DOI:10.11918/202004148

库水复活型滑坡牵引滑动机理模型试验研究

孙立娟[1],崔 凯[2],王溢轩[3]

(1.吉林建筑大学 交通科学与工程学院,长春 130118;2.高速铁路线路工程教育部重点实验室(西南交通大学),成都 610031;3.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

摘 要: 为深入探索库水复活型滑坡的破坏模式和力学机制,设计研发新型试验装置,装置主体是由若干渗透盒构成的分段式滑面,能够模拟各种几何形态的滑动面。通过向不同区段的渗透盒注水,可模拟滑带土分阶段饱水软化,实现库水位上升条件下相邻滑块间的牵引滑动过程。采用传感元件、数码摄像以及数字图像处理等测试手段,获取滑带土体积含水率、孔隙水压力、坡面水平位移的变化规律以及后缘面演化特征,并探讨滑坡体失稳破坏模式。结果表明:滑带土饱水后抗剪强度大幅度下降是滑坡发生的重要条件,滑动面处的孔压变动是激发老滑坡复活的重要诱因;滑带处孔隙水压力的增大与滑坡位移的增大是同时发生的,滑带土强度衰减与滑体变形具有良好的相关关系;坡面变形区域分为强、弱变形区和牵引区3部分,坡面变形为1~1.5倍的失稳滑带长度;随着失稳滑带长度增加,坡面变形区域变大,对后侧稳定坡体的牵引变形影响变小;后缘破裂面多呈折线型滑面形态,后缘破裂面倾角试验值受失稳滑段位置和滑体厚度影响显著。研究结果为库区滑坡灾变机制的认识和治理提供重要依据。

关键词: 复活型滑坡;分段式滑面;牵引式滑动;数字图像处理;坡面变形区;后缘破裂面倾角

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)11-0162-09

Model test study on retrogressive and sliding mechanism of reservoir-reactivated landslide

SUN Lijuan[1], CUI Kai[2], WANG Yixuan[3]

(1. College of Transportation Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering (Southwest Jiaotong University), Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To further explore the failure mode and mechanical mechanism of reservoir-reactivated landslide, a new test device was designed and developed, the main body of which is composed of several permeable boxes, and it can simulate sliding surfaces with different geometric shapes. The sliding zone can be multi-stage softened by injecting water into different permeable boxes, so that the retrogressive-slide process between adjacent sliders caused by the rise of the reservoir water level can be realized. Through the techniques of digital photography, digital image processing, and transducers measurement, a series of important test data were obtained, such as volume water content, pore water pressure, horizontal displacement of slope, and evolution characteristics of the trailing edge surface. Moreover, the failure mode of the landslide body was discussed. Test results show that the significant decrease in shear strength of sliding zone soil after saturation was an important reason for the occurrence of landslide. The pore pressure variation at the sliding surface was the main inducing factor for the revival of the old landslide. The increase in pore water pressure at the sliding zone occurred simultaneously with the increase in the landslide displacement, and there was a good correlation between the strength degradation of sliding zone soil and the deformation of sliding body. The slope deformation area was divided into three parts: strong and weak deformation area and traction area. The slope deformation range was about 1 to 1.5 times the length of the unstable sliding zone. With the increase in the length of unstable sliding zone, the deformation zone of the slope increased, and the influence on the traction deformation of the back stable slope decreased. The trailing edge rupture surfaces were mostly in the shape of folded slip surface, and the experimental values of the inclination angle of the trailing edge surface were significantly affected by the position of the unstable sliding section and the thickness of the sliding body. The research results provide important basis for the understanding and controlling of landslide disasters in reservoir area.

Keywords: reactivated landslide; sectional sliding surface; retrogressive slide; digital image processing; slope deformation zone; inclination angle of the trailing edge

收稿日期: 2020-04-27
基金项目: 吉林省教育厅"十四五"科学技术研究项目(JJKH20210261KJ);国家自然科学基金(41572245)
作者简介: 孙立娟(1982—),女,博士;
崔 凯(1979—),男,教授,博士生导师
通信作者: 崔 凯,cuikai@swjtu.edu.cn

库区水位升降对边坡稳定性的影响是亟待解决的重要课题[1-3]。与普通边坡相比,库岸边坡的外部水环境变化不同于一般滑坡体。因长期受库水位升降作用的影响,岸坡前缘受冲刷侵蚀以及浸泡软化作用,坡脚支撑力削弱,易出现临空面,常使坡体

发生牵引滑动破坏，形成牵引式滑坡[4-7]。

据统计，库岸边坡多为老滑坡，国际大坝委员会(LCOLD)统计了 50 座水库的 105 个滑坡事故，发现老滑坡复活占到 75%[8]。对于老滑坡而言，多数在地质历史时期已经形成了滑动面，且发生过多级多次滑动，其复活失稳多是由滑带土强度弱化导致的。水库蓄水诱发滑坡的诸多原因中，老滑坡具有既有滑面以及蓄水导致的滑带土浸水弱化是重要的控制因素[9-10]。滑带作为滑坡的重要组成部分，对滑坡稳定性起着至关重要的控制作用。滑带的演化过程与其所处的应力环境及地下水条件密切相关，一定程度上导致滑带的力学参数具有明显的空间分区特征，进而引发不同的坡体破坏模式。即滑带土强度演化过程与滑坡体变形发展直接相关，滑坡的发生发展和运动过程是滑带土强度在时间上的可变性和空间上的差异性的宏观体现。滑坡的发生更多地取决于滑动面上的应力状态以及滑带土强度衰减程度。如云阳地区老药铺滑坡主要是滑面处形成超孔隙水压力，滑带土抗剪强度降低，从而诱发老滑坡复活[11]。塘角村 1 号老滑坡开始启动是滑带土孔隙水压力改变的结果，滑带土所表现出的力学特性是老滑坡复活的关键诱因[12]。万州中学老滑坡，其底滑面直接控制老滑坡的整体稳定性[13]。

在库岸滑坡的研究中，从现场调查、原位试验、室内试验、理论分析以及数值仿真等方面开展了大量工作[14]，尤其是在库岸滑坡演化机制试验研究方面更是取得了显著成果。如罗先启等[15]通过物理模型模拟等方法，揭示了千将坪滑坡的滑动机制及滑坡预警判据。王明华等[16]研究库岸滑坡发现，水库蓄水易引发牵引式滑坡的变形模式，降低滑坡体稳定性。陈晓平等[17]对库岸古滑坡展开研究，发现水位骤降导致产生向外的动水压力，加剧坡脚滑动并诱发失稳。周跃峰等[18]采用模型试验研究了库水变化引起的黄土滑坡破坏模式，认为饱水后黄土因孔隙水压力增大而导致失稳。滕帅等[19]采用模型试验方法，研究土质岸坡在水位升降作用下的塌岸破坏特征以及力学演化机制。汤明高等[20]采用离心模型试验的方法，揭示了直线型滑带形态滑坡在水位升降调节下的变形破坏模式。

上述研究更多地关注坡体入渗以及渗透稳定方面的研究，而从滑带土强度特性角度，探讨库水复活型老滑坡失稳机制方面的研究较少，特别是采用模型试验手段，建立滑带土强度衰减与滑坡体破坏模式之间关系的研究尚未见报道。

事实上，对于存在既有滑面的老滑坡，其滑带饱水模拟比坡体饱水模拟更重要。现有试验方法难以实现库水均匀入渗滑带，多数情况是坡面浅层已被冲刷破坏，滑带土却尚未达到饱和。目前仍缺乏合适的试验手段，尚需进一步发展。本文在认识库岸老滑坡作用机制的基础上，结合水利工程中的老滑坡体破坏模式，重点关注滑带土强度衰减对滑体变形规律的影响，开展室内模型试验。研发了能够模拟地下水对滑带软化作用的试验装置，由若干渗透盒构成分段式滑面，通过对不同渗透盒注水，模拟滑带分阶段饱水软化，从而实现库水位上升条件下引发的滑坡体牵引破坏过程。设计 6 种试验方案，研究库水复活型老滑坡的滑带失稳机制、后缘破裂面倾角变化、后缘裂缝形态演化特征以及坡面位移发展规律等，并详细分析滑坡体失稳破坏模式。这一研究对于水库型滑坡预测、滑坡稳定性分析、揭示老滑坡复活机制以及渐进失稳模式等方面具有重要意义。

1　模型试验方案

1.1　“分段式滑面底渗法”试验装置

一般来说，库岸滑坡的模型试验通常采用在模型装置中直接变化水位的试验方法。然而，本文的研究对象是具有既有滑带的库岸老滑坡，对该类型滑坡而言，滑带土变形对整个滑坡体的稳定起控制作用，上述方法较难反映滑带土的强度衰减对滑坡体的影响，多数情况是坡面冲刷破坏，滑带土却仍保持稳定。为更精准地反映库岸老滑坡的主要致滑因素，提出了能够模拟滑坡分级差异性滑动和地下水软化滑带的“分段式滑面底渗法”模型试验方法，并设计制作了模型试验装置。

为实现模型试验功能和满足测试需求，试验装置主要由模型箱、渗透系统、注水系统、测试系统和高速摄影采集等组成。为便于观察滑坡体变形发展过程，模型箱两侧采用透明钢化玻璃作为可视窗口，并设有透明坐标刻度纸(用于精确变形定位分析)，通过安装在模型箱侧面的视频跟踪器和数码相机，实时观测滑坡体的全过程变形特征和裂缝发展规律。经统计，库岸老滑坡中大型滑坡比例较高。通过对多个大型滑坡进行调查，并结合现有研究成果中库岸滑坡的模型试验，最终确定本文的模型箱尺寸为 120 cm × 30 cm × 80 cm (长 × 宽 × 高)，模型箱内部用于填筑滑体土和滑带土，滑床认为是固定不变的。装置主体是由若干个渗透盒构成的分段式滑面，如图 1 所示。渗透盒尺寸为 30 cm × 12 cm × 2 cm，采用壁厚 1 mm 的钢板制作而成，渗透盒内部除设置 1 cm 高支架外，保持空置，支架上放置透水石，厚为 1 cm，透水石渗透系数为 1×10^{-3} cm/s。渗透盒的渗透能力为 0.18 m^3/(h·盒)，即每个渗透盒每小时渗透水 0.18 m^3。从渗透盒底部引出注水管，将各组注水管设置为同一水头，与注水容器相

连。同时,在注水管上部安装控水球阀,用于控制水的开启、闭合以及调节流速等。试验开始时,在分段式滑面上方依次填筑滑带土和滑体土,并向注水容器注水,调节各组注水管至相同流速,水流经透水石均匀入渗至滑带土中。滑带土随注入水量的增加而软化,致使滑坡失稳下滑。设计各种工况,通过从前至后向不同的渗透盒注水,模拟库水上升导致的滑坡体渐进失稳过程。

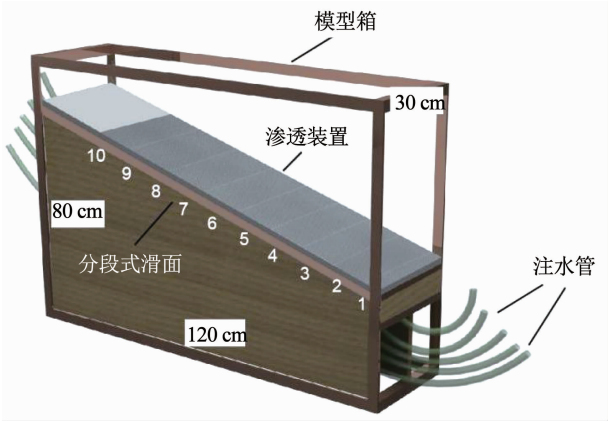


图 1 "分段式滑面底渗法"试验装置

Fig. 1 Test device of " segmental sliding surface bottom penetration method"

1.2 试验模型

库岸滑坡受斜坡体岩层结构组合方式的控制,存在多种地质破坏模式,本文主要研究顺坡层滑动的地质模型。调查发现,三峡库岸老滑坡段的复活多为沿潜在滑面的整体滑移型破坏机制。根据上述特征,设计了本文的试验方法并概化出试验模型。目前,大多数模型试验物理量的相似比主要受边坡几何比尺控制。调查发现,土质类边坡高度通常在 10 ~ 60 m 取值,本文的试验模型高度介于 12 ~ 20 cm,因此,选用的几何相似比为 $C_l = 1:100$,为充分考虑土体自重作用下的滑动推力影响,试验土体的重度相似比为 $C_\gamma = 1:1$,根据相似理论可得

$$C_\sigma = C_\gamma C_l = 1:100 \tag{1}$$

$$C_\delta = C_l = 1:100 \tag{2}$$

$$C_\mu = C_\varepsilon = C_\varphi = 1:1 \tag{3}$$

$$C_E = C_c = 1:100 \tag{4}$$

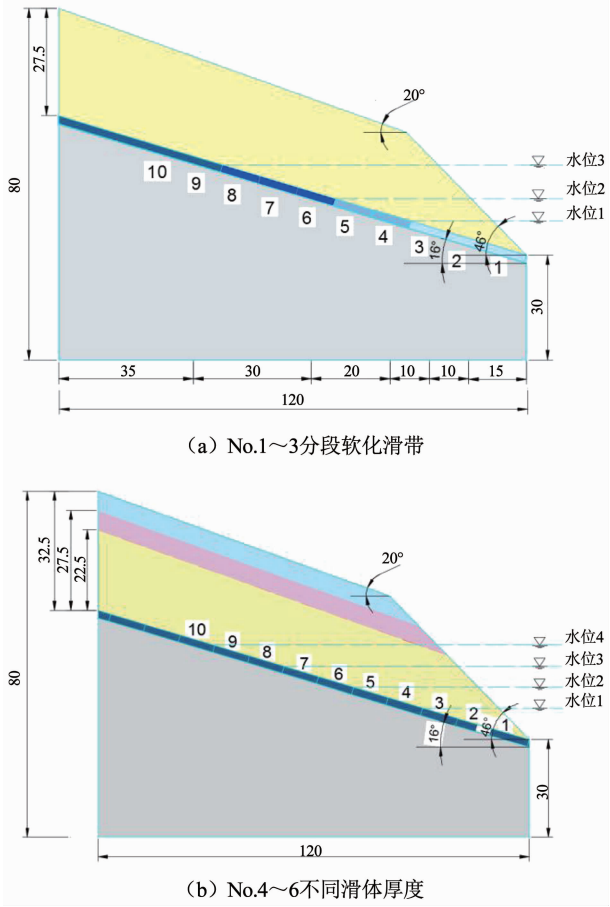
式中:C_σ为应力相似比,C_γ为重度相似比,C_l为几何相似比,C_δ为位移相似比,C_μ为泊松比相似比,C_ε为应变相似比,C_φ为内摩擦角相似比,C_E为弹性模量相似比,C_c为黏聚力相似比。

试验采用 0.3 mm 石英砂和0.023 mm超细陶土作为原材料,滑体土采用砂土比 2:1 的比例配置,滑带土采用纯陶土配置,滑带土初始含水量为 10% 左右。共设计 6 组试验,主要考虑不同失稳滑带长度和滑体厚度对滑坡体破坏模式的影响,工况设计见表 1。从模型箱前端剪出口起对渗透盒进行编号,从前至后依次为 1、2、3、…、10,模型具体尺寸见图 2。图 2 中仅示意库水位上升时影响的滑带失稳范围,并以此确定注水工况。

表 1 试验方案设计

Tab. 1 Test scheme design

No.	砂土比		坡体形态		滑动分段(注水工况)(按渗透盒编号)
	滑体	滑带	滑面线	坡面线	
1	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3/4 +5/6 +7/8 +9
2	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3 +4 +5/6 +7 +8 +9
3	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3 +4 +5 +6 +7 +8/9 +10
4	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3/4 +5/6 +7/8 +9
5	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3/4 +5/6 +7/8 +9
6	2:1	0:1	直线型	两段线	1 +2 +3/4 +5/6 +7/8 +9



(a) No.1~3分段软化滑带

(b) No.4~6不同滑体厚度

图 2 工况设计(cm)

Fig. 2 Working condition design (cm)

测试各组滑体土和滑带土的物理力学参数,见表 2。其中,γ 为天然重度,E_s为压缩模量,c 为黏聚力,φ 为内摩擦角。坡体材料渗透系数为(3 ~ 5) × 10^{-6} m/s,足以吸收全部渗入水量。模型制作过程中,首先将设计滑带固定在模型箱底部,将渗透盒依次铺设在滑带上,并将连接处和四周边界予以密封。而后在模型箱玻璃板上分层划线,并绘制滑坡体轮

廓线。先按照 2 cm 厚度计算滑带土用量，铺设后击实，按照试验设计布置传感器。再按照 10 cm 厚度计算每层所需滑体土用量，分层击实，各层间划毛处理，铺设完成后削坡得到设计坡型。为减小坡体与两侧玻璃间的摩擦，在接触面区域增设减摩剂，而后在模型箱内侧分别安放表面光滑的较薄铁板，待坡体模型完成切坡后，将铁板缓慢抽出。此时，模型与侧面并未紧密贴合，较大程度地减少了侧面摩阻力的影响，更接近实际。

表 2　模型土物理力学参数

Tab. 2　Physical and mechanical parameters of model soil

No.	γ/(kN·m^{-3})	e	E_s/MPa	c/kPa	φ/(°)
1	16.14/12.15	0.76/1.05	8.45/4.12	1.12/4.09	32.88/18.80
2	14.26/10.87	0.98/1.17	8.57/4.54	1.51/4.04	26.60/18.81
3	14.26/11.47	0.97/1.13	8.66/5.11	1.64/4.66	27.61/15.02
4	15.34/10.08	0.85/1.12	7.45/4.31	1.36/4.01	23.37/17.66
5	15.07/11.31	0.88/1.17	7.68/4.27	1.42/4.14	25.55/18.24
6	13.18/12.24	1.18/1.22	8.96/5.31	1.53/4.31	24.68/17.64

注：表中各组数据分别表示滑体土和滑带土参数。

1.3　监测设备和图像变形分析

模型试验中，在滑带处分别埋设微型孔隙压力传感器，以监测滑带土孔隙水压力变化。同时，在相同位置布设土壤水分传感器，以实时监测滑带土含水率变化。此外，采用视频跟踪器和数码影像等设备获取滑坡体变形发展信息。

位移测试主要是基于 MATLAB 平台，采用 GeoPIV-RG 技术实现。该技术的基本原理是首先选取试验模型的初始状态图像作为参考，确定分析区域并划分为子块，通过数字图像处理的方法，获取任意时刻图像的水平和竖向位移，同时分析滑坡体大变形和小变形的情况，在岩土试验方面应用较为广泛[21-22]。分析模型的网格单元划分如图 3 所示。

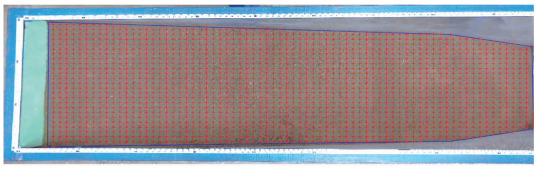


图 3　滑坡模型中的坡面格网单元划分

Fig. 3　Meshing of slope in landslide model

模型中布设 3 个孔隙水压力传感器，分别埋置在渗透盒编号为 2、5 和 8 的滑带土内，对应编号为 PPT1、PPT2 和 PPT3。同时，采用美国 DECAGON 公司生产的 EC-50 型土壤水分传感器，实时监测相同滑带处的含水量变化。该传感器厚度较小，仅 1.5 mm，能够较好地降低尺寸效应的影响，编号分别为 SM1、SM2 和 SM3，如图 4 所示。

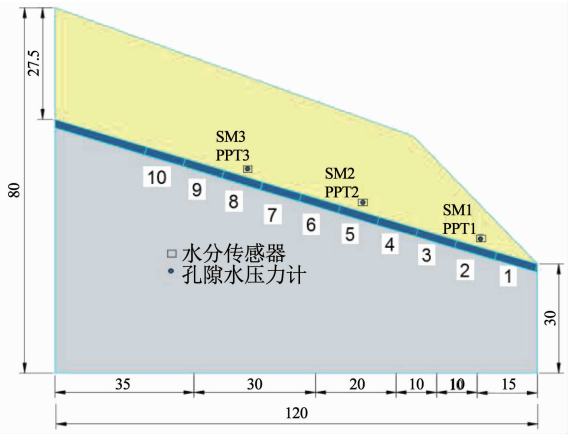


图 4　试验模型示意(cm)

Fig. 4　Schematic of test model (cm)

1.4　试验过程

本试验是模拟库水位上升时，滑带土强度弱化导致的滑坡体牵引滑动过程。为获得滑带土的强度随含水率的变化特征，对不同含水率下的滑带土进行抗剪强度测试，滑带土黏聚力和内摩擦角与含水率的关系曲线如图 5 所示。可以看出，随着含水率的增高，滑带土的黏聚力和内摩擦角均显著降低，滑带土的抗剪强度明显受控于含水率的变化。

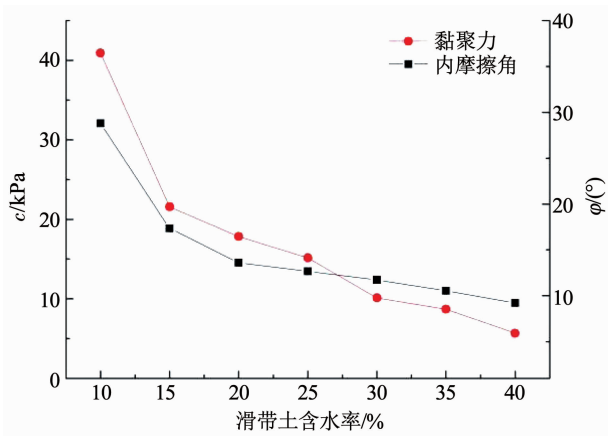


图 5　滑带土的 c-ω/φ-ω 关系曲线

Fig. 5　c-ω/φ-ω curves of sliding zone soil

在设计工况时，采用从下到上向滑带土注水的方法模拟相邻滑块间的牵引滑动过程。按照设计工况，试验开始时，自滑坡体前段起分段软化滑带，滑带土饱水弱化，强度不断降低，第 1 级滑块逐渐形成并向前滑移。随着变形持续发展，逐渐与后侧滑体相离，其后侧滑体因缺少支撑，抗滑力减小，稳定性降低至极限平衡状态后开始产生小变形，直至第 1 级滑块逐渐趋于稳定，进行下一工况。由于模型较小，为避免水分对滑体土的潜蚀作用，将注水速率控制在较小范围内。将同时注水的第 1 组渗透盒称为第 1 级滑带，其软化引起的坡体变形部分称为第 1 级滑块，依此类推。

各组试验均采用同一滑带土,故仅展示一组试验的滑带土孔压测试及水分传感器测试结果和变化规律,以方案 1 为例。

2 模型试验结果及分析

为了探究库水上升诱发的老滑坡失稳模式和力学机制,通过分段式滑面底渗法的试验方法,较好地再现了老滑坡的牵引式渐进破坏过程,并结合试验现象以及相关测试数据,开展以下方面的分析。

2.1 滑带土体积含水率变化特征

为明确滑带土含水率对坡体变形的影响,在滑带土不同部位布设水分传感器,观测不同滑带土含水率下的坡体变形发展趋势,各测点体积含水率变化特征如图 6 所示。在 0 ~ 1 800 s,第 1 级滑带监测点 SM1 显示,含水率随时间增加呈线性增长,变化速率较快。而后在 1 800 ~ 3 600 s,滑带土含水率上升速率回缓,至 40% 左右趋于稳定,滑带土逐渐趋于饱和状态。此过程中坡面开始出现微变形,在注水滑带末端坡面位置产生较浅的垂直于坡面的拉裂缝。按照工况设计,依次向第 2 级和第 3 级滑带注水时,SM2 和 SM3 的变化规律与 SM1 相似,均为开始阶段含水率增长较快,达到 40% 左右稳定,此变化规律即为方案 1 滑带土含水率的发展过程。由于采用同一性质滑带土,在试验过程中观察到,其他 5 组滑带土在各个阶段随含水率的变化特征趋于一致,最终滑带土的含水率均趋于 40% 左右。

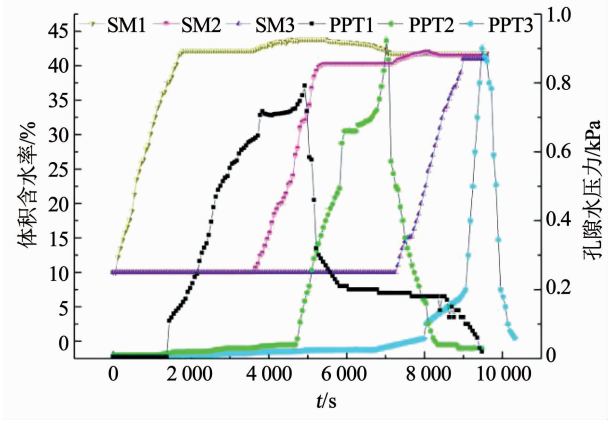


图 6 体积含水率和孔隙水压力随时间变化过程

Fig. 6 Variation of volume water content and pore pressure with time

上述现象表明滑带土含水率与坡体变形发展具有良好的相关关系,滑带土的逐渐饱水过程是位于坡体裂缝初步形成的阶段。此阶段,滑坡体并未有明显变形现象。滑带土饱水后抗剪强度大幅度下降是老滑坡复活的重要原因。鸡扒子滑坡的地质力学模型试验也证实了这一结论[23]。

2.2 滑带土孔隙水压力变化特征

图 6 为模型中布设的 3 个微型孔隙水压力计监测结果。可以看出,方案 1 中的滑带土孔隙水压力开始启动节点明显滞后于体积含水率启动节点,即 3 个滑带位置处的孔隙水压力值增长均是从滑带土饱水后开始的,最大孔压在 0.8 kPa 左右。监测点 PPT1 和 PPT2 的孔压值初始增加较为缓慢而后突然下降,PPT3 的孔压值则增长和下降均较迅速。同时,对比其他 5 组试验的孔隙水压力结果发现,孔隙水压力的增长节点均滞后于体积含水率的增长节点,各组曲线变化趋势相近,仅最大孔压值存在部分差别,但均小于 1.0 kPa。

此种变化情况影响的坡体变形规律为:坡体快速变形是在孔压达到峰值之后的较短时间内,孔压的增长过程是坡体变形发展较为迅速的阶段,孔压消散后坡体变形亦趋于稳定。这一现象表明,坡体变形快慢与孔隙水压力增长速率密切相关。滑带处超孔压的累积和消散导致坡体内部应力重分布,从而引发坡体产生较大变形或失稳。库岸老滑坡在库水位上升时,容易导致滑带土产生较高的孔隙水压力,这种滑动面处的孔压变动激发老滑坡复活。通常,孔隙水压力突然上升是滑坡体局部破坏启动的临界状态,滑体启动后孔隙水压力会迅速消散,因此,通常滑体滑动一段距离后即趋于稳定。孔隙水压力在库水型滑坡复活过程中起主导作用,是老滑坡复活的重要诱因。缪海波等采用室内环剪试验模拟孔隙水压力激发滑带土抗剪强度降低过程,揭示了滑带土孔隙水压力变动是触发老滑坡复活的关键诱因,这与本文的模型试验观测结果较为一致。

总体来说,滑带土逐渐饱水弱化是导致坡体产生微小变形的触发因素。饱和或近饱和滑带土的孔隙水压力突然增大是滑坡体发生快速变形的重要提示,可据此进行滑坡的预测预报工作。

2.3 后缘破裂面演化特征

滑坡体后缘面形成机制为由于底滑面失稳下滑,在失稳滑面末端对应的坡面位置出现了拉破坏区,各级滑块依次形成后缘拉裂缝。

2.3.1 后缘破裂面倾角变化规律

定义破裂倾角为坡面破裂点和失稳滑带末端连线与水平面的夹角,如图 7 所示。按照设计工况,从前至后依次向渗透盒注水,以试验方案 1 为例。第 1 级为工况一(1 + 2 + 3 组合),后缘裂缝 C_1 如图 8(a)所示;第 2 级为工况二(4 + 5 组合),后缘裂缝 C_2 如图 8(b)所示;第 3 级为工况三(6 + 7 组合),后缘裂缝 C_3 如图 8(c)所示;第 4 级为工况四(8 + 9 组合),后缘裂缝 C_4 如图 8(d)所示。将各试验方案裂缝倾角值汇总,见表 3。

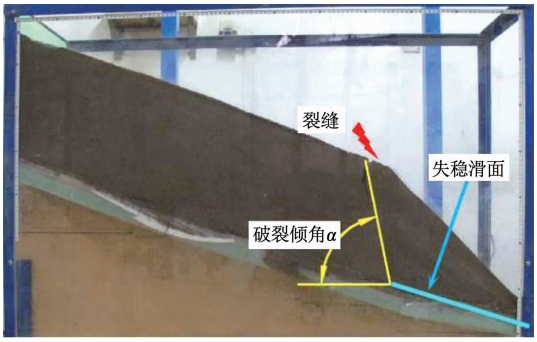
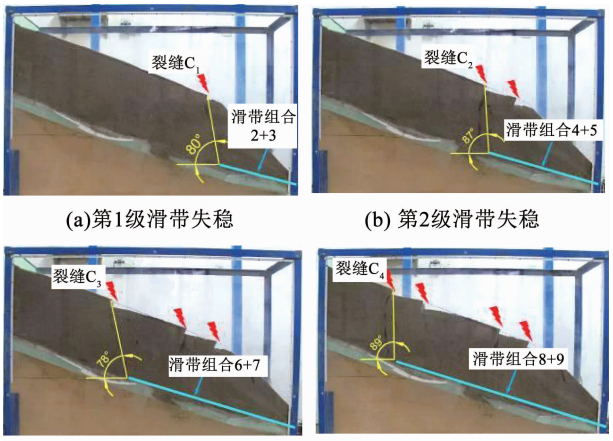


图 7　后缘破裂面倾角 α

Fig. 7　Inclination angle α of trailing edge



(a)第1级滑带失稳　(b) 第2级滑带失稳

(c) 第3级滑带失稳　(d) 第4级滑带失稳

图 8　No. 1 各级滑块裂缝扩展过程

Fig. 8　Fracture expansion process of sliders of scheme No. 1

表 3　后缘破裂面倾角 α 试验值

Tab. 3　Test values of inclination angle α of trailing edge

No.	Gk_1	α/(°)	Gk_2	α/(°)	Gk_3	α/(°)	Gk_4	α/(°)
1	1－3	80	4－5	87	6－7	78	8－9	89
2	1－5	79	6－9	80				
3	1－8	72	9－10	72				
4	1－3	78	4－5	75	6－7	65	8－9	77
5	1－3	88	4－5	88	6－7	88	8－9	88
6	1－3	90	4－5	90	6－7	90	8－9	84

注：Gk 表示工况，1－3 表示该工况的滑带渗透盒组合为 1 号、2 号和 3 号，1－4 表示组合为 1 号、2 号、3 号和 4 号，其他与此相同。

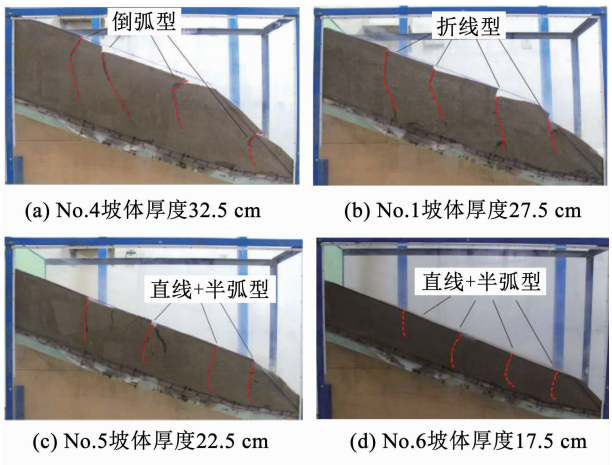
由表 3 可以看出，后缘破裂面倾角均为小于 90°的陡倾角，主要分布在 65° ~ 90°，其中，位于 80° ~90°的约占半数。研究发现，不同失稳滑带长度和滑体厚度对后缘破裂面倾角影响明显。总体上，失稳滑带越长，后缘破裂面倾角趋于减小。随着坡体厚度的减小，各级滑块的后缘破裂面倾角依次变大。对于等厚度直线坡，相同失稳滑带长度的工况，后缘破裂面倾角试验值相差较小。

2.3.2　后缘裂缝形态演化特征

后缘裂缝在滑坡体内部的空间形态并不单一，受各种因素影响，主要表现为折线型、(倒)弧型和直线型。其中，折线型裂缝约占总数量的 1/2 以上。

各失稳滑段分别对应一条主裂缝，在主裂缝贯通过程中伴随着次生裂缝产生，级序越低，稳定性越差。坡体变形表现为自下而上逐级失稳，后一级滑块向前滑移，挤压前一级滑块，主次裂缝变浅或消失，表明坡体发生滑移。坡肩等变坡点位置受张拉作用易形成多条次生裂缝。

坡体厚度对后缘裂缝形态产生影响。厚度较大时，坡体后缘裂缝通常呈“倒弧型”；随着厚度减小，后缘裂缝逐渐发展为“折线型”；厚度继续减小，最终呈垂直坡面的“直线 + 半弧型”，如图 9 所示。坡厚增加引起坡体应力变化，导致坡脚附近较大范围的应力增加，故高边坡偏于不安全。



(a) No.4坡体厚度32.5 cm　(b) No.1坡体厚度27.5 cm

(c) No.5坡体厚度22.5 cm　(d) No.6坡体厚度17.5 cm

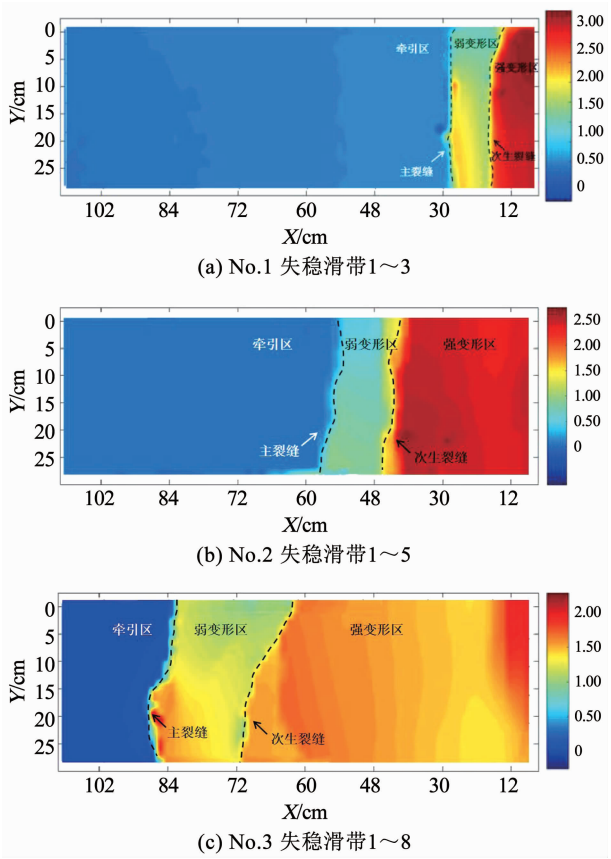
图 9　不同厚度坡体的后缘裂缝形态

Fig. 9　Shape of trailing edge fracture of slope with different thicknesses

2.4　坡面水平位移演化特征

由于复活型老滑坡存在既有滑动面，在滑动面分段贯通过程中，滑坡体也发展为多个块体。坡面的宏观变形迹象正是滑动面演化的结果，滑动面的演化过程直接影响着坡面位移的发展特征。基于 GeoPIV-RG 程序的分析手段，对滑坡体的坡面水平位移进行分析，研究库水位上升条件下的坡面位移演化模式，对不同失稳滑带长度下的坡面变形区域进行分析，将其分为坡面强变形区、弱变形区和牵引区。同时，建立坡面变形范围和失稳滑带长度之间的量化关系。研究发现，坡面变形为 1 ~ 1.5 倍的滑带失稳长度，可据此预测相应的滑带失稳范围。

图 10 分别展示了方案 1、2 和 3(No. 1、2、3)的第 1 级滑块坡面水平位移云图。No. 1、2 和 3 的失稳滑带分别对应渗透盒编号为 1－3、1－5 和 1－8 的滑带长度。可以看出，不同失稳滑带长度对坡面变形区域影响显著，随着失稳滑带的增加，坡面变形区域逐步增大。



(a) No.1 失稳滑带1～3

(b) No.2 失稳滑带1～5

(c) No.3 失稳滑带1～8

图 10 坡面水平位移云图

Fig. 10 Horizontal displacement cloud of the slope

在滑块变形发展过程中,同一级失稳滑块的坡面水平位移主要分为强、弱变形区和牵引区,强变形区的滑块变形较为剧烈。随着失稳滑带长度增加,No. 1、2 和 3 的强变形区最大位移值依次减小,分别为 3、2.5 和 2.0 cm。同一滑块内部各点变形速率不同,导致形成主、次两个子滑块,与坡面强、弱变形区相对应。

由于第 1 级滑块失稳,对后侧滑体产生影响,部分坡面产生变形,出现牵引区位移。失稳滑带长度对牵引区范围产生影响。随着失稳滑带的增加,坡面牵引区影响区域逐渐变小,No. 1 可以观测到较大的牵引位移值,影响区域为坡体长度方向 30 ~ 54 cm,变形约 0.5 cm;No. 2 的变形牵引范围很小,影响区域为 58 ~60 cm,变形值在 0 ~0.5 cm;No. 3 的坡面变形牵引范围几乎不可见。可知滑坡体破坏区域越小,坡面变形越剧烈,对后侧滑体变形程度影响越大,更容易牵引后侧坡体变形失稳。同时,位于牵引区和弱变形区之间的主裂缝和强、弱变形区之间的次生裂缝也在发生变化,呈现交替张开和闭合的现象,这与现场滑坡观测到的现象一致。

方案 4、5 和 6 分别为不同坡体厚度工况。通过对不同坡体厚度工况(No. 4、5、6)分析可知,因同一范围失稳滑块引发的坡面水平位移也分为强、弱变形区,对后侧稳定滑体同样产生牵引。在相同失稳滑带长度条件下,滑坡体厚度变大对坡面变形区域的影响较小,通常厚度越大,第 1 级滑块的坡面变形范围越小,对后侧滑坡体的牵引变形影响越小,更偏向于发生局部失稳破坏。

根据强、弱变形区和牵引区的位移变化特征可知,滑坡体的空间演化过程为自前向后发展的牵引滑动模式,即第 1 级滑带失稳,导致滑坡体产生第一条后缘拉裂缝,而后第 1 级滑块形成并向前滑移。该过程中,其水平位移值不断增加,牵引区位移也逐步变大,后侧滑坡体持续产生微小变形,直至第 1 级滑块趋于稳定,滑坡体表现为“牵引式破坏”的特征。因此,水平位移值可以作为滑坡体失稳模式的评价指标。

3 滑坡体失稳破坏模式

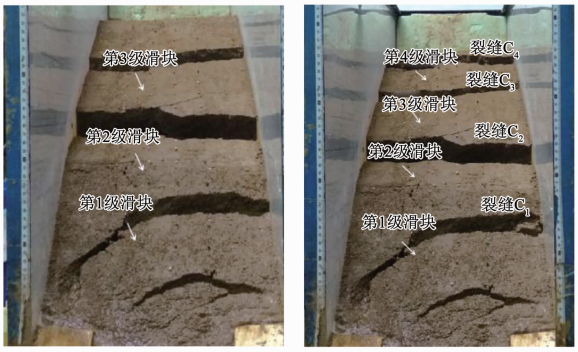
水库蓄水后老滑坡的抗滑段、部分主滑段,甚至整个滑坡体都被浸入水下。由于库水位的抬升,显著提高了岸坡中地下水的浸泡和浸润范围,导致老滑坡滑动带的软化区域不断增大,抗剪强度迅速降低,潜在滑面逐渐发展贯通,呈现出典型的牵引式发展模式。

在充分认识库岸老滑坡失稳机制的基础上,主要针对老滑坡的既有滑带易诱发滑坡复活的特性,模拟库水位上升过程中滑坡体的渐进失稳过程,各级滑块变形特征如图 11 所示。首先向坡脚处滑带土匀速注水,滑带土浸水软化,产生不均匀沉陷,坡面附近拉应力集中,在失稳滑带末端后上方坡面出现后缘拉裂缝,变形模式以蠕滑拉裂为主。随着注水量增加,坡脚处土体浸水软化,阻滑力降低,率先发生局部破坏。此后,滑带土趋于饱和,剪切带迅速发展,后缘拉裂缝也不断贯通,逐渐由局部破坏变为整体破坏,第 1 级滑块失稳,如图 11(a)和 11(b)所示。而后继续向后侧滑带土注水,逐渐形成各级滑块,如图 11(c)、11(d)和 11(e)所示。

目前,库水复活型老滑坡发生牵引式滑移的现场实例众多。三峡库区杉树槽滑坡[24]的发生和水库长期蓄水以及滑前水位快速上升有关。杉树槽滑坡发生在三峡水库水位从 145 m 上升到 175 m 的蓄水阶段,变形区域主要分为主滑区和土质牵引区,如图 12 所示。图 13 为三峡库区胡家沱滑坡[25]的最终破坏形态。受蓄水影响,强变形区加剧,牵引后侧滑坡体持续变形。两个滑坡实例均表明,库水上升易引发滑坡体发生牵引式滑动破坏,变形区具有较明显的分区特征,与本文滑坡体发生分级失稳且牵引后侧滑体前移的试验特征相吻合。



(a) 坡脚失稳　(b) 第1级滑块形成　(c) 第2级滑块形成



(d) 第3级滑块形成　(e) 第4级滑块形成

图 11　库水复活型老滑坡分级演化特征

Fig. 11　Grading evolution characteristics of reservoir-reactivated old landslide





(a) 滑坡全貌　(b) Ⅱ区滑坡体分级滑块

图 12　杉树槽滑坡变形失稳特征

Fig. 12　Deformation instability characteristics of Shanshucao landslide

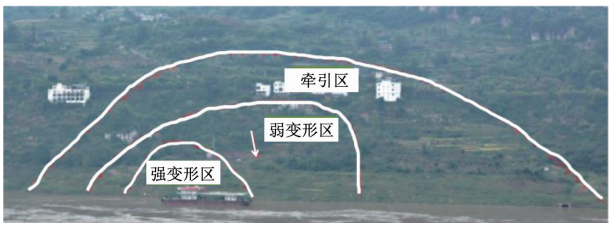


图 13　三峡库区胡家沱滑坡

Fig. 13　Hujiatuo landslide in the Three Gorges Reservoir area

综合分析认为，库水复活型老滑坡的破坏机制主要表现为拉-剪共同作用。当库水位上升，滑坡体局部浸水，前缘滑带饱水弱化，抗剪强度逐渐降低，形成一段剪切破坏带，即滑带土主要发生剪切破坏。而后滑带蠕滑变形，滑坡体发生应力重分布，导致坡面附近拉应力集中，产生后缘拉裂缝，形成拉破坏区。随着塑性区范围不断扩大，拉剪裂缝相互扩展，直至形成贯通滑裂面，第 1 级滑体整体滑动。拉剪混合作用区主要分布在坡体中部区域，若尚未形成贯通滑裂面，边坡不发生整体滑动，但会形成含有巨型拉裂缝以及剪切破碎区的动平衡。库水位不断上升，逐渐引发后侧滑坡体逐级失稳，最终呈渐进牵引破坏模式。

4　结　论

1）滑带土强度衰减与滑坡体变形具有良好的相关关系。滑带土饱水后抗剪强度大幅度下降是老滑坡复活的重要条件。滑动面处的孔压变动是激发老滑坡复活的重要诱因。滑带处孔隙水压力的增大与滑坡位移的增大是同步发生的。孔压迅速上升导致滑坡体累积变形达到临界状态，引发滑坡体破坏。而后，随着孔隙水压力的逐渐消散，变形滑块滑动一段距离后趋于稳定。

2）后缘破裂面倾角均为小于 90°的陡倾角，主要分布在 65°～90°，位于 80°～90°的约占半数。随着失稳滑带长度增加，后缘面倾角逐渐减小。随着坡体厚度减小，相应滑块的后缘面倾角逐渐变大。

3）不同失稳滑带段分别对应单条裂缝，某段滑带失稳，其对应坡面只观测到一条裂缝与其对应。这种现象与实际滑坡中的主裂缝类似，受模型尺寸影响，次级裂缝发育并不显著。

4）后缘裂缝在滑坡体内部的空间形态并不单一，主要表现为折线型、（倒）弧型和直线型的裂缝形态，其中折线型破裂面形态占半数以上。

5)同一级失稳滑块的坡面水平位移可分为强、弱变形区和牵引区,强变形区位移值最大。随着失稳滑带长度增加,坡面变形区域增大,对后侧稳定坡体的牵引变形影响变小。坡面变形为 1 ~ 1.5 倍的失稳滑带长度。

6)库水复活型滑坡的破坏机制主要表现为拉-剪共同作用机制。滑带土主要发生剪切破坏,坡面附近通常形成拉应力破坏区,滑坡体中部区域主要为拉剪混合作用区。库水位上升,易导致老滑坡发生牵引式滑动破坏。

参考文献

[1]黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433
HUANG Runqiu. Large-scale landslide and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(3): 433. DOI:10.3321/j.issn:1000 - 6915.2007.03.001

[2]WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping Landslide, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2004, 1(2): 157. DOI:10.1007/s10346 - 004 - 0020 - 6

[3]GENEVOIS R, GHIROTTI M. The 1963 Vaiont Landslide[J]. Landslides Types, 2005, 1(1): 41

[4]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
LI Shaojun, KNAPPETT J A, FENG Xiating. 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. DOI:10.3321/j.issn:1000 - 6915.2008.08.007

[5]贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798
JIA Guanwei, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798. DOI:10.3321/j.issn:1000 - 6915.2009.09.009

[6]肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1023
XIAO Shirong, LIU Defu, JIANG Fuxing, et al. Geomechanical model experiment on Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1023

[7]孙立娟, 杨涛, 成启航, 等. 牵引式滑坡渐进形成历程试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 762
SUN Lijuan, YANG Tao, CHENG Qihang, et al. Experimental study on course of processive formation of retrogressive landslide[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 762. DOI:10.3969/j.issn.0258 - 2724.2018.04.014

[8]International Commission on Large Dams. Committee on reservoir slope stability reservoir landslide: investigation and management[R]. Paris: International Commission on Large Dams (ICOLD), 2002

[9]张玉成, 杨光华, 张有详, 等. 古滑坡滑带土的力学特性与库水位变化对其稳定性影响及加固措施[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 43
ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Youxiang, et al. Influence of mechanical properties of sliding zone and water level changes on ancient landslide stability and its reinforcement measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 43

[10]陈晓平. 基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 77
CHEN Xiaoping. Over-view of landslides due to reservoir impoundment based on shear strength properties of sliding zone soils[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 77. DOI:10.3880/j.issn.1006 - 7647.2010.03.020

[11]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
ZHOU Yuntao, CHEN Hongkai, ZHANG Yong, et al. Failure of super-huge landslide in collapsed debris deposits with nearly horizontal sliding surface induced by excess pore water pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 732

[12]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
MIAO Haibo, YIN Kunlong, WANG Gonghui. Dynamic mechanism of intermittent reactivation of deep-seated reservoir ancient landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2645

[13]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, 2010
ZENG Yao. Research on the mechanism of groundwater in reactivating of old landslides onreservoir bank[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010

[14]王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1
WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Centurial achievements of engineering geology in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1

[15]罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2476
LUO Xianqi, LIU Defu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2476

[16]王明华, 晏鄂川. 水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 27(12): 2722
WANG Minghua, YAN Echuan. Study on influence of reservoir water impounding on reservoir landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 27(12): 2722. DOI: 10.3969/j.issn.1000 - 7598.2007.12.046.

[17]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
CHEN Xiaoping, HUANG Jingwu, WU Hongwei, et al. Centrifugal model tests on ancient bank landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1496

[18]周跃峰, 龚壁卫, 胡波, 等. 牵引式滑坡演化模式研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1855
ZHOU Yuefeng, GONG Biwei, HU Bo, et al. Evolution mode of retrogressive landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1855. DOI: 10.11779/CJGE201410013

[19]滕帅, 王世梅, 余文鹏. 三峡水库水位升降对土质岸坡塌岸力学影响机制研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 127
TENG Shuai, WANG Shimei, YU Wenpeng. Research on mechanical mechanism of soil slope bank collapse for Three Gorges Reservoir under water level fluctuation condition[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 127

[20]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
TANG Minggao, LI Songlin, XU Qiang, et al. Study of deformation characteristics of reservoir landslide based on centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 755

[21]WHITE D J, TAKE W, BOLTON M. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammery[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 619. DOI:10.1680/geot.53.7.619.37383

[22]STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical application[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(5): 727. DOI: 10.1139/cgj - 2015 - 0253.

[23]四川南江水文地质队, 成都地质学院工程地质研究室. 孔隙水压力导致滑坡复活的一个典型实例: 四川云阳鸡扒子滑坡的形成机制和稳定性分析[J]. 地质学报, 1985, 2: 172
Nanjiang Hydrogeological Party of Sichuan Province and Engineering Geological Research Section of Chengdu College of Geology. A typical case history of landslide revival induced by pore pressure: mechanism and stability analysis of the Jipazi landslide, Yunyang, Sichuan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 1985, 2: 172

[24]喻章. 杉树槽滑坡滑带土强度衰减特性及失稳机理研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2018
YU Zhang. Study on strength attenuation characteristics of slip soil and failure mechanism of Shanshucao Landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018

[25]李首位. 三峡库区胡家沱滑坡复活机制及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016
LI Shouwei. Research on revival mechanism and stability of Hujiatuo landslide in the Three Gorges Reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016

(编辑 刘 彤)