

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0688

库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征 模型试验研究

肖捷夫¹, 李云安¹, 胡 勇^{1,2}, 张 申¹, 蔡浚明¹

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 文华学院 城建学部, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 库岸古滑坡复活是水库蓄水运行面临的一个十分突出的地质灾害问题。为研究库岸古滑坡的变形特征与失稳机制, 以具有典型多期次滑动特征的藕塘滑坡为对象, 概化制作了大型物理试验模型, 分别模拟库水涨落和降雨工况, 以及两者联合作用的工况, 通过试验获得了坡体位移、孔隙水压力和土压力全时程曲线以及滑坡演化数字影像资料。试验结果及分析研究表明: 组成滑坡的 3 个次级滑坡在库水涨落和降雨作用下呈现出不同的变形特征, 库水涨落引起的变形主要集中在第一期次滑坡, 水位快速上涨对第一期次滑坡坡体稳定性影响不明显, 但水位骤降会诱发第一期次滑坡坡脚局部牵引式崩滑; 强降雨会引起第一期次滑坡坡脚垮塌, 第二、三期次滑坡体受强降雨作用稳定性下降明显; 水位快速下降和强降雨叠加条件下, 坡体失稳模式为第一期次滑坡坡脚局部崩滑和/或第三期次滑坡滑移。本模型试验测试数据与滑坡现场监测数据对比分析反映相吻合的坡体变形特征和失稳滑坡趋势, 本试验研究所揭示的库岸古滑坡在库水涨落和降雨条件下的变形特征及失稳机制对开展类似滑坡研究和防治提供了参考依据。

关 键 词: 库岸古滑坡; 物理模型试验; 库水涨落; 降雨; 变形演化

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)02-0471-10

Model tests on deformation characteristics of ancient bank landslide under water level fluctuation and rainfall

XIAO Jie-fu¹, LI Yun-an¹, HU Yong^{1,2}, ZHANG Shen¹, CAI Jun-ming¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Department of Civil Engineering, Wenhua College, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The revival of ancient bank landslide is a serious geological hazard in reservoir operation. In order to study the deformation characteristics and instability mechanism of ancient bank landslide, a large-scale physical test model was designed based on Outang landslide which is a typical multi-phase ancient bank landslide. By simulating the fluctuation of reservoir water, rainfall and their combination, the curves of pore water pressure and earth pressure with time and digital image data of landslide evolution were obtained. Results indicate that the three-phase sliding masses that compose the landslides have different deformation characteristics under the reservoir water level fluctuation and rainfall. The deformation due to the fluctuation of reservoir water is mainly concentrated in the first phase sliding mass. The rapid rise of the water level has no obvious effect on the first phase sliding mass. But the rapid decrease of water level induces a local retrogressive sliding at the toe of first phase sliding mass. Heavy rainfall causes a local retrogressive sliding at the toe of the first phase sliding mass, and the stability of the second and third phase landslides decrease obviously. The failure mode under the rapid decline of water level and heavy rainfall is local retrogressive sliding at the toe of the first phase sliding mass or/and sliding of the third phase sliding mass. The experimental phenomena coincide with the deformation characteristics and the developing tendency of actual reservoir landslide. This study provides the deformation characteristics and instability mechanism of the ancient landslide in reservoir bank under the condition of reservoir water level fluctuation and rainfall, which is helpful for the research and prevention of similar landslides.

Keywords: ancient bank landslide; physical model test; water level fluctuation; rainfall; deformation evolution

收稿日期: 2020-05-25

修回日期: 2020-11-13

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (No. 2018YFC0809402); 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC1501301); 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2011CB710602)。

This work was supported by the Key R & D projects of Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (2018YFC0809402), the National Key R & D Project (2017YFC1501301) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB710602).

第一作者简介: 肖捷夫, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体力学特性及失稳机制研究。E-mail: 734361304@qq.com。

通讯作者: 李云安, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: liyunan@cug.edu.cn

1 引言

三峡水库建成运营以来,库区干、支流库岸 700 多处古滑坡复活,严重威胁库区人民生命财产安全^[1-2]。库水位涨落与降雨是诱发库岸古滑坡复活的关键因素^[3],准确把握库岸滑坡在库水位涨落和降雨条件下的变形演化过程和失稳机制十分重要。已有国内外研究主要从现场监测、力学分析、数值模拟与模型试验等对这一重要科学问题进行分析。Xia 等^[4]分析石榴树包库岸滑坡监测数据发现,降雨是浅层滑体变形主控因素,深层滑体稳定性受库水位涨落影响较大。缪海波等^[3]进行滑带土力学试验,从动力学的角度讨论了库岸深层滑坡间歇性复活的机制。Sanz 等^[5]应用数值模拟对古滑坡的失稳进行了回顾性分析。江强强等^[6]通过模型试验获得了黄土坡滑坡临江 I 号崩滑体在降雨、库水位耦合作用下的变形破坏模式。

模型试验能考虑多种外界因素影响,准确反映滑坡内外因素的相互作用,直观呈现滑坡变形破坏全过程,是研究滑坡演化过程和失稳机制的有效手段^[7]。胡修文^[8]、李邵军^[9]、Jia^[10]、He^[11]等通过模型试验,获得了水位涨落致使库岸滑坡变形破坏特征和机制。苗发盛等^[12]通过模型试验分析指出,地下水外渗的动水压力是库岸牵引式滑坡变形破坏的主要诱因。汤明高等^[13]对直线形滑面堆积体滑坡模型进行两次水位升降模拟,揭示了此类库岸滑坡中后部变形逐渐稳定的机制。李松林等^[14]通过模型试验发现浮托减重型滑坡变形主要受库水入渗产生的浮托力影响。Fan 等^[15]研究小汉头复杂滑坡得出了滑坡在水位快速下降作用下的牵引式变形破坏特征。Zhang 等^[16]研制离心机降雨设备进行模拟降雨试验,获得了黏土边坡在降雨条件下的变形规律。Ling^[17]、Yang^[18]等运用模型试验研究滑坡在降雨作用下的变形失稳过程,分析灾变机制。Tohari^[19]、李卓^[20]等同时考虑水位与降雨因素的影响,模拟了滑坡变形破坏过程。陈晓平等^[21]指出古滑坡剖面呈成层性并含软弱滑动面的特点,通过模型试验得到滑坡的变形趋势并模拟得到了坡脚加固能提高边坡稳定性的结论。潘皇宋等^[22]认识到大型古滑坡的滑带和滑体通常不是单一的,通过模型试验研究开挖和降雨对折线型滑面大型古滑坡的影响,得到了分级分块滑动变形破坏特征。

综上所述,现有研究考虑单一外因对库岸滑坡影响的研究较多,而对多外因共同影响下滑坡的变形破坏研究较少;对于单滑坡体、单一滑面的滑坡

研究很多,对具有多个滑体和滑带的滑坡变形演化和失稳机制研究尚需深入。现实中常见一些古滑坡经过多期次滑动形成^[6, 23-24],此类滑坡由多个相互存在力学联系的次级滑坡组成,变形同时受到多个滑面和滑体空间位置和形状的控制,在不同外因影响下不同区域呈现出差异化变形,准确把握滑坡在不同外因影响下的变形演化特征对于滑坡风险防控十分关键。基于此,本文选取三峡库区具有多期次滑动特征的藕塘滑坡为地质原型^[25],概化设计大型物理模型试验,模拟库水位涨落、降雨及两者联合作用,获得了滑坡变形演化全过程以及位移、孔隙水压力和土压力等变化数据,分析并揭示了滑坡在库水位涨落、降雨及两者联合作用下的变形特征、破坏模式和失稳机制,为开展类似古滑坡研究和工程防治提供了参考。

2 滑坡概况

藕塘滑坡位于三峡库区重庆奉节段长江南岸,距下游奉节县城 12 km。滑坡在地质历史时期中经历多级多期次滑动形成,规模巨大。藕塘滑坡平面示意图见图 1。

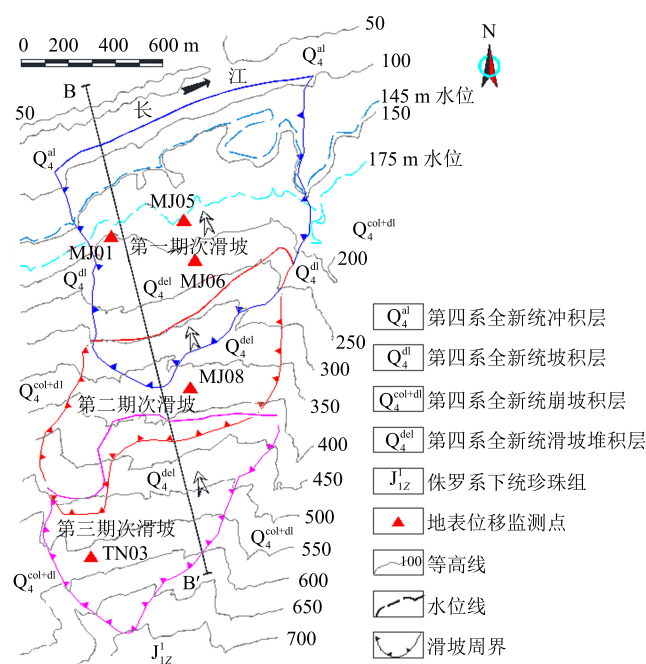


图 1 藕塘滑坡工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plan of Outang landslide

藕塘滑坡整体近南北走向。南北向长度约 2 100 m,东西宽 700~1 000 m,部分前缘区域滑体厚度超过 110 m,总方量 $9\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右。滑坡前缘高程 95 m 左右,部分常年被淹没于库水位以下,后缘高程 705 m。地表平均坡度约 25° ,呈折

线型。滑体主要为第四系滑坡堆积 (Q_4^{del}) 碎石土和碎裂块石夹黏性土, 下伏基岩为侏罗系下统珍珠冲组下段 (J_{1z}) 的砂岩、局部夹炭质页岩或黏土岩。夹层力学性能较差, 遇水后易软化、泥化。

藕塘滑坡由3个期次主滑方向相同的滑坡体组成, 第一、第二、第三期次滑坡分别位于藕塘滑坡的前中部、中部和后部, 滑动方向约 345° 。第一期次滑坡部分常年被水淹没, 滑坡前缘反翘。第二期次滑坡前缘超覆于第三期次滑坡后缘之上, 略反翘, 坡体滑动受阻于第三期次滑坡; 第三期次滑坡前缘近水平略反翘, 前缘超覆于第二期次滑坡后缘之上, 受到第二期次滑坡阻滑。

三峡水库蓄水运营以来, 藕塘滑坡产生较大变形。滑坡累计水平位移监测曲线如图2所示, 其中各监测点在滑坡上的位置如图1所示。

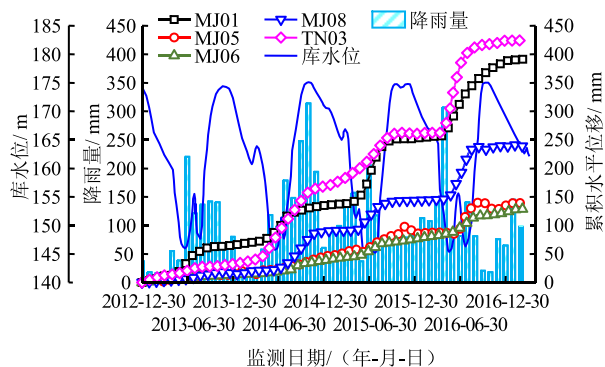


图2 藕塘滑坡累计水平位移与库水位、月降雨量关系曲线

Fig.2 Relationship between cumulative horizontal displacement of Outang landslide and reservoir level with monthly rainfall

位于第三期次滑坡的 TN03 监测点位移量最大, 位于第二期次滑坡的监测点 MJ08 位移量次之, 第一期次滑坡临江处中间监测点 MJ05 和中后部监测点 MJ06 位移量最小, 第一期次滑坡临江处西侧监测点 MJ01 位移明显。滑坡变形主要集中在每年5—9月, 此时段库水位下降并持续保持在低位且降雨量大, 其他时段滑坡变形量较小。此外, 滑坡前缘自三峡水库 156 m 水位运行期间开始出现塌岸, 至今一直向后发展, 库岸已后退超过 5 m。

3 相似模型试验

3.1 模型概化

为了研究库岸多次次古滑坡变形演化过程和失稳机制, 对本文所选研究对象藕塘滑坡的地质结构及其外在环境条件进行概化。选取主滑方向上典型地质剖面(图1中的藕塘滑坡纵剖面 B-B') 建立三

维地质力学试验模型。根据滑坡地质结构特征合理将滑坡模型概化为3层, 从下往上分别代表滑床基岩、滑带(按物理力学性质细分为第一、二期次滑坡滑带和第三期次滑坡滑带)、滑体(按物理力学性质细分为位于下层的滑坡堆积层②和上层的滑坡堆积层①)。环境条件主要为库水位变化和降雨, 以滑坡模型前缘水位边界条件变化和人工降雨来模拟。概化后的滑坡模型如图3所示。

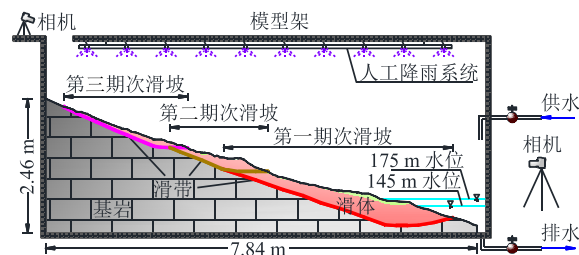


图3 滑坡模型及模型试验系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of landslide model test system

3.2 相似条件与模型材料

根据试验平台尺寸和现场滑坡规模, 确定试验模型相似比 $n = 250$, 模型长 7.84 m, 高 2.46 m, 宽 0.8 m。由相似原理得几何相似比 $C_l = 250$, 各岩土层重度相似比 $C_\rho = 1$, 内摩擦角相似比 $C_\phi = 1$, 泊松比相似比 $C_\mu = 1$, 黏聚力相似比 $C_c = 250$, 变形模量相似比 $C_E = 250$, 渗透系数相似比 $C_k = \sqrt{250}$, 库水位涨落速度相似比 $C_v = \sqrt{250}$, 雨强相似比 $C_q = \sqrt{250}$, 时间相似比 $C_t = \sqrt{250}$ 。

根据相似理论和同类试验研究^[7, 18, 26], 本试验选择碎石(粒径<5 mm)、河沙(粒径<2 mm)、黏土、膨润土、重晶砂、双飞粉为原料混合制作滑体相似材料, 选择滑带土与玻璃珠(1~2 mm)为原料混合制作滑带相似材料, 滑床基岩主要起到支撑基座的作用, 故不做相似材料模拟。碎石、河沙、黏土作为主体骨料, 河沙用于降低黏聚力、增大内摩擦角, 黏土起到增加黏聚力并降低内摩擦角和渗透系数的作用, 膨润土可大幅降低相似材料弹性模量、渗透系数、内摩擦角, 重晶砂调节重度, 双飞粉用于调节黏聚力。

采用均匀试验设计法设计相似材料配比试验, 测定相似材料的物理力学参数, 根据结果分析相似材料中各原料对各参数的影响, 得到初步配比, 在此基础上对配比进行适当调整, 增加试验, 最终获得能实现各参数与目标值接近的相似材料配比。模型各层物理力学参数与材料配比如表1所示。

表 1 试验模型物理力学参数与材料配比
Table 1 Physical and mechanical parameters and components of test model

地层 岩性	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	渗透系数 k /(cm·s ⁻¹)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	
原型值	2.01	1.23×10 ⁻³	25.00	18.5	
滑坡堆 模型值	2.01	8.37×10 ⁻⁵	0.78	18.5	
积层① 相似材料	碎石：河沙：黏土：膨润土：重晶砂：双飞粉：水				
配比	=10：4：3：1：1：1：2				
原型值	2.20	3.36×10 ⁻⁴	27.50	22.0	
滑坡堆 模型值	2.20	2.31×10 ⁻⁵	0.73	22.0	
积层② 相似材料	碎石：河沙：黏土：膨润土：重晶砂：双飞粉：水				
配比	=10：3：1：1：4：1：2				
原型值	2.00	9.26×10 ⁻⁵	15.00	15.5	
第一、二期次滑	模型值	1.97	6.18×10 ⁻⁶	0.17	15.5
坡滑带	相似材料	土：玻璃珠(1~2 mm)：水=28：72：10			
配比					
原型值	2.00	9.26×10 ⁻⁵	21.50	16.0	
第三期 模型值	1.99	6.45×10 ⁻⁶	0.14	16.0	
次滑坡	相似材料	土：玻璃珠(1~2 mm)：水=25：75：10			
滑带	配比				

3.3 模型制作

在模型箱侧壁画出试验模型各部分轮廓,采用砖块砌筑滑床,表面用水泥砂浆抹平后抹以石膏薄层,使滑床表面光滑,同时降低透水性。在模型箱两侧立一排夹板并在侧壁画出试验模型各部分轮廓,然后采用分段分层的方式依次堆筑第一、第二和第三期次滑坡,分层堆筑时采取每层厚度 4 cm 堆

制击实。堆制的模型滑带厚度约 1 cm。堆筑完成后取出夹板并用玻璃珠与砂 1:1 混合物填充空隙,降低试验模型与模型箱侧壁的摩擦力。最后按照所画的模型表面轮廓削去多余的土,得到试验模型。模型堆筑完成后,喷洒少量水雾,静置 24 h。图 4 为制作完成的试验模型照片。

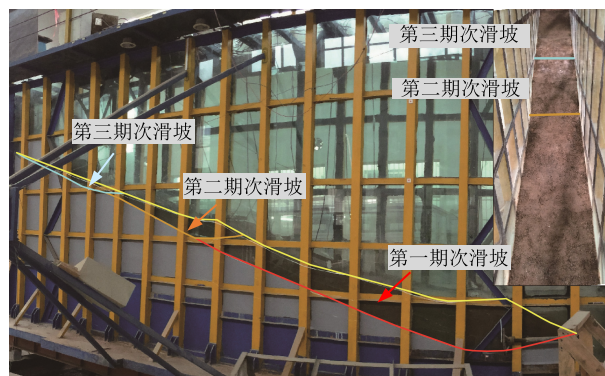


图 4 试验模型侧视图和正视图

Fig.4 Side view and front view of test model

3.4 试验监测方案

在模型上布置 4 个监测面,试验全程实时采集各监测面上的模型表面位移、坡体内部孔隙水压力和土压力数据,4 个监测面和全部监测传感器位置如图 5 所示。

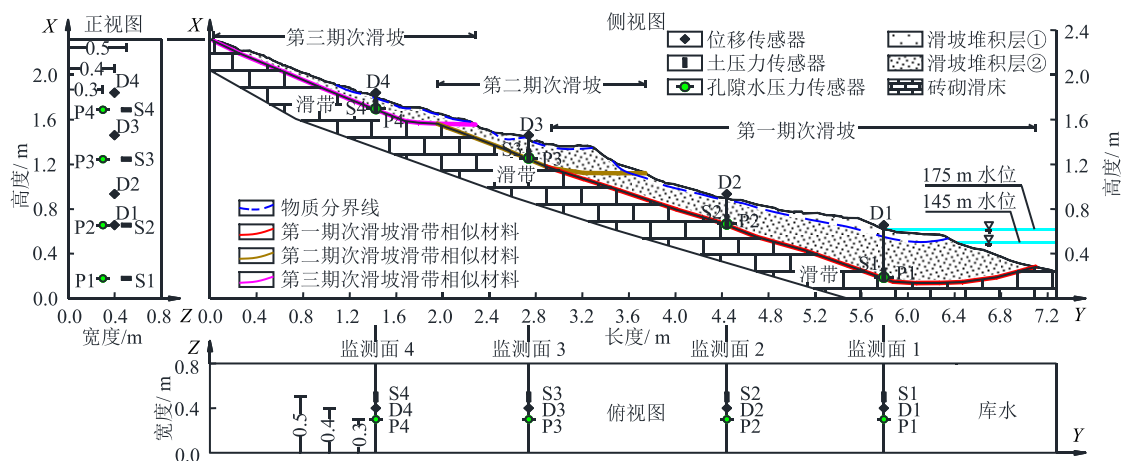


图 5 试验模型监测布置

Fig.5 Monitoring layout of test model

(1) 坡表位移监测: 在各监测面上模型表面布置一个拉线式位移传感器(测量行程 500 mm, 最大拉线速度 1 000 mm/s, 线性精度 $\pm 0.01\%$ F.S., 分辨力无限小), 依据监测面编号依次命名为 D1、D2、D3、D4, 监测模型表面位移的实时变化情况。

(2) 坡体孔隙水压力监测: 在各监测面滑带上方 2 cm 处布置一个孔隙水压力传感器(量程 0~

10 kPa, 精度 $\pm 0.25\%$ F.S.), 依据监测面编号依次命名为 P1、P2、P3、P4, 监测试验模型内孔隙水压力实时变化情况。

(3) 坡体土压力监测: 在各监测面滑带上方 2 cm 处布置一个土压力传感器(量程为 0~50 kPa, 精度 $\pm 0.05\%$ F.S., 土压力传感器竖立埋设), 依据监测面编号依次命名为 S1、S2、S3、S4, 监测试验模型

内水平方向土压力实时数据。

3.5 试验工况

为探究库水位涨落、降雨以及两者联合作用条件下藕塘滑坡变形破坏特征和演化过程,根据滑坡原型所在区域气象和水文资料,选择 3 种条件下可能出现的最不利工况,通过模型相似比换算出对应的条件参数,搭建了 3 个相同的滑坡模型进行试验,试验工况见表 2。

表 2 试验工况
Table 2 Test conditions

工况	降雨	库水位涨落
1	—	145 m 升至 175 m 静止再降至 145 m
2	强降雨	145 m 静止
3	强降雨	175 m 降至 145 m

工况 1: 库水位快速涨落工况。根据三峡库区 2011 年 9 月 1 日至 2014 年 9 月 1 日水位变动数据,库区水位单日最大升幅达 3.21 m,单日最大降幅达 2.79 m^[20],选取 3 m/d 的极限库水位升降速度,试验模拟从 145 m 水位以 3 m/d 涨至 175 m 水位后停留 3 d,再以 3 m/d 降回 145 m 水位。涨落速度 3 m/d 对应模型试验中水位涨落速度为 7.91 mm/h。

工况 2: 强降雨工况。模拟强降雨作用对滑坡的影响。参考所在区域历史上一场罕见的 3 d 强降雨。通过相似比换算试验中降雨雨强为 0.21 mm/h,降雨历时 4.5 h。

工况 3: 库水位快速下降加强降雨联合作用工况。库水位以 3 m/d 从 175 m 降至 145 m 的过程中发生 3 d 强降雨。对应模型试验中库水位下降速度 7.91 mm/h,模拟库水位以 3 m/d 自 175 m 下降至 145 m 的过程时长约 15.167 h (910 min),降雨强度对应试验中雨强 0.21 mm/h,降雨历时 4.5 h (270 min)。试验采取首先让水位下降,下降 310 min 后开始 270 min 的降雨,降雨期间水位继续下降,到 580 min 降雨结束,水位下降至 145 m 水位时试验停止。若在此过程中滑坡模型发生破坏,试验随即停止。

4 试验结果分析

4.1 工况 1: 库水位涨落作用

4.1.1 变形响应特征

水位上涨阶段,模型前缘部分逐渐被水淹没至 175 m 水位,过程中除坡脚观察到有微小开裂外,试验模型总体无明显变形。进入 175 m 水位稳定运行阶段后,观察到坡体内部浸润线逐渐稳定,模型

无明显变形产生。进入水位下降阶段,坡脚处开始产生不连续裂缝,随着水位迅速下降,裂缝扩大并贯通,模型坡脚发生局部崩滑。图 6 为试验结束后试验模型前缘状态照片。

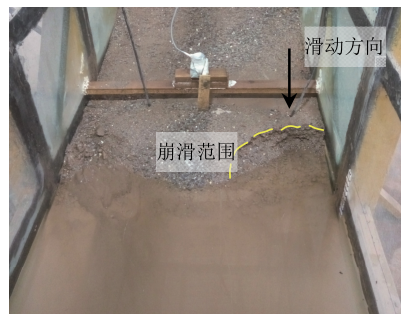


图 6 工况 1 试验模型前缘照片

Fig.6 Front edge photo of test model under working condition 1

试验全过程的模型位移监测数据整理后绘制成曲线见图 7。从监测到的位移数据来看,随着库水位涨落,滑坡模型产生微小位移,位移变化相对水位涨落呈现滞后性,水位下降阶段模型位移明显大于水位上涨阶段,位于试验模型前中部的第一期次滑坡在库水位涨落作用下的位移明显大于位于中部的第二期次滑坡和后部的第三期次滑坡,呈现牵引式特征。试验模型在库水位稳定运行阶段无明显位移。

4.1.2 应力响应特征

试验全过程的坡体孔隙水压力和土压力监测数据整理后绘制成曲线见图 7。试验数据表明库水位涨落对试验模型内孔隙水压力和土压力的影响主要在第一期次滑坡范围,孔隙水压力测点 P1 和土压力测点 S1 的测读数值与库水位呈现出相应的正相关特征。第二和第三期次滑坡在库水位涨落作用下孔隙水压力和土压力几乎没有变化,仅库水位下降过程中,土压力测点 S3 与 S4 的监测值随之有微小的下降。这是由于第一期次滑坡变形改变了第二期次滑坡前缘阻滑条件,第二期次滑坡产生变形,导致第三期次滑坡前缘阻滑条件也发生改变所致。对于库水位变化的响应,孔隙水压力与土压力的变化存在滞后的现象。出现这种特征的原因是:当库水位上涨时,库水向坡体内渗入,传感器处水柱高度上升,测值随之增大;水位下降过程中,坡内地下水向外渗出,传感器处水柱高度下降,测值随之减小。水的渗透过程需要一定的时间,所以表现出滞后变化的现象。同时,试验观察到库水位变化过程中,测点 P1 和 S1 的读数达到稳定值的时间略快于测点 P2 和 S2,这是渗流路径更长所致。试验 18 h

时各监测点孔隙水压力与土压力值如表 3 所示。

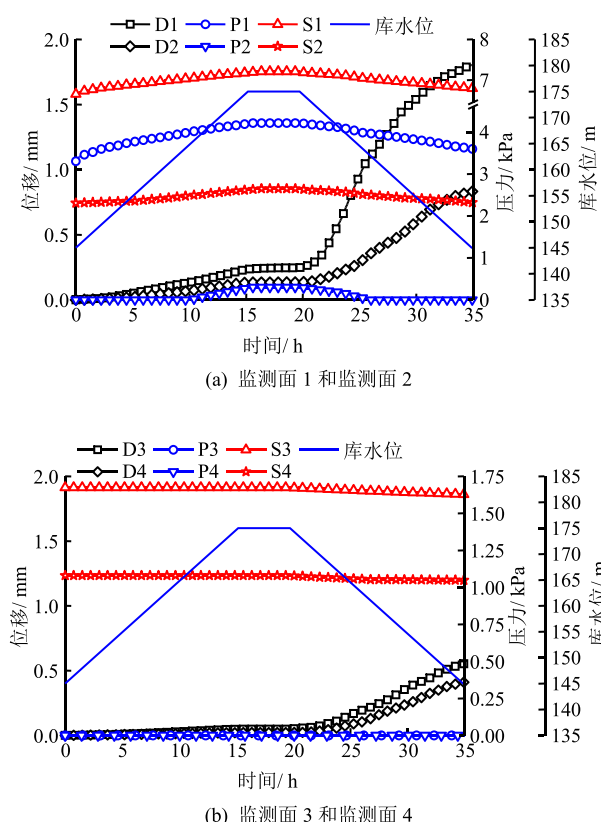


图 7 不同监测面监测结果曲线

Fig.7 Monitoring curves at different sections

表 3 各监测点相应时间应力值列表

Table 3 Measured pressure and corresponding time at monitoring points

18 h 时孔隙水压力/ kPa				18 h 时土压力/ kPa			
P1	P2	P3	P4	S1	S2	S3	S4
4.211	0.299	0.000	0.000	7.208	2.648	1.674	1.080

4.1.3 变形机制分析

库水位涨落调节使得滑坡前缘被周期性淹没，岩土体被浸泡软化，水的浮托力以及向坡体的渗入和渗出改变了滑坡前缘的应力条件。在库水位上涨阶段，被淹没的岩土体受浮托力作用自重降低，水的浸泡致使岩土体软化，滑带抗滑力下降，但库水内渗透形成的指向坡内的渗透压力对前缘稳定起到了加固作用。试验模型的变形响应特征表明，库水位上涨对滑坡的稳定影响较小。175 m 水位稳定阶段，坡体应力场处于稳定状态，无变形和位移产生。库水位下降阶段，地下水对前缘岩土体的软化作用加上坡内地下水补给库水形成的向坡外的动水压力致使坡体前缘稳定性下降，产生拉裂缝并逐渐扩展贯通，出现局部崩滑，呈现出牵引式破坏。试验表明，库水位下降产生的动水压力效应对坡体稳定性

的影响比水位上涨阶段浮托减重效应的影响更为明显。动水压力牵动滑坡产生指向水库的位移，第一期次滑坡变形致使第二期次滑坡阻滑段条件改变，第二期次滑坡稳定性下降，产生变形，导致第三期次滑坡阻滑段条件亦随之变化，产生变形。

4.2 工况 2: 降雨作用

4.2.1 变形响应特征

试验模拟开始降雨约 20 min 后，坡体向外排出灰白色雨水，坡面细颗粒被雨水冲刷带走。随着降雨的持续试验模型坡脚产生数条裂缝，进行至 201 min，模型前缘浅表层局部垮塌。至降雨结束从模型后缘的痕迹推断滑体在降雨期间有蠕滑变形，试验未发生整体变形破坏。图 8 为试验结束后试验模型前缘状态照片。

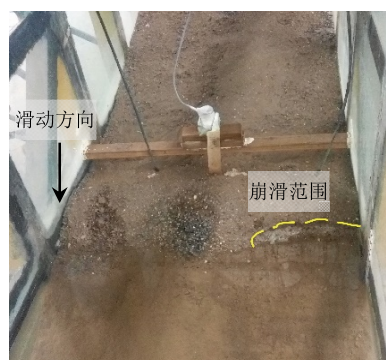


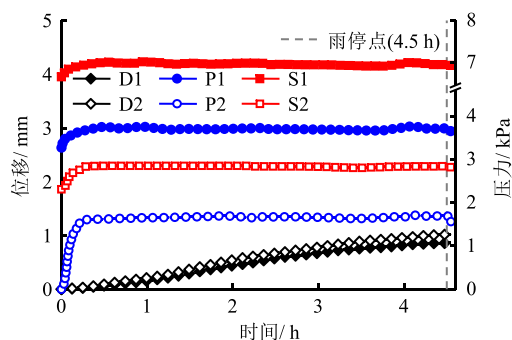
图 8 工况 2 试验模型前缘照片

Fig.8 Front edge photo of test model under working condition 2

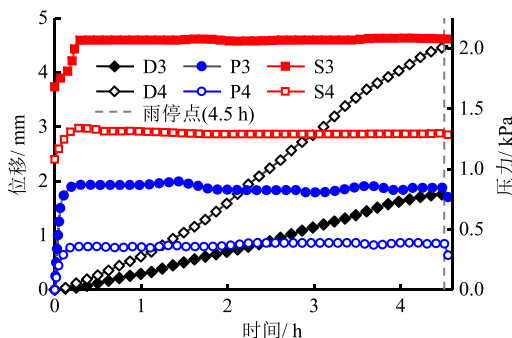
试验全过程的模型位移监测数据整理后绘制成曲线见图 9。从监测到的位移数据来看，随着降雨的进行，试验模型产生微小位移，不同区域在降雨作用下产生的位移不同，总体上模型后部监测点位移大于中部监测点位移大于前部监测点位移。第三期次滑坡区域在降雨作用下产生的位移最大，第一期次滑坡区域受降雨影响产生的位移较小。

4.2.2 应力响应特征

试验应力监测曲线见图 9。开始降雨后，岩土体含水率增加，重度增大，S1~S4 土压力随之上升，达到峰值并趋于稳定。P1~P4 孔隙水压力也随着雨水向模型内部入渗逐渐上升达到峰值。试验模型内不同处所测得的孔隙水压力值大小与传感器位置上覆岩土体厚度大体上呈正相关性，前缘孔隙水压增长速度缓于后缘，表现出一定的滞后性，这是由于坡体入渗的雨水沿滑面向坡前运移形成的。试验 3 h 时各监测点孔隙水压力与土压力值如表 4 所示。



(a) 监测面 1 和监测面 2



(b) 监测面 3 和监测面 4

图 9 不同监测面监测结果曲线

Fig.9 Monitoring curves at different sections

表 4 各监测点相应时间应力值列表

Table 4 Measured pressure and corresponding time at monitoring points

3 h 时孔隙水压力/ kPa				3 h 时土压力/ kPa			
P1	P2	P3	P4	S1	S2	S3	S4
3.687	1.670	0.806	0.388	6.939	2.828	2.068	1.290

4.2.3 变形机制分析

降雨作用改变了整个滑坡体的应力条件,使得坡体自重增加,雨水入渗导致滑坡体处于高水位饱水状态,水的浸泡软化一定程度上降低了岩土体强度,孔隙水压力上升以及渗透力的作用更是进一步降低了滑坡体的稳定性,随着降雨的持续,坡面被冲蚀,坡脚局部在冲刷和浸泡后逐渐被淘空而垮塌。在降雨后自重增加、岩土体软化和地下水渗流的共同影响下,3个期次的滑坡体受到滑体形状、滑带形状以及滑床坡度等因素的影响呈现出不同程度的变形。坡度较陡且前缘阻滑段近水平的第三期次滑坡,对降雨最为敏感,试验模型上的该区域呈现出更大的位移,第二期次滑坡次之,而前缘反翘、部分被库水淹没且阻滑段岩土体深厚的第一期次滑坡对降雨的敏感度最低。

4.3 工况 3: 库水位下降和降雨联合作用

4.3.1 变形响应特征

试验开始,库水位逐渐下降,一段时间后,试

验模型坡脚处产生微小裂缝,至 310 min 降雨开始,模型后部无明显变形。降雨开始后,降雨和库水位下降共同作用,坡脚裂缝增多并不断发展扩大,逐渐贯通,373 min 坡脚处发生局部崩滑。随着降雨的继续,第三期次滑坡前缘区域产生小鼓丘,至 510 min 32 s 第三期次滑坡体沿第三期次滑面发生滑动破坏,试验结束。试验结束后试验模型的变形破坏如图 10 所示。



(a) 模型前缘

(b) 模型后缘

图 10 工况 3 试验模型变形破坏图

Fig.10 Deformation and failure of test model under working condition 3

试验全过程的模型位移监测数据整理后绘制成曲线见图 11。分析位移曲线可知,试验仅有库水位下降作用的前 310 min,试验模型前部的 D1 监测点有微小位移产生,D2、D3、D4 监测点位移不明显。310 min 降雨开始,在降雨和库水位下降同时作用下,试验模型各个部位监测点位移均呈现不同程度的增长。其中 D1 监测点与位于第三期次滑坡区域的 D4 监测点位移增长较快,位移增长最显著的 D4 监测点在一定时间后逐渐进入加速变形阶段,至 510 min 32 s 进入急剧变形阶段,第三期次滑坡滑动破坏。

4.3.2 应力响应特征

试验应力监测曲线见图 11。试验开始后,模型前缘孔隙水压力和土压力随着坡前水位的逐渐消退而减小。至降雨开始时,距离库水更近的监测点 P1、S1 的孔隙水压力和土压力变化值相对于远岸点 P2、S2 更大,位于模型中部的 P3、S3 与后缘的 P4、S4 监测点孔隙水压力和土压力值皆无变化。降雨开始,模型各部位孔隙水压力和土压力随之增长,前部监测点 P1、S1 增长相对较小,说明前部岩土体本已处于较高饱水状态。模型中部和后缘孔隙水压力和土压力监测值在降雨作用下快速上升,增长到一定值后逐渐稳定。随着降雨的持续,位于模型后缘的第三期次滑坡体内微小变形不断累积,502 min 监测点 P4、S4 的孔隙水压力和土压力开始异常增长,

至 510 min32 s 第三期次滑坡发生滑动,孔隙水压力消散,土压力下降,监测点 S3 土压力略微上升,这是由于第三期次滑坡的向前滑动对第二期次滑坡后缘形成加载所致。可见孔隙水压力和土压力的异常变化对滑坡失稳滑动的预警预报有一定的参考作用。

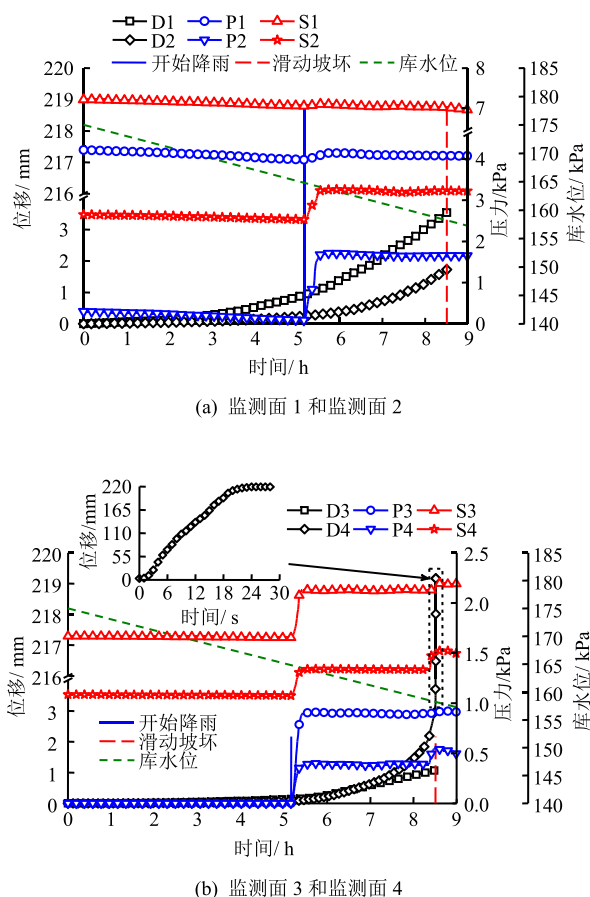


图 11 不同监测面监测结果曲线
Fig.11 Monitoring curves at different sections

4.3.3 变形机制分析

库水位的浸泡使得第一期次滑坡岩土体软化,库水位开始下降后坡内地下水向外渗出形成指向坡外的渗透压力,坡脚产生微小变形,310 min 降雨开始后雨水入渗,滑体内地下水位抬升,孔隙水压力升高,滑坡体重度增加,特别是中后部岩土体含水量增加相当于加载,稳定性进一步下降,坡脚产生局部崩滑。降雨进行一段时间后,滑坡整体在长时间降雨浸泡后软化、变形,随着微小变形的不断累积,第三期次滑坡前缘产生鼓丘,第二期次滑坡的变形导致第三期次滑坡前缘稳定性进一步下降,加之雨水携带大量上部细小颗粒至滑带附近致使消散通道堵塞,雨水汇集形成的水平推力和扬压力最终导致第三期次滑坡失稳,产生滑动。

5 分 析

本次试验模型的变形特征与滑坡现场变形特征及发展趋势有较好的一致性。试验成功地模拟和揭示了滑坡在库水位涨落和降雨条件下的变形发展和失稳过程。

经历多期次滑动形成的古滑坡变形演化受到多个滑面和滑坡体空间位置和形状的控制,不同部位的变形发展和失稳破坏呈现出不同特征。分析试验模型在库水涨落作用下的试验结果可知,滑坡第一期次滑坡区域内地下水受到库水位涨落影响显著,第二、三期次滑坡受库水位涨落影响小,库水位上涨和稳定期间,模型变形较小,变形主要发生在水位下降期间,库水位快速下降会引起坡脚局部崩滑,呈现出牵引式破坏特征。分析试验模型在降雨作用下的响应特征可知,中后部第二、三期次滑坡区域地下水补给主要为降雨入渗,变形主要控制因素为降雨,变形特征表现为沿滑带的蠕滑变形。第一期次滑坡受降雨作用应力场发生变化,产生变形,将测得的应力与变形数据与库水位涨落作用的影响对比,库水位快速下降作用对第一期次滑坡的影响大于强降雨作用的影响大于库水位快速上涨作用的影响。

在水位骤降和强降雨联合作用的极端条件下,试验模型前缘和后缘发生了局部变形破坏,滑坡演化特征表现为局部失稳破坏形式,可见滑坡发生整体沿基岩面滑移破坏的可能性不大。但滑坡前缘的崩滑破坏降低了整体稳定性,后缘的变形滑动对前缘抗滑段形成挤压,相当于后缘加载。考虑到滑坡在库水与降雨长期共同作用下滑坡的稳定性逐年下降,后续研究需考虑水致劣化作用等因素,以实现内外因兼顾对库岸古滑坡变形演化过程的全面研究。

6 结 论

本文研究得到了藕塘多期次古滑坡在库水位涨落和降雨作用下的响应特征与变形机制,主要结论如下:

(1) 库水位涨落作用引起的变形主要集中在第一期次滑坡,第二、三期次滑坡受库水变动影响小。库水位快速上涨作用下第一期次滑体稳定性未受显著影响。库水位快速下降对第一期次滑体稳定影响大,坡脚发生局部牵引式崩滑,即相较于水位上升的浮托减重效应滑坡对水位下降产生的动水压力效应更为敏感。

(2) 强降雨作用对第一期次滑坡坡脚和第三期

次滑坡稳定性影响显著。水的软化作用、坡内雨水的外渗及雨水冲刷是造成第一期次滑坡坡脚失稳的主要原因; 较陡的坡形, 降雨导致自重增加, 水向下渗透产生的下滑力及岩土体的浸水软化是造成第三期次滑坡相较于滑坡整体沿滑面产生了更大蠕滑变形的的主要原因。

(3) 库水位下降是第一期次滑坡变形的主要控制因素, 库水位快速下降作用对第一期次滑坡的影响大于强降雨作用的影响大于库水位快速上涨作用的影响。降雨是第二和第三期次滑坡变形的主要控制因素。

(4) 库水位骤降和强降雨联合作用下坡体失稳模式为第一期次滑坡坡脚局部崩滑和/或第三期次滑坡体滑移。滑坡发生整体沿基岩面滑移破坏的可能性不大。

本试验结果为进一步研究此类滑坡变形破坏特征, 进行针对性的防治提供了科学依据。

参考文献

- [1] YIN Y, HUANG B, WANG W, 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.
- [2] 陈剑, 李晓, 杨志法. 三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J]. **工程地质学报**, 2005, 13(3): 305-309.
CHEN Jian, LI Xiao, YANG Zhi-fa. On the distribution and mechanism of landslides in the three gorges reservoir area[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(3): 305-309.
- [3] 缪海波, 殷坤龙, 王功辉. 库岸深层老滑坡间歇性复活的动力学机制研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(9): 2645-2653.
MIAO Hai-bo, YIN Kun-long, WANG Gong-hui. Dynamic mechanism of intermittent reactivation of deep-seated reservoir ancient landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2645-2653.
- [4] XIA M, REN G M, MA X L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China[J]. **Natural Hazards**, 2013, 68(2): 467-482.
- [5] SANZ D O P, SANZ E, GALINDO R, et al. Retrospective analysis of the Pico del Castillo de Vinuesa large historical landslide (Cordillera Iberica, Spain)[J]. **Landslides**, 2020, 17(6): 200-212.
- [6] 江强强, 焦玉勇, 宋亮, 等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(11): 4361-4370.
- JIANG Qiang-qiang, JIAO Yu-yong, SONG Liang, et al. Model test research on reservoir landslide under rainfall and water level fluctuation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4361-4370.
- [7] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LUO Xian-qi, GE Xiu-ren. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [8] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(12): 2089-2095.
HU Xiu-wen, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area of Three Gorges Reservoir[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2089-2095.
- [9] 李邵军, KNAPPETT J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(8): 1586-1593.
LI Shao-jun, KNAPPETT J A, FENG Xia-ting. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1586-1593.
- [10] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1-2): 92-103.
- [11] HE C, HU X, XU C, et al. Response of a landslide to reservoir impoundment in model tests[J]. **Engineering Geology**, 2018, 247(12): 84-93.
- [12] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等. 水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验[J]. **岩土力学**, 2018, 39(2): 605-613.
MIAO Fa-sheng, WU Yi-ping, XIE Yuan-hua, et al. Centrifugal test on retrogressive landslide influenced by rising and falling reservoir water level[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 605-613.
- [13] 汤明高, 李松林, 许强, 等. 基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(3): 755-764.
TANG Ming-gao, LI Song-lin, XU Qiang, et al. Study on deformation characteristics of reservoir landslide based on centrifugal model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 755-764.

- [14] 李松林, 汤明高, 许强, 等. 库水位上升条件下浮托减重型滑坡离心模型试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 616-622, 634.
- LI Song-lin, TANG Ming-gao, XU Qiang, et al. Centrifugal model tests on buoyancy-induced weight loss landslides influenced by rising reservoir water level[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2020, 41(5): 616-622, 634.
- [15] FAN L, ZHANG G, LI B, et al. Deformation and failure of the Xiaochatou Landslide under rapid drawdown of the reservoir water level based on centrifuge tests[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2017, 76(3): 891-900.
- [16] ZHANG G, QIAN J, WANG R, et al. Centrifuge model test study of rainfall-induced deformation of cohesive soil slopes[J]. **Soils and Foundations**, 2011, 51(2): 297-305.
- [17] LING H, LING H I. Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(9): 1151-1157.
- [18] YANG Y, XING H, YANG X, et al. Experimental study on the dynamic response and stability of bedding rock slopes with weak interlayers under heavy rainfall[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2018, 77(12): 433-448.
- [19] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(5): 575-587.
- [20] 李卓, 何勇军, 盛金保, 等. 降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 452-459.
- LI Zhuo, HE Yong-jun, SHENG Jin-bao, et al. Landslide model for slope of reservoir bank under combined effects of rainfall and reservoir water level[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(3): 452-459.
- [21] 陈晓平, 黄井武, 吴宏伟, 等. 库岸古滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1496-1503.
- CHEN Xiao-ping, HUANG Jing-wu, NG C W W, et al. Centrifugal model tests on ancient bank landslide[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1496-1503.
- [22] 潘皇宋, 李天斌, 仵拨云, 等. 降雨条件下折线型滑面的大型滑坡稳定性离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 696-704.
- PAN Huang-song, LI Tian-bin, WU Bo-yun, et al. Centrifugal model tests on large-scale landslide with broken-line slip surface under rainfall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 696-704.
- [23] 王恭先. 大型复杂滑坡和高边坡变形破坏防治理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- WANG Gong-xian. Deformation and failure control theory and its practice of large complex landslides and high slopes[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [24] 石豫川, 冯文凯, 单治钢. 某多期次巨型滑坡危害程度预测评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 226-232.
- SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai, SHAN Zhi-gang. Hazard assessment of a huge multi-stage sliding landslide[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)**, 2004, 31(3): 226-232.
- [25] 代贞伟. 三峡库区藕塘特大滑坡变形失稳机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- DAI Zhen-wei. Study on the deformation and failure mechanism of Outang large landslide in the Three Gorges Reservoir region, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [26] 周昌, 胡新丽, 徐楚, 等. 三峡库区滑坡消涨带变形破坏模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 252-260.
- ZHOU Chang, HU Xin-li, XU Chu, et al. Model test on deformation and failure of landslide in water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir region[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(2): 252-260.