

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.081



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水位升降速率对库岸滑坡影响的透明土模型试验研究

王煜成¹, 方祥位¹, 王鲁琦¹, 梁皓², 叶颜伟³, 陈超^{1,4}, 熊珮西⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中铁二局第五工程有限公司, 成都 610091; 3. 中铁二局集团有限公司, 成都 610031; 4. 中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司, 重庆 400016)

摘要:三峡库区水位会历经周期性涨落, 库水位升降速率对库岸边坡的稳定性有重要影响。以三峡库区巫山塔坪滑坡为原型, 基于透明土试验技术, 设计了透明土库岸边坡模型试验系统, 包括透明土滑坡模型箱、库水位升降系统和计算机图像采集系统三部分。利用模型试验系统进行不同水位升降速率的模型试验, 利用粒子图像测试技术得到透明土滑坡全断面全过程的变形数据, 分析库岸滑坡在不同水位升降速率下的变形特征和演化规律。结果表明: 库水位上升时滑坡变形由前向后发展, 而库水位下降时滑坡变形由后向前推进, 且库水位下降引起的滑坡体变形更大。库水位升降速率越大, 滑坡内部的动水压力效应和地下水水位滞后效应越明显, 滑坡产生的变形越大, 变形特征越明显。滑坡地表位移变化曲线呈台阶状阶跃上升趋势, 水平位移增长明显高于竖直位移, 库水位升降速率变大会增加库水位不变的间歇期内滑坡位移, 滑坡稳定性变差。

关键词:透明土试验; 库岸滑坡; 水位升降速率; 变形演化

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0121-10

Experimental study on the effect of reservoir water level fluctuation rate on bank landslides with transparent soil model

WANG Yucheng¹, FANG Xiangwei¹, WANG Luqi¹, LIANG Hao², YE Yanwei³,
CHEN Chao^{1,4}, XIONG Peixi⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Railway Erju 5th Engineering Co. LTD., Chengdu 610091, P. R. China; 3. China Railway Erju Group Corporation, Chengdu 610031, P. R. China; 4. CCTEG Chongqing Engineering (Group) Co., LTD., Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: During normal operation of the Three Gorges Reservoir, the water level would experience periodic

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(52308340); 重庆英才创新创业示范团队项目(cstc2024ycjh-bgzxm0012); 中铁二局集团有限公司科研项目(H20241409); 中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司科研项目(H20230317)

作者简介: 王煜成(2000-), 男, 主要从事地质灾害治理研究, E-mail: 202216021219t@stu.cqu.edu.cn。

方祥位(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: fangxiangwei1975@163.com。

Received: 2024-07-29

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52308340); Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Projects (No. cstc2024ycjh-bgzxm0012); Scientific Research Project of China Railway Erju Group Corporation (H20241409); Scientific Research Project of CCTEG Chongqing Engineering (Group) Co., LTD. (H20230317)

Author brief: WANG Yucheng (2000-), main research interests: geohazard assessment and prevention, E-mail: 202216021219t@stu.cqu.edu.cn.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

fluctuations, and the rate of water level rise and fall has a significant impact on the stability of the reservoir slopes. Considering the Wushan Taping H1 landslide in the reservoir area as a prototype, a transparent soil model testing system for reservoir landslides has been designed. This system includes a transparent soil landslide model box, a water level fluctuation system, and a computer image acquisition system. The tests were carried out at different rates of water level rise and fall, and the deformation of the transparent soil slope model was obtained by using the particle image velocimetry technology. The deformation characteristics and evolution pattern of the landslide were analysed. The results indicate that during water level rise, landslide deformation progresses from the front to the rear, while during water level fall, the deformation progresses from back to front, with greater deformation caused by water level fall. As the rate of water level fluctuation increases, the dynamic water pressure effect within the landslide and the groundwater level lag effect become more pronounced, resulting in increased deformation and more evident deformation characteristics of the landslide. The surface displacement variation curve of the landslide shows a step-like progression, with horizontal displacement increasing significantly more than vertical. An increased rate of water level fluctuation results in greater landslide displacement during intervals when the water level remains unchanged, indicating a decrease in stability.

Keywords: transparent soil test; reservoir landslide; rate of water level rise and fall; deformation evolution

库水位升降是影响库区滑坡稳定性的重要因素之一。据统计,日本约有60%的库岸滑坡发生在库水位骤降期间,其余40%则主要发生在库水位上升期间^[1-3]。1961年意大利瓦伊昂水库滑坡^[4]和2003年中国三峡库区千将坪滑坡^[5]都是在水库蓄水期间边坡发生失稳破坏,造成了人员伤亡和财产损失。目前,三峡库区内有4 000多处滑坡、岩崩等灾害,水库运行期的正常水位升降会诱发库区边坡产生变形,不利于其稳定^[6]。因此,研究库岸边坡在水位升降过程中的变形演化对滑坡灾害工程防治具有重要意义。

库水位变动通常会引引起涉水滑坡内部渗流场的变化,进而影响滑坡的稳定性^[7-9]。殷跃平等^[10]利用二维有限元渗流计算耦合强度折减法研究发现,库水位快速下降期间滑坡内部水力梯度显著增大,滑坡安全系数显著降低。Cheng等^[11]通过实地勘测和原位监测发现,白鹤滩库区团地沟滑坡变形与水库水位密切相关,在库水位下降期间,滑坡中产生的动水压力可能会诱发滑坡整体滑移。张强等^[12]基于复杂水位调度下堆积体滑坡离心机模型试验研究发现,在蓄水阶段,滑坡前缘出现局部破坏,水位骤降引起滑坡分级滑动。此外,库水位涨落速率对滑坡变形也有明显影响^[13-14]。Chen等^[15]分析张家祠堂滑坡多年的位移监测数据发现,库水位下降速率过快会加剧滑坡变形,而库水位缓慢下降时滑坡变形相对稳定。陈超等^[16]通过数值模拟考虑多年周期水位涨落下滑坡变形场的演化过程发现,库水位波动速率较大的年份,滑坡变形明显更大,稳定性

更差。

目前针对库水位升降条件下滑坡试验研究的手段主要有框架式滑坡模型试验和离心机模型试验等,但传统试验方法无法对滑坡内部全断面变形进行监测,对库水位升降全过程的滑坡变形演化过程难以进行表征。近年来透明土试验技术逐渐被应用于岩土工程领域。基于透明岩土相似材料的边坡物理模型试验研究具有内部可视化、非侵入性变形测量等优点,可以更深入地阐述边坡失稳破坏过程和变形演化机制^[17-19]。Sui等^[20]研究了不同水位下降速率下透明土边坡的变形失稳过程和滑移破坏范围。Zhou等^[21]以营盘滑坡消落带区域为原型,设计了水位骤降下不同边坡倾角的透明土边坡试验,较详细地对比分析了边坡的变形过程。

当前利用透明土试验技术分析库水位影响边坡稳定性的研究仍以考虑库水位下降过程为主,且研究的边坡模型均较简单,针对库水位升降全过程以及考虑库水位升降速率影响的滑坡透明土模型试验尚未见报道。笔者以三峡库区巫山县塔坪H1滑坡为原型,基于透明土模型试验平台,设计了透明土滑坡模型箱和库水位升降系统,结合粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV),开展不同水位升降速率下透明土滑坡库水位升降模型试验。用熔融石英砂和相应的孔隙流体制备透明土,通过PIV技术对透明土滑体内部全断面变形场进行全过程监测,分析库岸滑坡在不同水位升降速率下的变形特征和演化规律,为库区滑坡的防治提供重要理论依据。

1 透明土模型试验

1.1 滑坡试验原型

试验原型位于三峡库区巫山县曲尺乡长江北岸,距离三峡大坝 148.3 km。H1 滑坡平面形态呈等长型,长 530~580 m,宽 480~530 m,分布面积约 $2.75 \times 10^5 \text{ m}^2$,总体积约 $1.23 \times 10^7 \text{ m}^3$,滑坡平均厚度约 45 m,属于特大型老滑坡,图 1(a)是塔坪 H1 滑坡的平面图。自三峡大坝投入使用以来,受库区周期性水位涨落的影响,H1 滑坡变形加剧,产生复活迹象,滑坡后缘陡坡段多处出现裂缝,部分民房发生墙体开裂;滑坡前部形成强变形区,地坪逐渐开裂下沉,护坡挡墙变形坍塌。在库区水量调控作用下,H1 滑坡对航道运输安全构成巨大威胁,另外,曲尺乡场镇位于 H1 滑坡后缘,滑坡变形活动也是场镇居民生命财产安全的潜在隐患。

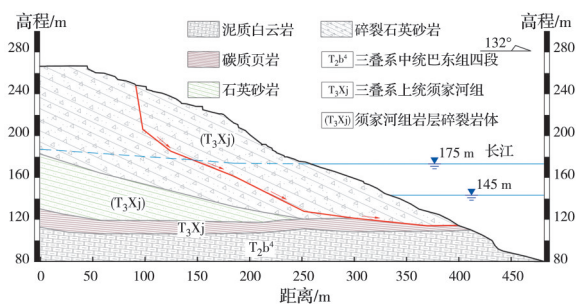
选取 H1 滑坡的典型剖面作为研究对象,研究剖面示意图如图 1(b)所示。滑坡滑体主要为塔坪古滑坡滑动崩解形成的碎裂状石英砂岩,不同地段岩体的破碎程度也不同,总体上后缘完整、前缘破碎,上部较完整、下部较破碎。在部分区段呈块石土状,块石成分为长石石英砂岩及岩屑长石砂岩,土主要为粉质黏土及砂土。滑坡前缘沿基岩上覆界面滑移,中后部沿碎裂岩体破碎带或软弱带滑移,滑动带埋深 30~70 m,主要物质组成为粉质黏土夹碎块石和角砾。滑坡前缘基岩主要为须家河组底部页岩,中后部基岩为须家河组碎裂状石英砂岩,基岩剖面形态呈“凹”字,呈上陡下缓状。

1.2 透明土相似材料

滑坡体破碎程度较大,结构松散,岩体完整性差,且原状土多为粉质黏土及砂土,因此,研究采用砂土模拟滑坡体。已有研究表明^[22-23],在强度、变形模量以及动力学特性等方面,透明砂土的性质与福建标准砂类似,在试验中可用于模拟砂土、粉砂土等,熔融石英砂和标准砂的物理性质如表 1 所示。试验用透明土相似材料由土骨架颗粒和孔隙液体配置而成,土骨架颗粒采用粒径为 1.0~2.0 mm 的高纯度熔融石英砂,孔隙液为正十二烷和 15#白油在室温 20℃条件下按质量比 1:4 混合制备而成的混合矿物油,两者配置而成的透明土试样如图 2 所示^[21, 24]。



(a) 滑坡平面图



(b) 滑坡研究剖面地质图

图 1 巫山县塔坪 H1 滑坡

Fig. 1 Taping H1 landslide in Wushan County

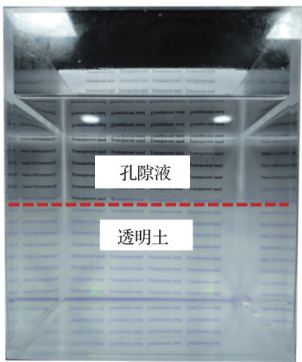


图 2 透明土试样

Fig. 2 Transparent soil specimen

1.3 试验装置系统和试验步骤

试验在重庆大学研制的透明土试验系统平台(TMTS1.0)上开展,其中包括透明土滑坡模型箱和库水位升降系统。另外,该平台附带有竖向液压伺服加载系统以及由激光发射器、CCD 高速工业相机和计算机数字图像采集系统组成的粒子图像测速系统,透明土库岸滑坡模型装置试验平台如图 3 所示。模型箱用亚克力材料制作,长 600 mm、宽

表 1 熔融石英砂物理力学性质^[21]

Table 1 Physical and mechanical properties of fused silica sand^[21]

砂	折射率	比重 G_s	容重 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	渗透系数 $k/(10^{-5} \text{ m/s})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 E/GPa
熔融石英砂	1.458 5	2.18	12.9	6.3	39.5	72
标准砂	0	2.63	17	5.7	43	

300 mm、高 300 mm,箱内按照原型滑坡的几何相似比 1:800 设置滑坡模型,相似参数设置见表 2。滑坡滑体部分主要为透明砂土,基岩部分为透明亚克力材质制成的不动体,内部设置渗流通道以模拟滑坡后部地下水的入渗过程。原型滑坡整体上不存在具有明显厚度贯通的软弱带,因此,将基岩上覆界面视为模型滑坡滑带。另外,亚克力基岩表面光滑,板材交界处进行过抛光打磨,加之环境流体混合矿物油具有润滑作用,可以认为基岩上覆界面是整个模型滑坡的软弱面。库水位升降系统包括蠕动泵、油箱及进出油管道,通过调整蠕动泵流量和进出油管道通闭状态可以模拟不同速率下库水位的升降过程。滑坡模型前缘设滤网,以防止熔融石英砂颗粒堵塞管道,滑坡后部地下水通过升降台上油箱与模型箱的连接管道补充。

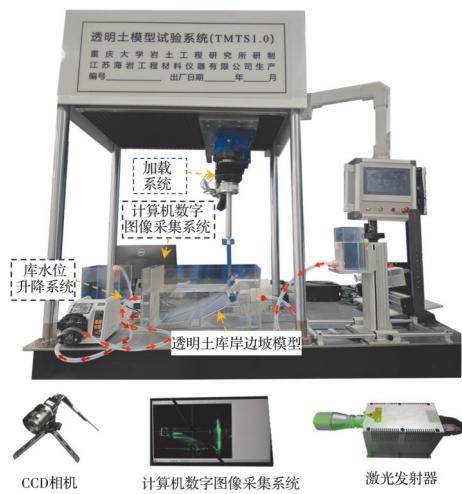


图 3 透明土库岸滑坡模型装置试验平台

Fig. 3 Test platform of the transparent soil reservoir landslide model device

图 4 为透明土库岸滑坡模型试验系统示意图。采用图 4 所示的试验系统进行不同水位升降速率下的透明土库岸滑坡模型试验,试验步骤如下:

1)透明土库岸边坡制作。用孔隙液模拟环境库水,用阿贝折射仪测得的孔隙液和熔融石英砂颗粒的折射率相同,均为 1.458 5,能保证滑坡呈现透明效果。开启蠕动泵输送孔隙液,直至模型箱内水位达到最高,之后利用漏勺盛少量熔融石英砂颗粒,缓慢稳定地将其浸没进模型箱中,并用玻璃棒搅拌漏勺中的残留气泡,同时将熔融石英砂逐渐倾

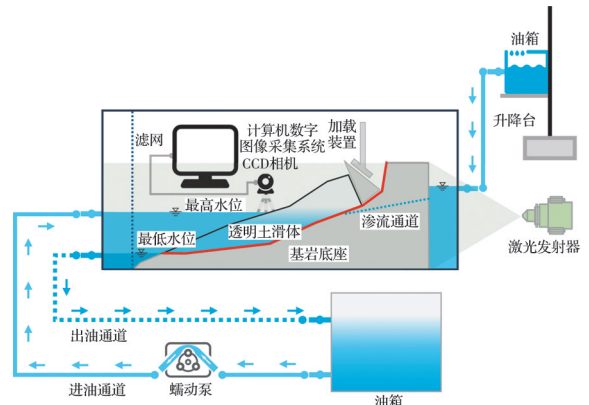


图 4 透明土库岸滑坡模型试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the transparent soil reservoir landslide model test system

倒至模型箱底部,重复上述过程,最后用刮铲平整出既定形状的库岸边坡。

2)库水位升降和滑坡模型加载。从水位上升阶段开始,历经一个升降周期,在试验开始前将水位缓慢降至最低库水位线并静置一段时间。在水位上升时,滑坡顶部加载装置对滑坡施加下滑推力,推力持续到水位升至最高库水位线。随后静置 10 min,使滑坡模型稳定,切换连接模型箱的管道,控制水位下降,同样地,在滑坡顶部施加推力,直至水位降到最低库水位线,试验结束。

3)滑坡散斑图像采集和分析。试验监测采用 PIV 系统,利用激光发射器连续发出宽 1 mm、波长 532 nm 的线激光,在激光照射下,透明土边坡激发出散斑场剖面,如图 5 所示。在计算机图像采集软件控制下,CCD 工业相机以 1 帧/s 的拍摄速率记录试验过程中边坡剖面散斑场的变化,并将数字图像储存至计算机。试验结束后,利用 PIV 软件对滑坡数字图像结果进行处理,得到滑坡模型内部变形信息,用以分析库水位变动过程中滑坡位移场的变化。

1.4 试验方案

库水位波动是诱发滑坡长期变形和稳定性下降的重要因素,为了研究不同水位升降速率下库岸滑坡变形的演化过程,设置 5、10、20 mm/min 三个水位变化速率,考虑 0.05、0.1、0.2 mm/s 的加载速率,以确保不同升降时间下滑坡顶部加载位移相同,具体试验设计工况见表 3。

表 2 透明土滑坡原型和模型相似比参数

Table 2 Parameters of similarity ratio between prototype and model of the transparent soil landslide

塔坪 H1 滑坡	长度/m	宽度/m	高度/m	容重/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
原型	400	240	160	25.2	43.5	35.2
模型	0.5	0.3	0.2	12.9		39.5
相似比	800	800	800	1.95		0.89

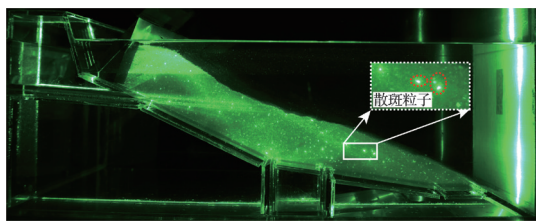


图5 激光激发下的透明土滑坡散斑场

Fig. 5 Scattering field of transparent soil landslide under laser excitation

表3 透明土库岸滑坡试验工况

Table 3 Transparent soil reservoir landslide experimental conditions

工况	升降速率/ (mm/min)	升降时间/ min	加载速率/ (mm/s)
1	5	8	0.05
2	10	4	0.10
3	20	2	0.20

2 试验结果分析

2.1 滑坡变形分析

滑坡的变形可以通过PIVLab计算获得,该软件是Thielicke等^[25]开发的一款开源GUI粒子图像测速分析软件,能用来计算各类粒子图像数据内的速度分布,具有高效的数据采集和数据后处理功能。图6所示为5 mm/min水位变化速率下库水位上升和下降阶段滑坡内部的变形演化云图。水位变动期历时480 s,主要提取出水位变化过程中160、320、480 s三个时刻的滑坡位移累积变化云图。水位上升初期(0~160 s)滑坡后缘因受推载作用呈现整体式缓慢下沉趋势,如图6(a)所示,位移变化约1 mm,而由于库水位上升的影响,滑坡前缘坡面受到扰动,静水压力增大;滑坡地下水得到补充,孔隙水压力增大,滑坡内部应力条件改变,因而坡脚和坡面处变形较为集中,变形量约3~4 mm。160~320 s水位上升期间,在持续施加后缘推力后,滑坡整体发生变形,如图6(b)所示,整体变形接近3 mm,受水位不断上升影响,滑坡坡脚和坡面变形范围逐渐扩大,位移变化也在加剧,最大变形可达10 mm。图6(c)所示为水位升至最高处时的滑坡变形场,可以看出,滑坡整体变形为6~8 mm,滑坡变形集中区变形量为10~16 mm,主要分布在坡脚处、水位变动区坡面处以及基岩上覆交界面渗流通道出口处。

在水位下降阶段,0~160 s滑坡变形如图6(d)所示,滑坡整体变形量约3 mm,相较水位下降同时期有所增大,且主要变形区域呈片状分布,后部变形明显,前部变形较小。图6(e)表明,在水位下降

中期的160~320 s,滑坡变形进一步发展。由于水位下降,滑坡前缘静水压力减小并形成一定临空面,滑坡内部产生由内向外的渗流,在上部推力和内部渗透力共同作用下,滑坡上部变形集中,变形逐渐向库水位变动区发展,变动区内位移量约为9 mm。水位下降到最低处时,水位变动区变形量持

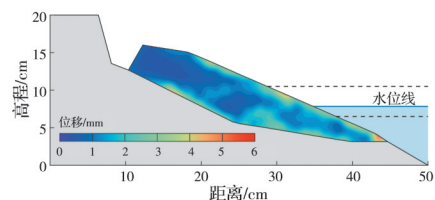
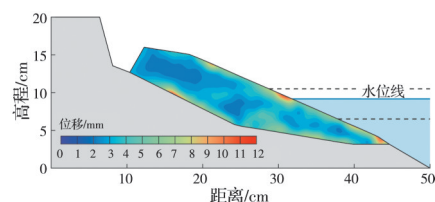
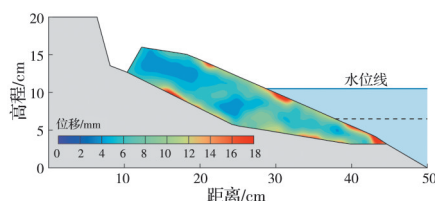
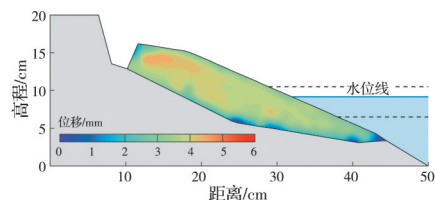
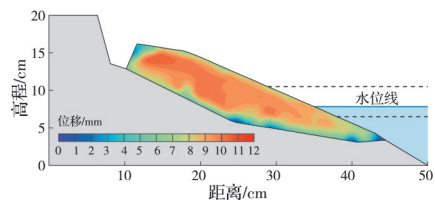
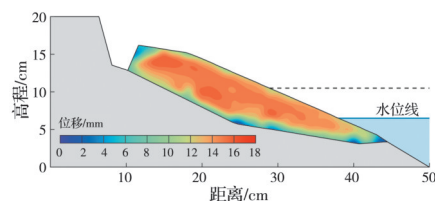
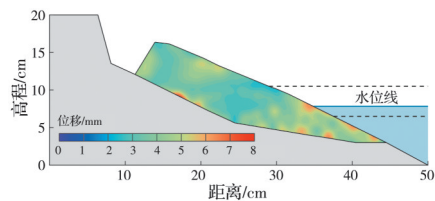
(a) 水位上升 $t=160$ s(b) 水位上升 $t=320$ s(c) 水位上升 $t=480$ s(d) 水位下降 $t=160$ s(e) 水位下降 $t=320$ s(f) 水位下降 $t=480$ s

图6 库水升降速率为5 mm/min时的滑坡变形云图

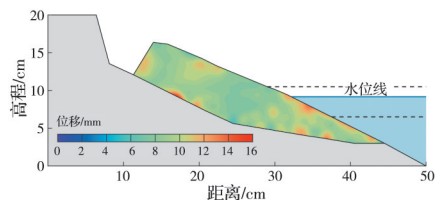
Fig. 6 Landslide deformation contour map at a water level rise and fall rate of 5 mm/min

续增加至14~16 mm,滑坡沿着水位下降方向变形,发展延伸至滑坡最低水位线附近,如图6(f)所示。

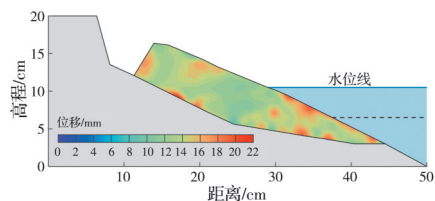
图7所示为10 mm/min水位变化速率下库水位上升和下降阶段滑坡内部的变形演化云图,水位变化时间为240 s,分别对滑坡80、160、240 s三个时刻的累积变化位移云图进行分析说明。图7(a)所示为水位上升至80 s时滑坡被整体向前推移3~4 mm,



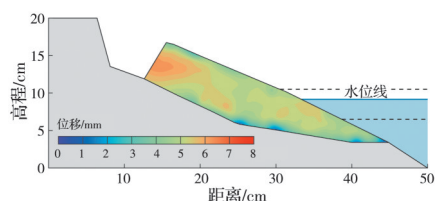
(a) 水位上升 $t=80$ s



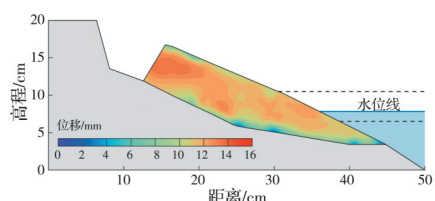
(b) 水位上升 $t=160$ s



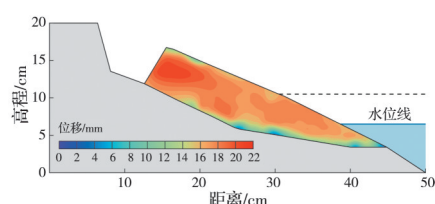
(c) 水位上升 $t=240$ s



(d) 水位下降 $t=80$ s



(e) 水位下降 $t=160$ s



(f) 水位下降 $t=240$ s

图7 库水升降速率为10 mm/min时的滑坡变形云图

Fig. 7 Landslide deformation contour map at a water level rise and fall rate of 10 mm/min

在滑坡前端存在几处位移集中区,位移约5~6 mm,其中与水面相接的滑坡坡面处变形范围最大。这是因为水位快速上升使滑坡体外部库水位短期内高于内部地下水位,产生由外向内的渗透压力,滑坡前缘处发生变形。图7(b)中,随着水位持续上涨,滑坡前缘变形区域也渐进延伸,坡面处变形最大约13 mm,而滑坡整体被推进8 mm左右。此时滑坡中后部有3处位移集中区,主要是受到滑坡后部地下水位补给和滑坡后缘推载力作用的影响。240 s时水位上升至最高点,滑坡整体变形在10 mm左右,此时滑坡前部位移为16~18 mm,滑坡浅层变形有向深部扩展的趋势,位于水位变动区的滑体从局部变形向整体变形破坏发展,如图7(c)所示。

图7(d)所示为水位下降阶段80 s时的滑坡变形云图。变形大致分为两部分,由水位下降引起的前缘变形以及推载作用触发的后缘变形,其中前缘变形是水位下降导致的滑坡内部产生的下滑渗透力间接作用于滑体上,变形较小,约5.5 mm左右。而后缘滑体因直接受到推载力作用,变形较大,约6.5 mm。当水位下降至库水变动区中部,如图7(e)所示,坡体变形进一步增加,前缘变形区域和后缘变形区域相互贯通,但仍然保持滑坡后部变形大,前部变形小的分布趋势,变形量约11~12 mm。图7(f)所示为水位下降至最低处的滑坡变形云图,库水变动区位移量约18 mm,而滑坡上部位移量最大可达21 mm。相较图6(f),滑坡在库水变动区内变形发展更为突出,在水位下降过程中保持沿水位线发展变形的趋势,在最低水位线附近变形加剧。

图8所示为20 mm/min水位变化速率下库水位上升和下降阶段滑坡内部的变形演化云图。水位快速上升初期滑坡变形如图8(a)所示,滑坡变形主要受上部推载力主导,表现为整体下滑趋势,变形量约4 mm,受推力作用方式限制,滑坡上部浅层变形较小,同时,受水位上升扰动影响,库水变动区内局部区域变形略大。图8(b)所示为80 s时滑坡变形云图,滑坡变形整体上保持持续发展趋势,整体变形量约8~10 mm。水位上升至最高处后,如图8(c)所示,水位快速上涨导致滑坡内部形成动水压力以及滑坡表面静水压力,滑坡变形范围扩大的趋势在库水位变动区暂缓。滑坡体上部位移量较大,约16 mm,滑坡体库水位变动区内位移量较小,约13.5 mm。

图8(d)所示为水位下降阶段40 s时滑坡内部变形云图,滑坡后部和前部变形略大,约3.5 mm,滑坡中部变形略小,约3 mm,滑坡整体下滑,但由于水位下降初期滑坡受到坡脚静水压力的支撑作

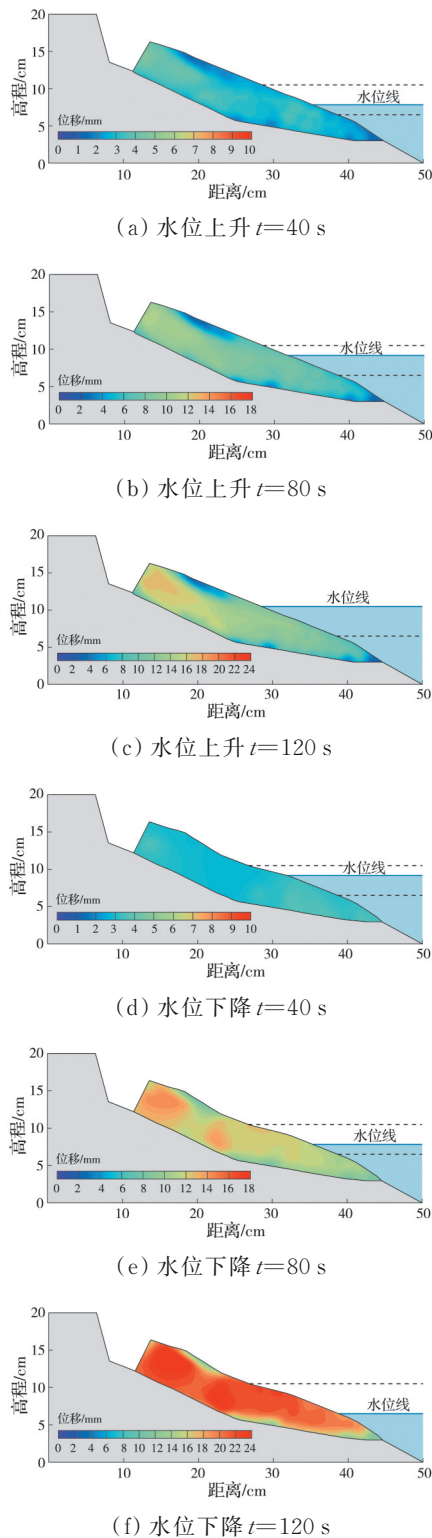


图8 库水升降速率为20 mm/min的滑坡变形云图

Fig. 8 Landslide deformation contour map at a water level rise and fall rate of 20 mm/min

用,滑坡位移变化量整体小于同时期水位上升阶段。图8(e)所示为80 s水位下降时刻的滑坡变形,滑坡后部变形约12.5 mm,水位快速下降牵引滑坡库水变动区产生明显变形,变形量约11 mm。当水位降至最低处时,滑坡变形如图8(f)所示。可以看出,滑坡保持整体下滑趋势,滑坡前缘在渗透力推

动和水位下降牵引共同作用下进一步发生变形破坏,变形量为20~24 mm。

2.2 监测点位移响应分析

为分析整个库水升降过程中滑坡不同区域在各水位变化速率下的变形规律,在透明土滑体上部、库水位变动区以及滑坡前缘处分别布置JC1、JC2和JC3三个监测点,监测点布置位置如图9所示。

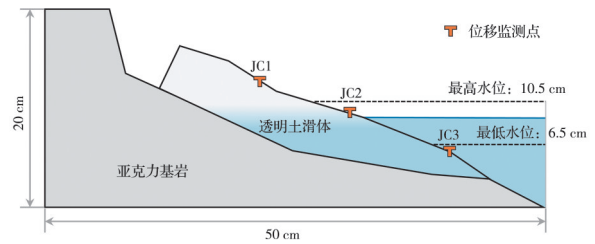


图9 位移监测点布置示意图

Fig. 9 Displacement monitoring points layout schematic

图10所示为各监测点在不同水位升降速率下的地表位移变化曲线,包括水平位移和竖直位移。图10(a)所示为5 mm/min升降速率下3个位移监测点的位移变化曲线图。各监测点水平位移变化区别显著,竖直位移变化相近,其中JC2位移增长最明显,在水位上升期水平位移达到10.91 mm,竖直位移为3.09 mm,水位下降期水平位移增加了12.53 mm,竖直位移为2.16 mm;JC1和JC3的位移变化较接近,JC1在水位上升期水平位移达到4.18 mm,水位下降期水平位移增加了12.64 mm;JC3在水位上升期水平位移达到2.90 mm,水位下降期水平位移增加了11.73 mm。在10 mm/min水位升降速率下,各监测点位移变化曲线如图10(b)所示。JC2水平位移在水位上升阶段增长了9.49 mm,水位下降阶段增长了12.21 mm;JC3水平位移在水位上升阶段增长了8.35 mm,水位下降阶段增长了11.54 mm;JC1水平位移在水位上升阶段增长了7.09 mm,水位下降阶段增长了12.01 mm。JC2和JC3竖直位移变化相近,在水位上升期增长了约4.2 mm,水位下降期增加了约2.8 mm;JC1竖直位移在水位上升期增长了3.21 mm,水位下降期增加了3.65 mm。图10(c)所示为20 mm/min水位升降速率的监测点位移变化曲线图,在各监测点水平位移变化中,JC2在水位上升期增长了10.79 mm,水位下降期增长了14.02 mm;JC3在水位上升期增长7.42 mm,水位下降期增长了13.90 mm;JC1在水位上升期增长了6.31 mm,水位下降期增长了13.11 mm。所有监测点竖直位移变化区别不大,水位上升阶段增长约1.5 mm,水位下降阶段增长显著,约8.3 mm。

由图10可以发现,监测点水平位移变化比竖直

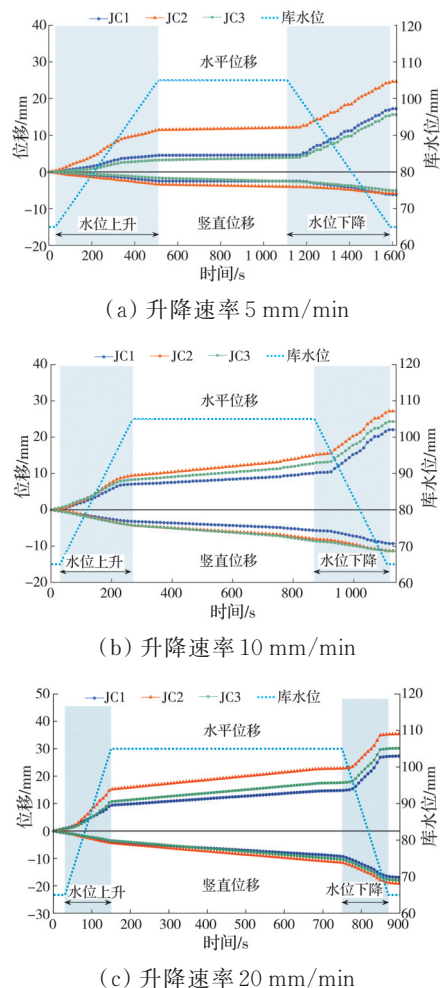


图 10 不同水位升降速率下地表监测点位移变化曲线图

Fig. 10 Displacement change curves of surface monitoring points at different water level rise and fall rates

位移变化更明显,在水位上升和水位下降阶段各监测点位移变化趋势呈台阶状阶跃特征,但库水位下降阶段位移阶跃趋势更显著。随着库水位变化速率逐渐变大,在 10 min 间歇期内,监测点位移分别为 0.5、3~5、5~8 mm,位移增长趋势逐渐加大,这是由于透明土滑体在经过水位上升的扰动后滑坡稳定状态变差,且水位上升速率越大,滑坡稳定状态越差。

3 讨论

已有学者通过离心机模型试验和框架式模型试验研究了库水位变动引起库岸边坡变形失稳破坏的机理,发现库水位变化诱发滑坡变形主要体现在滑坡体动水压力条件变化、应力条件改变以及材料强度劣化等方面^[26-28]。但由于在滑坡中埋置传统土压力盒、孔隙水压力传感器等监测仪器会改变滑坡体的初始应力条件,给测量结果带来一定的不确

定性。笔者通过透明相似模型试验技术,设计透明土滑坡体在低、中、高 3 种水位升降速率下的试验工况,采用非侵入式监测手段对滑坡内部变形结果进行表征,深入分析库水位变动下库岸滑坡内部变形的演化过程。

库水位上升和下降阶段的滑坡变形规律表现有所不同。在水位上升阶段,滑坡变形集中区初期主要分布在前缘,随后向滑坡中后部扩展,表现为由前向后发展的变形趋势;而在水位下降阶段,初始时期滑坡变形集中区域主要分布在滑坡中后部,并逐渐向滑坡前缘延展,表现为从后向前发展变形的趋势。周昌等^[29]通过水位骤降过程中透明土边坡试验研究发现,库水位持续下降会引起坡体内外水力梯度差,进而产生指向坡外的渗流压力,导致消落带滑坡变形快速增大。本试验中,在水位上升阶段前缘透明砂土堆积而成的滑体处于非饱和状态,表现出孔隙分布发达、状态松散等特点,在受到指向滑坡内部的渗透力作用后,容易产生变形破坏;而在水位下降阶段,滑坡前缘受到静水压力支撑,后缘受到推挤力作用,两者相互共同挤压下滑坡中后部易发生变形破坏,随着水位逐渐降低,加之滑坡体内地下水位线下降具有滞后效应,前缘滑坡体在渗透力作用下变形加剧。

对比 3 种水位升降速率下透明土滑体变形特征可以发现,随着水位升降速率变大,滑坡体变形明显加强,表明其受到的动水压力作用显著增强。Sui 等^[20]认为,水位下降速率会影响透明土堆积滑坡的滑动速度,但对透明土边坡滑移后的最终形态影响不大。另外,提高水位上升速率扩大了水位上升初期滑坡前缘位移集中变形区域,并使变形区域向滑坡深部扩展;而提高水位下降速率则加剧了滑坡地下水位下降的滞后效应,滑坡前缘变形也相对滞后,具体表现为水位下降初期变形不明显。从图 10 各监测点位移阶跃式增加的变化规律可以看出,库水位下降过程中位移增长更大,随着水位升降速率逐渐提高,滑坡各监测点在库水位上升期和下降期的位移变化量明显增加,且滑坡体在间歇期内位移变化有显著增长的趋势,滑坡稳定性表现也越来越差。

由于试验材料本身的限制,孔隙流体的运动黏度远远大于水,试验产生较大的渗流失真,无法真实模拟水对滑坡体的侵蚀作用和力学作用,因此会在一定程度上减弱库水对滑坡体变形的影响。另一方面,受限于当前的试验条件,试验中采用不同位移加载速率会对库水位诱发的滑坡变形产生影响,考虑到目前透明土试验技术难以获取滑坡体内部的应力变化特征,无法得知水位升降过程中滑坡

体内部孔隙水压力的变化,因此,对滑坡变形机理的揭示有一定局限性。

4 结论

基于透明土模型试验技术,开展了不同水位变动速率下的库水位升降模型试验,分析水位上升和库水位下降两个阶段的透明土滑体变形场演化特征以及典型监测点的位移变化规律,得到如下主要结论:

1)透明土滑体在库水位上升和下降过程中都具有明显的变形特征,库水位上升阶段滑坡变形由前缘集中向后部发展,而在库水位下降阶段滑坡变形由中后部向前缘推进。总体而言,库水位下降对滑坡体变形影响更大。

2)提高库水位升降速率会加大滑坡体受到的库水作用,使其变形更大,变形特征更显著。这主要是由于更大的水位升降速率使滑坡内地下水位升降滞后于库水位变化,水位升降过程产生的动水压力增大。

3)滑坡水平位移的增长明显高于竖直位移,地表位移呈阶跃型增长变化的趋势,随着库水位升降速率的增大,滑坡在库水位不变的间歇期内位移也不断增长,表明滑坡稳定性变差。

参考文献

- [1] Wang N T, Liu L, Shi T T, et al. Study of the impact of reservoir water level decline on the stability treated landslide on reservoir bank[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 65: 481-492.
- [2] Huang X H, Guo F, Deng M L, et al. Understanding the deformation mechanism and threshold reservoir level of the floating weight-reducing landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Landslides, 2020, 17 (12): 2879-2894.
- [3] 中村浩之, 王恭先. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53-64, 35.
Nakamura K, Wang G X. On reservoir landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 53-64, 35. (in Chinese)
- [4] Müller-Salzburg L. The Vajont catastrophe: a personal review[J]. Engineering Geology, 1987, 24(1-4): 423-444.
- [5] 廖秋林, 李晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3146-3153.
Liao Q L, Li X, Lee S T, et al. Occurrence, geology and geomorphy characteristics and origin of Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3146-3153. (in Chinese)
- [6] Tang H M, Wasowski J, Juang C H. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China-Lessons learned from decades of research[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105267.
- [7] 柳群义, 朱自强, 何现启, 等. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 85-89.
Liu Q Y, Zhu Z Q, He X Q, et al. Unsaturated seepage analysis of the influence of water level fluctuation on pore water pressure of landslide in reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 85-89.
- [8] 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.
- [9] 张旭, 谭卓英, 周春梅. 库水位变化下滑坡渗流机制与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 713-723.
Zhang X, Tan Z Y, Zhou C M. Seepage and stability analysis of landslide under the change of reservoir water levels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 713-723. (in Chinese)
- [10] 殷跃平, 张晨阳, 闫慧, 等. 三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 649-659.
Yin Y P, Zhang C Y, Yan H, et al. Study on seepage stability and prevention design of landslide in Three Gorges Reservoir water storage operation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 649-659. (in Chinese)
- [11] Cheng Z C, Liu S Q, Fan X W, et al. Deformation behavior and triggering mechanism of the Tuandigou landslide around the reservoir area of Baihetan hydropower station[J]. Landslides, 2023, 20(8): 1679-1689.
- [12] 张强, 郑艳妮, 贾朝军, 等. 复杂水库调度及降雨条件下堆积体滑坡离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2427-2440.
Zhang Q, Zheng Y N, Jia C J, et al. Centrifugal experimental study on accumulation body landslides under complex reservoir operation and rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2427-2440. (in Chinese)
- [13] 谭淋耘, 黄润秋, 裴向军. 库水位下降诱发的特大型顺层岩质滑坡变形特征与诱发机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 302-314.
Tan L Y, Huang R Q, Pei X J. Deformation characteristics and inducing mechanisms of a super-large bedding rock landslide triggered by reservoir water level decline in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 302-314. (in Chinese)

- [14] Jiang Z H, Wang H L, Xie W. Deformation mechanism of deposit landslide induced by fluctuations of reservoir water level based on physical model tests[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(11): 410.
- [15] Chen H Y, Zou J H, Wang X H, et al. Inducing factors and deformation mechanism of the Zhangjiacitang landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 12926.
- [16] 陈超, 王煜成, 王鲁琦, 等. 库水位-降雨耦合作用下凉水井滑坡的变形机制[J]. *土木与环境工程学报*, 2025, 47(6): 52-62.
Chen C, Wang Y C, Wang L Q, et al. Mechanism of Liangshuijing landslide deformation under coupled effect of reservoir water level fluctuation and rainfall[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(6): 52-62. (in Chinese)
- [17] Wei L T, Xu Q, Wang S Y, et al. The primary influence of shear band evolution on the slope bearing capacity [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(4): 1023-1037.
- [18] Zhong W H, Liu H L, Gu D M, et al. Development of a preparation method of transparent soil-rock mixture for geotechnical laboratory modeling[J]. *Engineering Geology*, 2022, 301: 106622.
- [19] 冷先伦, 王川, 盛谦, 等. 基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(5): 1283-1294, 1308.
Leng X L, Wang C, Sheng Q, et al. Study on evolution mechanism of deformation and failure of main fractured slope based on transparent similar model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(5): 1283-1294, 1308. (in Chinese)
- [20] Sui W H, Zheng G S. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(3): 977-985.
- [21] Zhou C, Ma W C, Sui W H. Transparent soil model test of a landslide with umbrella-shaped anchors and different slope angles in response to rapid drawdown[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106765.
- [22] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂土强度特性对比三轴试验[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2): 250-255.
Kong G Q, Liu L, Liu H L, et al. Comparative analysis of the strength characteristics of transparent glass sand and standard sand[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2): 250-255. (in Chinese)
- [23] 孔纲强, 孙学谨, 肖扬, 等. 透明土与标准砂压缩变形特性对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1895-1903.
Kong G Q, Sun X J, Xiao Y, et al. Comparative experiments on compressive deformation properties of transparent soil and standard sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1895-1903. (in Chinese)
- [24] 王壮, 李驰, 丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊2): 185-188.
Wang Z, Li C, Ding X M. Model tests on sliding mechanism of soil-rock slopes based on transparent soil technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2): 185-188. (in Chinese)
- [25] Thielicke W, Sonntag R. Particle image velocimetry for MATLAB: accuracy and enhanced algorithms in PIVlab [J]. *Journal of Open Research Software*, 2021, 9(1): 12.
- [26] 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 F S, Wu Y P, Xie Y H, 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. (in Chinese)
- [27] 肖捷夫, 李云安, 蔡浚明. 水位涨落作用下藕塘滑坡响应特征模型试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1049-1056.
Xiao J F, Li Y A, Cai J M. Model test research on response characteristics of outang landslide under water level fluctuation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1049-1056. (in Chinese)
- [28] 肖诗荣, 胡志宇, 卢树盛, 等. 三峡库区水库复活型滑坡分类[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(11): 39-44.
Xiao S R, Hu Z Y, Lu S S, et al. Classification of resurrection landslides in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(11): 39-44. (in Chinese)
- [29] 周昌, 马文超, 胡元骏, 等. 基于透明土的库水位骤降下消落带滑坡-伞型锚体系变形破坏机理[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(4): 1407-1417.
Zhou C, Ma W C, Hu Y J, et al. Failure mechanism of water-level fluctuation zone with umbrella-shaped anchors under rapid drawdown based on transparent soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(4): 1407-1417. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)