大量古滑坡复活,如安乐寺滑坡<sup>[5-7]</sup>、黄土坡滑坡<sup>[8-9]</sup>、曲池滑坡<sup>[10-11]</sup>等。

藕塘滑坡是三峡库区中典型的顺层古滑坡,自 2003 年库区蓄水以来,现场调查及地质勘查发现滑坡表现出较多的复活迹象,如坡面裂缝、滑面擦痕及滑坡前缘局部崩塌等。前人对该古滑坡进行了较多的研究工作,殷跃平等<sup>[12]</sup>认为库水位的升降以及降雨因素是促使藕塘滑坡复活变形的主要因素,且合理控制库水位升降速度能够有效减少地质灾害的发生;代贞伟等<sup>[13]</sup>从地貌学以及工程地质力学角度分析了藕塘滑坡形成机制以及变形主控因素,并提出了藕塘滑坡各区域破坏机制;胡致远等<sup>[14]</sup>通过数值模拟方法提出藕塘滑坡浅层滑体稳定性主要受库水波动影响,深层滑体在强降雨条件下变形主要受降雨因素控制,降雨量低于 160 mm/d 时,深层滑体变形受库水以及降雨联合作用。肖婷等<sup>[15]</sup>通过对比不同库水位下降速度下四方碑滑坡的稳定性系数变化趋势,提出古滑坡稳定性预测办法;周云涛等<sup>[16]</sup>、曾耀<sup>[17]</sup>以库区太白岩古滑坡以及安乐寺古滑坡为研究对象,阐明了超孔隙水压力对库区古滑坡的破坏机理,并且前者提出了考虑超孔隙水压力的特大型近水平崩坡积层古滑坡稳定系数表达式。

上述工作极大地丰富了三峡库区古滑坡的研究成果,但未涉及长期地表监测数据分析以及滑坡体的区域变形控制因素研究。因此本文在前人研究的基础上,通过对现场勘查资料和对长期监测资料(长达 7 a)的深入分析,并结合数值模拟方法,探讨了藕塘滑坡的时-空变形特点及其相应的影响因素,进而揭示其复活机制,以期库区滑坡灾害的防治及规划设计、保护长江航道的正常运行和两岸城镇居民的生命财产安全提供参考。

## 1 滑坡区工程地质背景

藕塘滑坡位于重庆市奉节县安坪镇长江南岸,上距重庆约 425 km,下距三峡大坝约 177 km,滑体规模较大,属于复活型巨型顺层古滑坡。藕塘滑坡前缘高程 100 m,后缘高程 475 m,滑体长 1 500 m,宽 830 ~ 1 170 m,厚 40 ~ 70 m,总面积为  $133 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,总体积约为  $6 480 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。基于探槽和平硐勘查及电子自旋共振试验结果,认为藕塘滑坡为三级滑体(图 1)。其中一级滑体和二级滑体均沿灰色炭质黏土岩软弱层(R3)滑动,三级滑体沿灰黑色黏土岩软弱层(R1)滑动(图 2a)。一、二、三级滑体及滑带土形成年龄分别为 120 ~ 130 ka, 65 ~ 68 ka 和 47 ~ 51 ka,各级滑体结构均表现出前部反翘,中部及后部岩层产状与基岩一致。

滑坡区地质构造属于浅中切割单斜低山河谷地貌,走向以北东—南西方向为主,位于故陵向斜的东南翼。该区域地层主要由上覆第四系全新统残坡积层( $Q_4^{\text{del}}$ )、冲洪积层( $Q_4^{\text{al+pl}}$ )、滑坡堆积层( $Q_4^{\text{del}}$ )及下伏侏罗系下统珍珠冲组( $J_1z$ )基岩组成<sup>[18]</sup>。滑坡区基岩以灰色中厚层含铁质结核细砂岩为主,夹薄层状灰黑色黏土岩或页岩,厚度约为 185.0 ~ 248.5 m。现场勘查发现一级滑体区域基岩岩层产状为  $310^\circ \sim 350^\circ \angle 20^\circ \sim 27^\circ$ ,二、三级滑体区域基岩岩层产状为  $330^\circ \sim 350^\circ \angle 25^\circ \sim 28^\circ$ 。岩体内部发育有两组裂隙,第一组为张性裂隙,产状  $120^\circ \sim 150^\circ \angle 55^\circ \sim 75^\circ$ ,间距 1.2 ~ 2.1 m,可见长度 1.0 ~ 4.5 m;第二组为扭性裂隙,产状  $45^\circ \sim 75^\circ \angle 65^\circ \sim 84^\circ$ ,间距 1.3 ~ 3.2 m,可见长度 2.0 ~ 3.2 m。滑体部分浅表层以黏土夹碎裂粉砂岩为主,土石比为 6:4 ~ 8:2,厚度 1.50 ~ 18.23 m;下部堆积体以细砂岩为主的碎裂块石为主,土石比 4:6 ~ 1:9,厚 2.50 ~ 114.5 m。地层单元见图 1 及图 2(a)。

滑坡区年平均气温和降雨量分别为 16.3 ℃ 和 1 147.9 mm。在完整的水文年(从本年的 10 月至次年 9 月)中,降雨集中期为 5—9 月,特别是在 7 月和 8 月,最大日降雨量可达 148.2 ~ 158.6 mm。

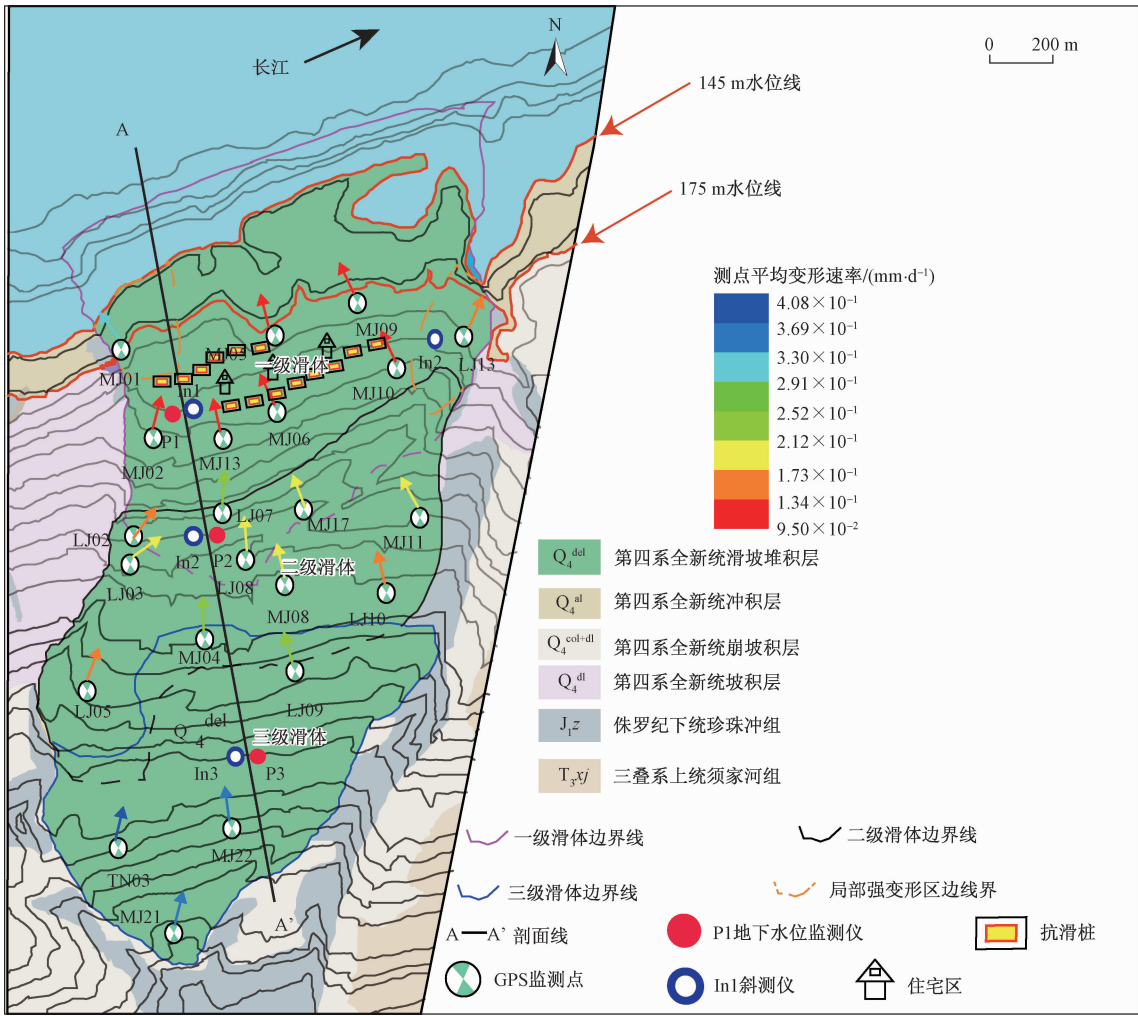


图 1 藕塘滑坡平面图及其监测系统布置图

Fig. 1 Plane sketch of the Outang landslide and the monitoring system layout

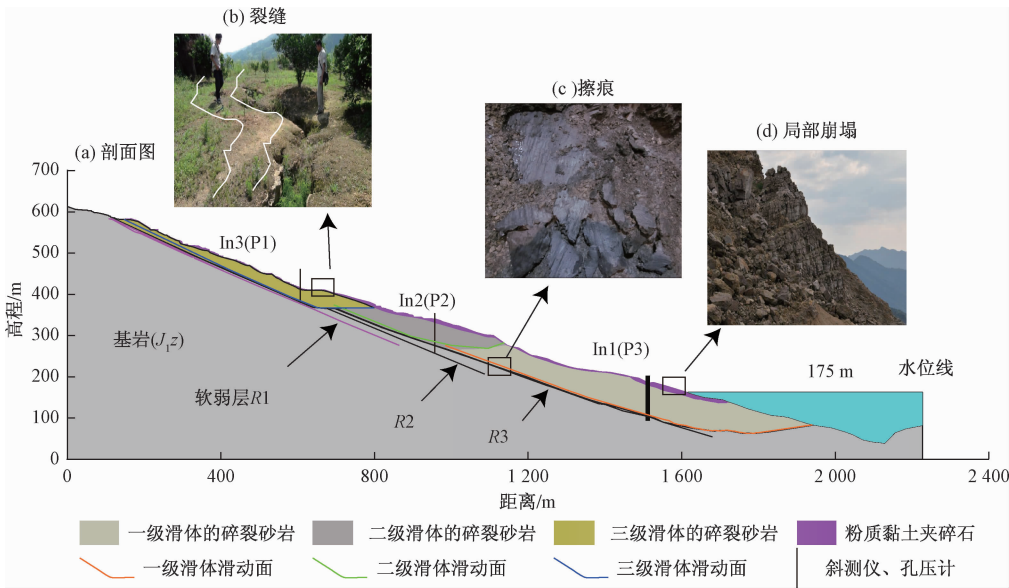


图 2 藕塘滑坡 A-A' 地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the Outang landslide

## 2 监测数据分析

### 2.1 地表位移监测数据

大部分 GPS 监测点的运动主方位角指向长江并且变化范围在  $340.0^{\circ} \sim 359.3^{\circ}$  之间,部分 GPS 监测点(LJ13, LJ02 和 LJ03 站)的运动方位角变化范围为  $3.8^{\circ} \sim 17.8^{\circ}$  (图 1)。通过监测数据可以发现:总体上,随着高程的增加,滑体的变形速度增大,如 MJ05 的月变形量为 2.94 mm (高程约为 179 m), MJ17 的月变形量为 6.21 mm (高程约为 310 m), TN03 的月变形量为 11.84 mm (高程约为 576 m)。

根据地表累计位移与库水位、降雨量关系曲线(图 3)可知,古滑坡体水平方向和垂直方向位移曲

线随时间的变化特征相似,均呈阶跃状变化。滑坡快速变形集中在每年 5—9 月,该时段内库区保持低水位运行且降雨量较大,此后滑坡变形速度极为缓慢。根据图 3(d)可知,2011 年 6 月初库水位已从 175 m 下降到 150 m,在坡脚位置 MJ01 和 LJ13 站监测到水平位移最大速度约 0.85 mm/d, MJ05、MJ06 以及 MJ08 监测站位置也开始以相对较小的速度(约 0.12 mm/d)运动。

从 2012 年 5—9 月,由于降雨量增加以及库水位下降,各级滑体位移明显增加,尤其边坡中上部三级滑体区域, TN03 测得累计水平位移达 208 mm。同期由于一级滑体区域容易受到库水侵蚀作用,该区域 MJ01 站点截至 2012 年 8 月测得累计水平位移达 148 mm。

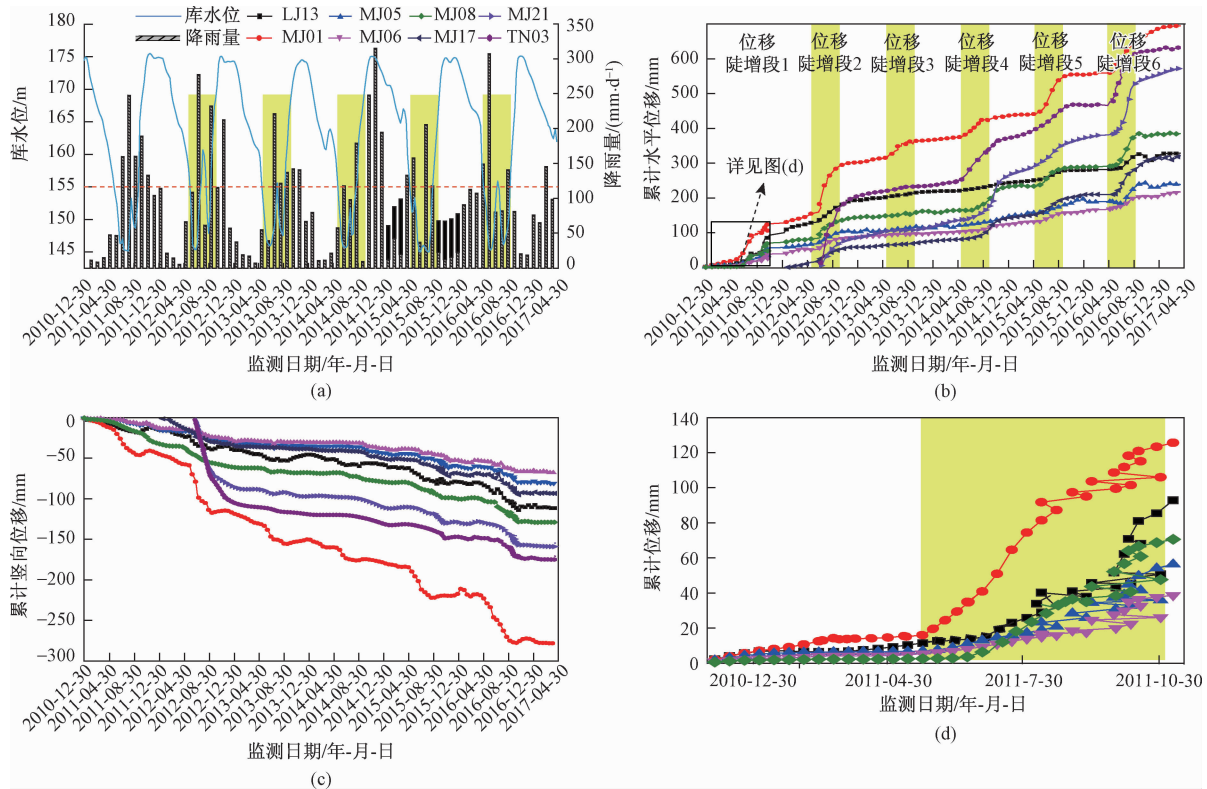


图 3 地表累计位移与库水位、降雨量关系曲线

Fig. 3 Relationship between cumulative displacement of the Outang landslide and precipitation and reservoir level

### 2.2 深部位移监测数据

图 4 为藕塘滑坡 A-A' 剖面上的斜测仪 In1、In2、In3 监测所得累计深部位移关系曲线。监测数据显示一级滑体深部位移在距地表约 60 m 处开始急剧增加,二级滑体深部位移在距地表 70~75 m 处开始迅速增加,三级滑体深部位移突变点位于距地表约 50 m 处(图 4 红色虚线圈出位置),监测数据所得各级滑体深部位移突变位置与现场地质调查所揭示的实际滑动面(图

2c) 基本一致。综合地质勘察资料以及现场监测数据,可以推断藕塘古滑坡具有明显的滑动面,且滑动面大体位于堆积体和基岩接触的界面。

### 2.3 地下水位监测数据

图 5 为 2011 年 11 月—2012 年 4 月期间藕塘滑坡地下水与库水—降雨时间关系曲线,可以看出滑体不同区域地下水位变化趋势与降雨以及库水位变化趋势不同。

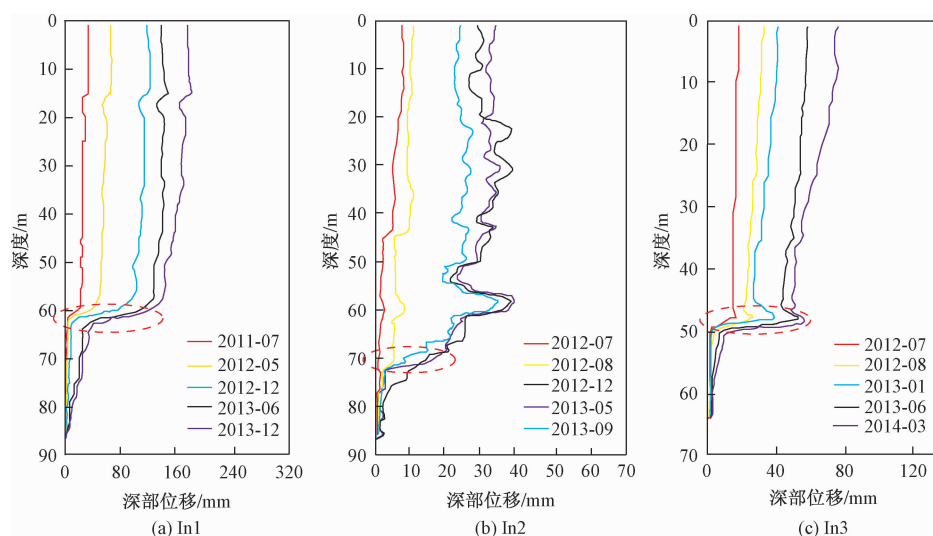


图4 藕塘滑坡深部位移变形曲线

Fig. 4 Curve of subsurface deformation of Outang landslide

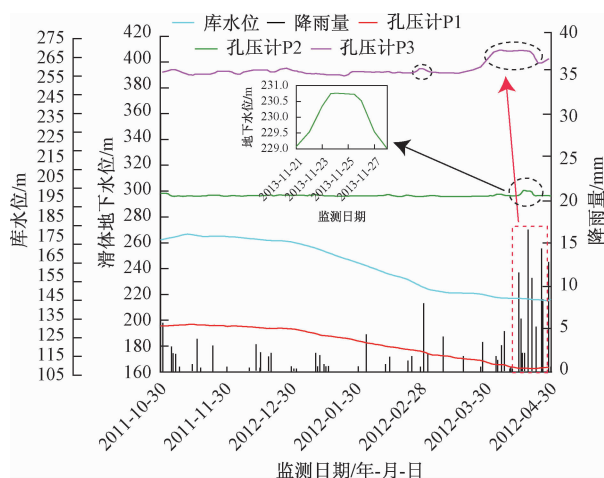


图5 藕塘滑坡地下水位与降雨-库水时间关系曲线

Fig. 5 Curve between groundwater level and rainfall-reservoir water level of Outang landslide

滑坡前缘(P1)地下水位与库水位变化趋势基本一致,降雨对该位置地下水位变化影响不明显;相比之下,滑坡中部(P2)地下水位除2012年4月14日变化幅度较大以外,监测期间基本保持不变,该日降雨量达80.5 mm,引起地下水位产生升高约1.8 m(图5红色虚线标记以及局部放大位置),可以推断滑坡中部地下水位受强降雨影响,但非主要影响因素;滑中后部(P3)地下水位变化规律与降雨量密切相关,特别是2012年4月随着降雨量的增加,地下水位几乎同步增加,随着降雨量的下降,地下水位又迅速下降,水位波动范围为390~414 m。因此可以得出藕塘滑坡不同滑体地下水的主要影响因素不同:一级滑体主要受库水位升降影响;二级滑体地下水位变化与降雨有关,但影响程度较

小;三级滑体地下水位主要影响因素为降雨。

### 3 水文影响因素分析

为进一步阐述影响滑坡变形的主要水文因素,本文选取三个代表性GPS测点(每级滑体一个测点),并对三个完整水文年(2013年10月—2016年9月)内的变形曲线进行详细分析(图6),可以看出在同一个位移陡增阶段内(灰色矩形框),测点的位置变化会影响其快速变形的终止时刻(红色圆点)。

一般而言,同一位移陡增段内,测点所在位置的海拔越高,其快速变形的终止时刻会逐渐延迟。三级滑体与一级滑体的变形滞后时间约为1个月(图6蓝色区域所示),并且蓝色区域往往与库水上升和降雨时期重叠。综合地表位移监测数据结果(图3、图6)可以推断,库水位下降是导致滑坡下部快速变形的主要原因,而强降雨是诱发滑坡中上部高海拔区域变形的主要因素。

### 4 数值模拟

#### 4.1 数值模型的建立

根据地表监测数据分析可知影响滑坡变形的主要水文因素为降雨和库水,且降雨主要影响区域为滑坡的中上部,库水主要影响滑坡下部。为进一步揭示其复活机理,本文采用数值模拟软件GEO-STUDIO,对滑坡在初始状态175 m水位工况下、整水文年(2011年10月—2012年10月)库水位升降过程工况下和整水文年(2011年10月—2012年10月)库水-降雨耦合工况下进行数值计算,通过分析几种工况下边坡的渗

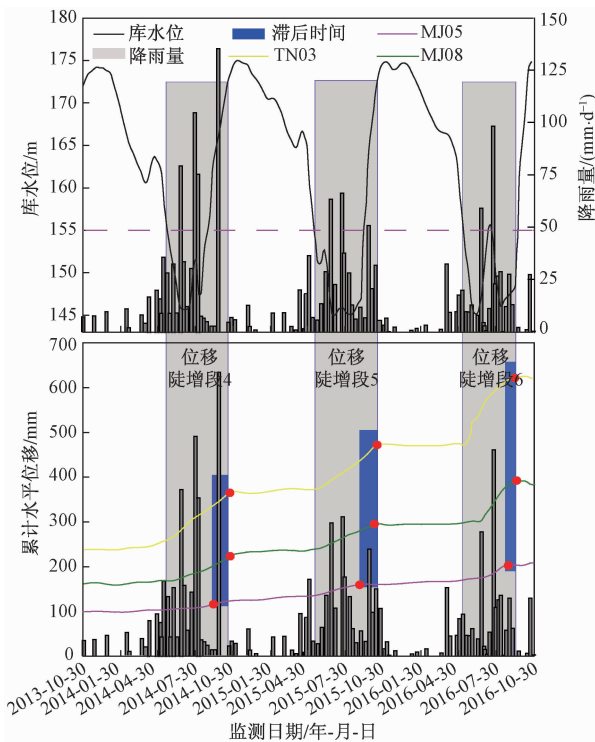


图 6 各级滑体库水位、降雨以及累计水平位移时间序列  
Fig. 6 Time series of the reservoir water level, rainfall and cumulative horizontal displacement within all slide masses

流场、稳定性变化进一步确定滑坡变形主要控制因素,并揭示其复活机理。本文以藕塘滑坡 A-A' 剖面作为研究对象建立数值模型(图 7),采用四边形、三角形混合单元对模型进行划分<sup>[19]</sup>,共分为 2 425 个节点,2 377 个单元,并根据地质勘察资料分析得滑体、滑动带以及基岩物理力学参数,详见表 1。

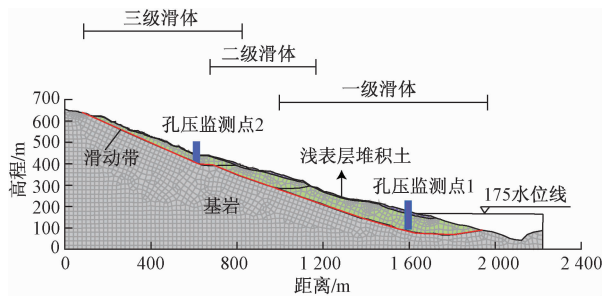


图 7 藕塘滑坡数值模型  
Fig. 7 Numerical model of Outang landslide

取一个完整水文年为研究时段(2011 年 10 月—2012 年 10 月),该研究时段内库水位先从 175 m 下降至 145 m,故将 175 m 水面以上设置为单位流量边界条件,175 ~ 145 m 为变水头边界,145 m 以下为定水头边界。由于基岩多为灰岩,渗透系数较低,故将滑带与基岩接触面设置为不透水层边界。经过实际监测数据以及物

理力学参数对滑坡地下水位初始边界条件反演,最终模型前缘以 175 m 水位为初始水位,后缘以 625 m 地下水位为初始地下水位边界条件,模型底部和右侧设置为零流量边界,在该状态下进行稳态计算得出初始渗流场。

表 1 数值模型物理参数  
Table 1 Physical parameters of numerical model

| 编号 | 材料介质         | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 内摩擦<br>力/ $\text{kPa}$ | 内摩擦<br>角/ $(^\circ)$ | 饱和体积<br>含水量/% | 渗透系数/<br>( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
|----|--------------|--------------------------------------------|------------------------|----------------------|---------------|---------------------------------------------|
| 1  | 粉质黏土<br>夹碎块石 | 20.6                                       | 16.5                   | 14.7                 | 32.0          | 1.060                                       |
| 2  | 碎裂岩体         | 26.4                                       | 70.0                   | 16.5                 | 28.3          | 0.290                                       |
| 3  | 滑动带          | 22.0                                       | 8.0                    | 16.8                 | 32.2          | 0.080                                       |
| 4  | 基岩           | 27.6                                       | 700.0                  | 42.0                 | 0.50          | 0.001                                       |

#### 4.2 地下水位及孔隙水压力

通过数值模拟方法获得藕塘滑坡 175 m、145 m 库水位工况下总水头压力分布图(图 8)。对比分析图 8 与图 5 得出滑坡实际地下水监测数据与滑体各区域总水头压力数值模拟结果基本一致,库区高水位(175 m)运行期间滑坡区降雨量小,由于滑体渗透系数相对基岩较大,因此滑体区域地下水位较同一水平距离基岩地下水位高。库区在低水位(145 m)运行期间,随着降雨量增加(图 3a)以及雨水入渗,导致滑体浅表层地下水位升高,总水头压力增大。

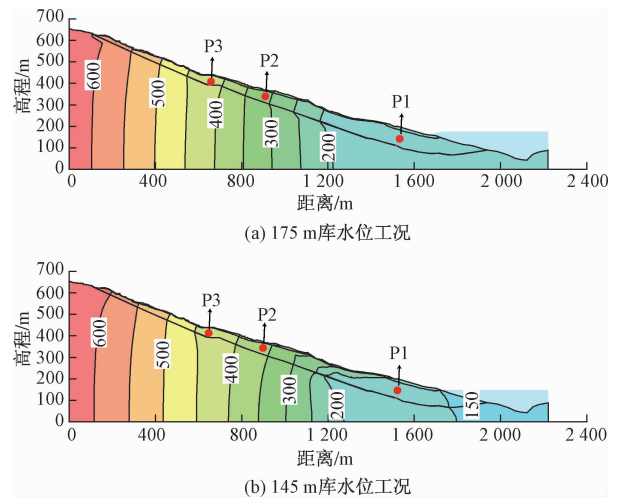


图 8 藕塘滑坡地下水位分布图  
Fig. 8 Underground water level of the Outang landslide  
注:P1、P2、P3 分别对应图 1 中地下水位监测系统位置

#### 4.3 孔隙水压力分析

图 9 为藕塘滑坡在库水位升降单一工况下以及二者耦合作用下各区域孔隙水压力-时间数值模拟曲线,可以看出:在库水位升降单一工况下,滑坡下部与中上部区域孔隙水压力变化规律均与库水位变化规律基本一致,随着水位的下降,滑体内孔隙水压力逐渐减

小,且孔隙水压力变化速度与库水位升降速度呈正相关;在库水、降雨耦合作用下,滑坡下部区域孔隙水压力变化规律与库水升降单一工况下相似,受降雨影响较小;但如图9(b)紫色虚线框内所示,滑坡中上部区域孔隙水压力明显受降雨条件影响,随着降雨量的增加滑坡中上部孔隙水压力明显增加,且暴雨期间滑坡中上部孔隙水压力呈陡增趋势。

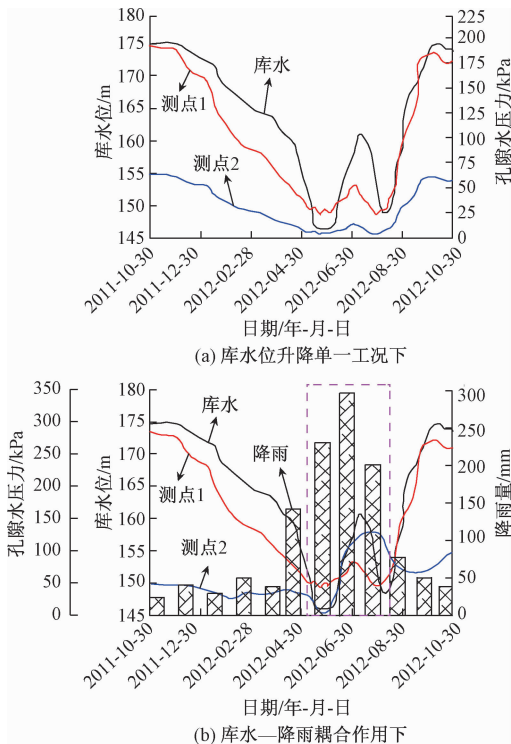


图9 藕塘滑坡孔隙水压力-时间关系曲线  
Fig. 9 Curves of pore water pressure with time of the Outang landslide

由图10(a)、(b)对比得出:库水位由175 m降至145 m过程中,滑坡体内浸润线随库水下降而降低,水位下降使滑坡体内外水头差增大,坡体内孔隙水通过裂隙排出,最终导致滑坡体内孔隙水压力减小。坡体内孔隙水排出过程中,坡体内部产生向外的渗流力,对滑坡体形成推动作用;此外,孔隙水排出会带出溶解在水中的各种矿物质,造成坡体内部产生变形空间,进一步加剧边坡变形。

图10(b)、(c)为同时期库水位单一工况以及库水、降雨耦合作用下的孔隙水压力变化规律,对比两种工况,随着降雨量增加滑坡中上部浸润线明显抬升,后缘孔隙水压力增大,导致滑坡变形加剧,但滑坡下部在库水-降雨耦合作用下,孔隙水压力较同时期库水位升降单一工况下计算结果没有发生明显变化。综合分析可以推断出,藕塘滑坡中上部区域变形主要受降雨

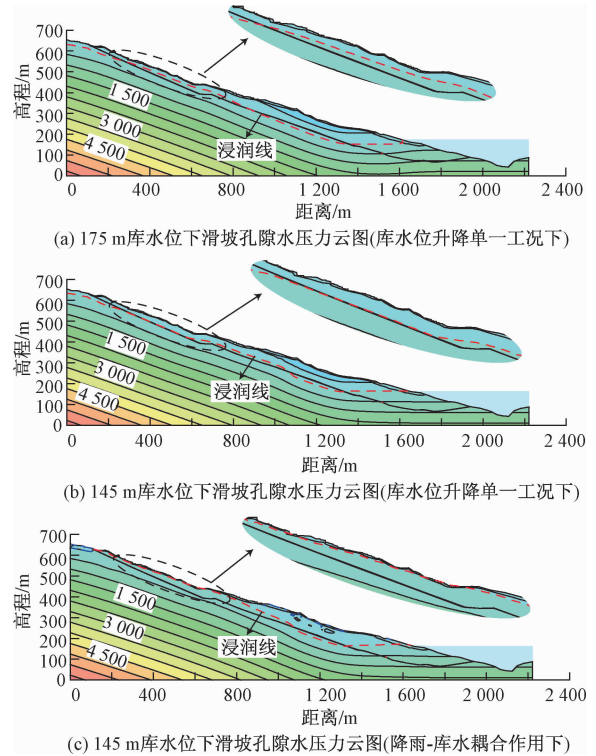


图10 各工况下滑坡孔隙水压力云图  
Fig. 10 Pore water pressure of the Outang landslide under various operating condition

影响,下部区域变形主要影响因素为库水位升降。

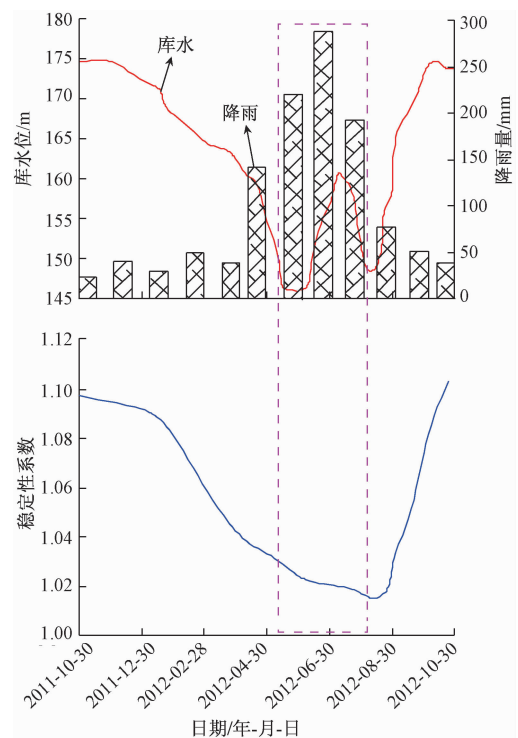


图11 藕塘滑坡稳定性系数变化曲线  
Fig. 11 Safety factor curve of the Outang landslide

#### 4.4 稳定性演化

藕塘滑坡在库水-降雨耦合作用下的稳定性系数变化如图 11 所示。2011 年 10 月—2012 年 4 月,研究区域库水位呈下降趋势,该监测时段内库水位下降速基本维持在  $0.1 \sim 0.5 \text{ m/d}$ ,可以发现在库水下降阶段,边坡的稳定性系数从最开始的缓慢下降过渡至快速下降。产生这种现象的原因,一方面是由于外部水位快速下降,坡内孔隙水不能及时排出,造成滑体内、外部较大的孔隙水压力差,在坡体内部形成了较大的推动力;另一方面是在滑坡体内部孔隙水排出过程中,岩层间软弱夹层物质被带出,内部产生了大量变形空间,致使边坡稳定性急剧下降。为了迎接汛期,即 5—9 月(图 11 中的紫色虚线框),该时段内库区水位基本保持在  $145 \sim 160 \text{ m}$  范围内波动,并且边坡的稳定性系数也在缓慢下降。这是因为边坡处于低水位状态下,由于汛期降雨量丰富,坡体内的孔隙水压力会上升(图 9b),从而使得边坡内部产生向外的推力,导致稳定性下降。9—10 月研究区域降雨量下降,库区水位开始上涨,上涨速度基本维持在  $0.25 \sim 0.50 \text{ m/d}$ ,边坡稳定系数也随之增大。

综合分析一个完整水文年监测数据以及数值模拟计算结果可得出,滑坡稳定性系数变化范围为  $1.02 \sim 1.10$ 。因此,由 seep 模块与 slope 模块耦合分析得藕塘滑坡整体稳定性主要受库水位变化和降雨的影响,且库水位下降速度对滑坡稳定性有直接关系,水位下降速度越快,滑坡稳定性越差。此外,降雨也会使得滑坡稳定性下降。

#### 5 结论及建议

(1) 深部监测数据分析表明藕塘滑坡的深部位移随着深度增加基本保持不变,但均在不同位置出现了位移突变现象,且位移突变的位置与地质勘查发现的软弱岩层的深度相一致,这进一步说明了各次级滑体均沿软弱层滑动。

(2) 长期地表监测数据表明藕塘滑坡变形在时间上表现出具有阶跃状迭代变形特点,在空间上其变形速度随高程的增加而增大。滑坡变形主要受降雨以及库水位二者共同影响,其中靠近库区的一级滑体区域变形主要控制因素为库水位变化,二级至三级滑体区域变形主要控制因素为降雨。

(3) 数值模拟再一次说明了库水位升降和降雨是藕塘滑坡的边坡稳定性系数主要影响因素。库水位快速下降阶段,边坡的稳定性也急剧下降,此外降雨在一

定程度上增加了边坡内部孔隙水压力,进而降低边坡的稳定性。

基于上述认识,认为藕塘滑坡复活的主要外部因素为降雨和库水波动:一方面库水波动使得消落带附近岩体结构松散,出现局部崩塌等现象;另一方面降雨入渗增加滑体下滑力并弱化滑面的抗滑力。在二者长期共同作用下滑坡的稳定性逐年下降。因此针对此类库区古滑坡,可以尝试在消落带附近进行护坡从而减少库水波动的影响(如砌石护坡等),坡体中部进行排水(如排水洞等)进而弱化降雨入渗的影响。此外还可通过在坡体中前部布设抗滑桩增加滑面抗滑力,进而达到提高滑坡稳定性的效果。

#### 参考文献:

- [1] 傅鹏辉. 库水位下降条件下滑坡稳定性及动力增载位移响应规律研究——以三峡库区典型堆积层滑坡为例[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018. [FU P H. The displacement response ratio of dynamic increment of landslide under the condition of reservoir water level drop: Taking typical debris landslide in Three Gorges Reservoir area as an example[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese)]
- [2] 闵弘, 谭国焕, 戴福初, 等. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测——以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3721—3726. [MIN H, TAN G H, DAI F C, et al. Hydrodynamic monitoring of a preexisting landslide during reservoir filling—case history of Xietan landslide, the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3721—3726. (in Chinese)]
- [3] 简文星, 许强, 童龙云, 等. 三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3527—3533. [JIAN W X, XU Q, TONG Y L, et al. Rainfall infiltration model of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3527—3533. (in Chinese)]
- [4] 张开鹏, 刘新喜. 降雨入渗对三峡库区堆积层滑坡稳定性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(6): 4—8. [ZHANG K P, LIU X X. Effects of rainfall infiltration landslide stability of accumulation horizon at Three Gorges Reservoir area[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(6): 4—8. (in Chinese)]
- [5] JIAN W, WANG Z, YIN K. Mechanism of the Anlesi landslide in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Engineering Geology, 2009, 108(1/2): 86—95.

- [ 6 ] 缪海波,殷坤龙,李远耀,等. 近水平地层滑坡平面失稳模型与破坏判据研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 69-74. [ MIAO H B, YIN K L, LI Y Y, *et al.* Study on plane instability model and failure criterion of horizontal-strata landslide [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(1): 69-74. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 简文星,殷坤龙,罗冲,等. 三峡库区万州安乐寺滑坡滑带特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2008, 33(5):672-678. [ JIAN W X, YIN K L, LUO C, *et al.* Slip zone characteristics of Anlesi Landslide in Wanzhou of Three Gorges Reservoir Area[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(5):672-678. (in Chinese) ]
- [ 8 ] TANG H, LI C, HU X, *et al.* Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on in situ tunneling and monitoring[J]. Landslides, 2015, 12(3):511-521.
- [ 9 ] 刘清秉,王顺,夏冬生,等. 残余强度状态下原状滑带土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1305-1313. [ LIU Q B, WANG S, XIA D S, *et al.* Experimental study of residual-state creep behavior of intact sliding-zone soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5):1305-1313. (in Chinese) ]
- [ 10 ] GU D M, HUANG D, YANG W D, *et al.* Understanding the triggering mechanism and possible kinematic evolution of a reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. Landslides, 2017(10):1-15.
- [ 11 ] HUANG D, GU D M, SONG Y X, *et al.* Towards a complete understanding of the triggering mechanism of a large reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. Engineering Geology, 2018, 238:36-51.
- [ 12 ] YIN Y P, HUANG B, WANG W P, *et al.* Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5):577-595.
- [ 13 ] 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6):145-153. [ DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J, *et al.* Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6):145-153. (in Chinese) ]
- [ 14 ] 胡致远,王伟,罗贤敏. 库水与降雨联合作用下藕塘滑坡稳定性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 151-155. [ HU Z Y, WANG W, LUO X M, *et al.* Study on the landslide stability of Outang under the combined action of reservoir water level fluctuation and rainfall[J]. Yellow River, 2017, 39(7):151-155. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 肖婷,殷坤龙. 杨背背. 三峡库区四方碑滑坡稳定性与变形趋势预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1):10-14. [ XIAO T, YIN K L, YANG B B. Stability and deformation trend prediction of the Sifangbei landslide in the Three Gorges Reservoir [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1):10-14. (in Chinese) ]
- [ 16 ] 周云涛,陈洪凯,张勇,等. 超孔隙水压诱发特大型近水平崩坡积层滑坡破坏研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5):732-740. [ ZHOU Y T, CHEN H K, ZHANG Y, *et al.* Failure of super-huge landslide in collapsed debris deposits with nearly horizontal sliding surface induced by excess pore pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5):732-740. (in Chinese) ]
- [ 17 ] 曾耀. 水库库岸老滑坡复活过程中地下水作用机制研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2010. [ ZENG Y. Research on the mechanism of ground water in reactivating of old landslides on reservoir bank [ D ]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2010. (in Chinese) ]
- [ 18 ] 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等. 三峡库区藕塘滑坡变形失稳机制研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 44-55. [ DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J, *et al.* Deformation and failure mechanism of Outang landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1):44-55. (in Chinese) ]
- [ 19 ] 黄达,顾东明,陈智强,等. 三峡库区塔坪 H2 古滑坡台阶状复活变形的库水-降雨耦合作用机制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12):2203-2211. [ HUANG D, GU D M, CHEN Z Q, *et al.* Hybrid effects of rainfall and reservoir level fluctuation on the old Taping H2 landslide in the Wushang County, Three Gorges Reservoir [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12):2203-2211. (in Chinese) ]