

卢应发, 胡峰, 吴京戎. 基于物理模型试验的库水下降与暴雨作用下滑坡破坏机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 270-282. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.020

LU Yingfa, HU Feng, WU Jingrong. Model test of landslide of hanging rock wall under the action of reservoir water and rainstorm[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 270-282. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.020

# 基于物理模型试验的库水下降与暴雨作用下 滑坡破坏机理研究

卢应发<sup>1</sup>, 胡峰<sup>1</sup>, 吴京戎<sup>2</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 工程技术学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 【目的】三峡库区水位变化与降雨是滑坡发生的主要原因, 为探究库区滑坡在库水下降与暴雨耦合作用下的变形与破坏机理。【方法】以吊岩壁滑坡为原型构建 1: 87 缩尺物理模型, 通过布设孔隙水压力、土压力以及位移传感器来监测滑坡内部应力变化以及变形过程。设置 5 种工况, 进行两阶段加载试验, 结合岩土体数值模拟软件建模, 通过极限平衡法构建吊岩壁滑坡稳定性评价模型。【结果】结果显示: 暴雨诱发滑坡滑体孔隙水压力增幅达到 126.7%, 显著高于单一水位骤降工况下的水压力值; 土压力在滑坡不同位置呈现不同变化, 前缘水位骤降导致土压力值由 3.5 kPa 降至 2.84 kPa, 中上部暴雨荷载的施加引发土压力值由 2.02 kPa 增至 2.83 kPa; 位移监测显示工况 5 累计位移量达到 0.848 m, 是单一水位工况下的 5.65 倍; 根据数值模拟结果, 通过贡献度计算得出库水位下降对稳定性的影响比重为 48.6%, 暴雨作用对稳定性的影响比重为 51.4%。【结论】结果表明: 库水位骤降主导滑坡稳定性劣化, 通过渗透压力梯度诱发前缘牵引破坏; 暴雨作用加剧滑带软化, 驱动后缘推挤变形。二者耦合产生链式破坏效应, “175 m 降至 145 m 水位骤降+暴雨” 工况安全系数降幅达 8.1%, 为最不利工况。

**关键词:** 吊岩壁滑坡; 孔隙水压力; 库水位骤降; 暴雨耦合; 模型试验; 数值模拟; 渐进破坏; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.020

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0270-13



听语音  
聊科研

## Model test of landslide of hanging rock wall under the action of reservoir water and rainstorm

LU Yingfa<sup>1</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, WU Jingrong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China; 2. College of Engineering and Technology, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China)

**Abstract** [Objective] Water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area and rainfall are recognized as major triggers of

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-24; 录用日期: 2024-04-24; 网络出版日期: 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(59035679); 2002年高等学校博士学科点专项科研项目(20020183061)

作者简介: 卢应发(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土力学研究。E-mail: lyf77@126.com

通信作者: 吴京戎(1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 864877562@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

landslides. To investigate the deformation and failure mechanisms of reservoir landslides under the coupled effects of reservoir drawdown and heavy rainfall, [Methods] a 1: 87 scaled physical model of the Diaoyanbi landslide was constructed. Changes in internal stress and deformation processes within the landslide were detected using pore water pressure sensors, soil pressure sensors, and displacement sensors. Five scenarios were designed, and a two-stage loading test was conducted, combined with numerical modeling using geotechnical simulation software. A stability evaluation model for the Diaoyanbi landslide was established based on the limit equilibrium method. [Results] The result indicated that heavy rainfall increased the pore water pressure within the sliding body by 126.7%, significantly exceeding the water pressure under single rapid drawdown scenarios. Soil pressure exhibited varying changes across different positions of the landslide; at the front edge, rapid water drawdown reduced the soil pressure from 3.5 kPa to 2.84 kPa, while in the middle-upper section, rainfall loading increased the soil pressure from 2.02 kPa to 2.83 kPa. Displacement monitoring revealed that cumulative displacement under Scenario 5 reached 0.848 m, 5.65 times greater than that of the single water drawdown scenario. Numerical simulations showed that the influence of reservoir drawdown on stability accounted for 48.6%, while the impact of heavy rainfall accounted for 51.4%. [Conclusion] The findings demonstrated that rapid reservoir drawdown predominantly deteriorates landslide stability, inducing frontal traction failure through the gradient of seepage pressure, while rainfall intensifies shear band softening and drives rear-edge push deformation. The coupling of these factors produces a chain failure effect, with the safety factor under the “175 m to 145 m water level drawdown + heavy rainfall” scenario decreasing by 8.1%, representing the most adverse condition.

**Keywords:** Diaoyanbi landslide; pore water pressure; rapid reservoir drawdown; rainfall coupling; model test; numerical simulation; progressive failure; rainfall

## 0 引言

滑坡对水具有极其敏感的特征,三峡水库库岸滑坡存在复活迹象,自水库运营以来,库区沿线存在几百处古滑坡复活。据统计,三峡库岸滑坡确切数量为4 683处,其中典型的泥灰岩涉水滑坡占据2 000多处,未统计进行治理的边坡数量更达一千多处,其中大型泥灰岩涉水滑坡占据400多处<sup>[1]</sup>。这一现象严重威胁到沿库区周遭人民生命财产安全,近些年期间三峡库区滑坡造成的人员伤亡高达24人,倒塌房屋建筑共计346间,工业设备以及农田损毁多处,造成的经济损失高达5 375万元<sup>[2-3]</sup>。三峡库区水库水位涨落的特殊性是滑坡发生的重要因素之一,库区水位一年内的周期性变动导致库岸边坡反复受到浸泡风干循环,进而引发土壤物理参数变化,其抗压强度、黏聚力、摩擦角等关键强度参数呈渐进性、非均匀性弱化<sup>[4]</sup>。降雨作为影响滑坡稳定性的又一个关键因素,雨水渗入使得坡体含水率显著增大,进而对坡体造成多方面影响。雨水入渗导致土壤重度增大,进而导致其下滑力增大。同时降雨作用显著降低滑带土的抗剪强度,使得土体黏聚力强度和内摩擦角参数均有下降<sup>[5]</sup>。持续降雨在滑带形成饱和的渗流带,孔隙水压力的增大削弱岩土体的结构强度,随着降雨强度和时间的增加,滑体位移显著加速且安全系数骤降<sup>[6]</sup>。库水位骤降与暴雨耦合作用是库岸滑坡失稳的主要诱因,但二者动态交互机

制、多物理场参数协同作用及链式破坏过程仍缺乏系统性认知。因此对库水位变化和降雨耦合作用的研究具有重要的意义。

研究人员对库水位变化与降雨对滑坡稳定的影响进行了大量的研究。研究方法之一为数值方法,如冯彦等有<sup>[7]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件建立某水库模型,分析库水位上升阶段、蓄水阶段、水位下降阶段3种工况下库岸边坡孔隙水压力、渗流速率、安全系数的变化规律,提出库水位下降阶段的安全系数下降速率与水位下降速率呈正相关关系。王伟等<sup>[8]</sup>基于GIS与Scoops 3D软件,通过数值模拟方法研究库水位变动与降雨因素下的三维斜坡稳定性变化情况,分析坡体在耦合作用下的稳定性变化。PENG等<sup>[9]</sup>基于数值分析方法,通过对三峡库区刁嘴岩质边坡进行现场勘查测绘,建立三维数值模型,通过SRM强度折减法分析危岩体的崩塌过程,通过三维分析方法,优化边坡二维计算中的结果失真问题。XUE等<sup>[10]</sup>通过现场采样土壤数据,通过数值分析方法反演土壤变形过程,早期通过反演分析方法对土体进行分析。HOU等<sup>[11]</sup>通过有限元分析方法,建立龚家村滑坡模型,利用Geostudio和Bishop法对边坡进行稳定性分析,利用先进的有限元计算方法对滑坡进行计算。TANG等<sup>[12]</sup>基于非饱和渗流理论提出将孔隙水压力的初始条件纳入边坡的新型数值分析方法。TONG等<sup>[13]</sup>利用有限元数值分析方法,以平邑口滑坡为工程实例建立富水斜坡模型,采用非饱和渗流分析方法对滑坡变

形过程以及成因进行系统的模拟分析,增加了控制参数以具体观测滑坡破坏的影响因素。研究方法之二为模型试验法:胡华等<sup>[14]</sup>、胡修文等<sup>[15]</sup>、李邵军等<sup>[16]</sup>、JIA等<sup>[17]</sup>、LUO等<sup>[18]</sup>通过模型试验研究水库水位涨落对库岸滑坡变形机理,其方法通过位移数据分析滑坡变形方式,但单一因素难以全面描述滑坡的破坏模式,苗发盛等<sup>[19]</sup>通过模型试验分析结果得到地下外渗的动水压力是造成牵引式滑坡发生的主要诱因。汤明高等<sup>[20]</sup>对滑坡模型进行库水水位升降的模拟试验,揭示了相似类型的库岸滑坡后部变形机理。FAN等<sup>[21]</sup>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。李松林等<sup>[22]</sup>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。LING等<sup>[23]</sup>、YANG等<sup>[24]</sup>运用模型试验研究滑坡在降雨作用下的变形失稳过程,并分析灾变机制。TOHARI等<sup>[25]</sup>、李卓等<sup>[26]</sup>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。ZHANG等<sup>[27]</sup>利用离心机设备模拟降雨对滑坡的影响,获得了黏土边坡在降雨条件下的变形规律。陈晓平等<sup>[28]</sup>在古滑坡含有可塑变形面的基础上,利用试验分析证实了滑坡蠕变演化趋向挡墙底部支撑有利于增加其稳固的效应的现象。潘皇宋等<sup>[29]</sup>认为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,他们发现开挖和降雨对折线型滑面大型古滑坡的影响导致了分级分块的滑动变形破坏特征。

库区滑坡失稳通常是库水位波动与极端降雨耦合作用的结果,现有研究在两种因素动态耦合机制上、多场参数协同作用方面仍有不足,本研究通过构建库水位变化与暴雨耦合作用的滑坡试验模型体系,采用滑体、滑带、滑坡多维度立体监测体系,同步获取在耦合作用下的滑坡应力、位移、孔隙水压力、位移速率、位移加速度参数,实现多参数同步监测,优化传统单剖面监测结果的局限性。通过物理模型试验再现滑坡从前缘滑移—临空面形成一次级滑动面贯通的链式渐进破坏的全过程,计算滑坡稳定性系数,揭示库水位以及降雨变化下滑坡破坏趋势的规律,为三峡库区滑坡多场预警模型构建提供关键参数,完善涉水边坡工程安全设计标准。

## 1 滑坡概况及模型试验

### 1.1 滑坡概况

吊岩壁滑坡地处长江北岸秭归县茅坪镇庙河村二组,距三峡大坝 17 km,地理坐标为东经 110°52′27.5″、

北纬 30°54′00″。滑坡前缘直抵长江水面,后缘以北为 35°~40°基岩陡崖,整体呈舌状展布,主滑方向为 170°,南北纵长 620 m,东西宽 300 m,平均厚度为 30 m,体积约 560×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。从工程地质平面图(见图 1)可见,滑坡体被中部冲沟分为东西两区,西侧为主滑体,东侧边界以冲沟与山脊为界,地形特征与剖面图(见图 2)中显示的高程 185 m 以下前缘陡坡(30°~35°)、中部缓坡(5°~8°)及后缘稍陡地形(13°~15°)形成对应。西侧滑体以灰岩块石为主,块石粒径普遍达 1 m,碎石占比 10%~50%,属松散堆积结构;东侧滑体则受冲沟切割影响,表层覆盖较薄碎石土。滑带土为浅灰色粉质黏土夹强风化灰岩碎石,呈软塑状,土石比 8:2,滑坡水文地质条件受库水位周期性波动,前缘 40 m 范围常年受库水浸泡,中部冲沟在雨季形成地表径流通道。

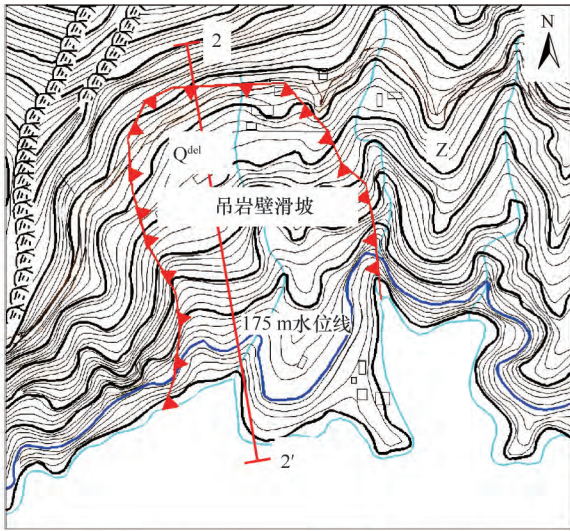
### 1.2 模型试验

#### 1.2.1 模型剖面概化

为探究吊岩壁滑坡的变形机理,在吊岩壁地质平面图(见图 1)中 2-2′ 剖面线大体垂直于等高线,剖切线方向代表滑坡运动方向,故取 2-2′ 剖面线作为概化整体模型的剖面。图 2 中 A1、A2、A3 代表吊岩壁滑坡实际工程中监测墩布置位置。根据工程地质剖面图(见图 2)进行模型概化,将模型分为滑带、滑体、滑床三个部分。根据滑坡长度 620 m,试验仪器平台纵长 9 m,考虑到模型滑坡长度为平台纵长减去蓄水池宽度,计算后约得出模型滑坡长度为 7.1 m,最终确定模型的相似比为 1:87。在库水位达到 175 m 时,根据滑坡前缘与后缘高程分布,滑体淹没在水下的长度达到 40 m,深度达到 16 m。尽管滑坡模型中初始条件下的库水位升降淹没范围相对有限,但库水位变化通过改变滑带区域的孔隙水压力分布,显著影响滑坡的破坏特性,其具体表现为:一是库水位变化引起的渗透压力梯度在滑坡前缘形成了附加应力场,削弱滑带与滑床的接触强度;二是即使淹没范围较小,水位下降速率导致的渗透滞后效应仍然会诱发滑坡前缘失稳。因此库水位升降对滑坡的影响作用不可忽视,其对滑坡整体稳定性的影响研究具有重要意义。

#### 1.2.2 物理参数概化

由概化模型与滑坡原型比例 1/87 确定吊岩壁滑坡概化后滑坡物理参数,滑坡原型滑带土、滑体土根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[30]</sup>的相关规定试验系列土工方案测得滑坡原型土参数,通过



图例 Z 震旦系地层 Q<sup>del</sup> 滑坡堆积物 60° 地层产状  
 滑坡边界 剖面线及编号

图1 吊岩壁滑坡地质平面

Fig.1 Geological plan of the hanging rock wall landslide

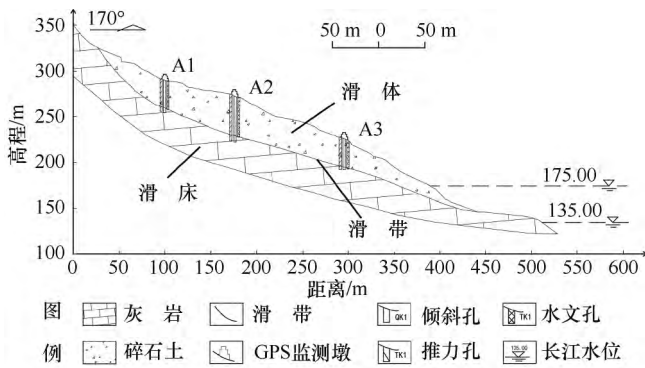


图2 秭归县吊岩壁滑坡2-2'工程地质剖面

Fig.2 Hanging rock wall landslide 2-2' engineering geologic profile in Zigui County

确定的原型材料物理参数, 采集相似材料并通过相关概化试验<sup>[31-32]</sup>确定相似材料的物理参数, 根据综合相似理论, 模型几何相似比  $C_L = 87$ , 密度相似比

$C_p = 1$ , 重力加速度相似比  $C_g = 1$ , 应力相似比  $C_\sigma = C_L \cdot C_p \cdot C_g = 87$ , 时间相似比  $C_T = \sqrt{C_L} = 9.33$ , 渗透系数相似比  $C_K = \sqrt{C_L} = 9.33$ , 降雨强度相似比  $C_q = C_L / C_T = 87 / 9.33 \approx 9.33$ 。相似材料选择双飞粉、重晶石粉、重晶砂、河砂、水作为原材料制作滑体、滑带相似材料。原型材料与相似材料的具体基本相似比参数如表1所列。针对模型材料因浸水导致的毛细现象, 在模型表面喷涂低渗透系数的毛细阻滞防渗层<sup>[33]</sup>以控制毛细水引起的试验误差, 根据同类研究<sup>[34-35]</sup>发现, 模型黏聚力误差对滑坡破坏模式影响较弱, 内摩擦角  $\varphi_m = \varphi_p$  ( $m$ 下标为相似模型值,  $p$ 下标为实际原型值) 是控制变形特征的关键。按照1/87相似比设计能够准确反映原型滑坡的力学响应特征。黏聚力相似比虽导致模型材料表观强度降低, 但其通过内摩擦角一致、渗透系数匹配及时间相似律协同作用, 确保了破坏机制的空间形态与时间进程的严格相似性。

本文主要研究在库水下降及暴雨作用下吊岩壁滑坡变形形式, 将库水条件及暴雨条件作为人为控制的边界条件施加于滑坡模型中。本试验仪器附加的顶部喷水设施作为施加于滑坡模型顶部的暴雨边界条件, 右侧供水蓄水装置作为滑坡右侧的水位边界条件。结合相关地区的历年降雨资料以及相关地区成灾降雨概率分布函数<sup>[36-37]</sup>得出50 a一遇降雨是作为暴雨强度边界条件值的最优概化雨型, 其降雨强度达到连续三天156 mm/d; 库水下降以最大2 m/d的缓降速度进行, 其缓降至145 m水位预计时长15 d。由选定的边界条件值通过概化理论及几何相似比确定该模型中模拟一天时长为

$$T_{1d} = 24 / \sqrt{87} = 2.57h \quad (1)$$

### 1.2.3 试验仪器

为模拟吊岩壁滑坡发生水库下降和降雨作用, 试验采用一套附加降雨模拟以及供水蓄水的物理模型试验仪器, 试验系统如图3所示。该系统通过一组水

表1 原型材料与相似材料物理参数

Table 1 Physical parameters of prototype and similar materials

类别	物理参数	单位	原型值 $p$	相似比	相似值 $m$
滑带	强度参数 $C$	kPa	14.7~24.4	87	0.168~0.280
	内摩擦角 $\varphi$	°	12.9~22.2	1	12.9~22.2
滑体	强度参数 $C$	kPa	9.7~13.5	87	0.111~0.155
	密度 $\rho$	$g \cdot cm^{-3}$	2.11~2.24	1	2.11~2.24
	渗透系数 $k$	$cm \cdot s^{-1}$	0.00062~0.031	9.3	$6.66 \times 10^{-5} \sim 3.33 \times 10^{-3}$
	弹性模量 $E$	MPa	10~27.5	87	0.114~0.316
	泊松比 $\mu$		0.10~0.22	1	0.10~0.22

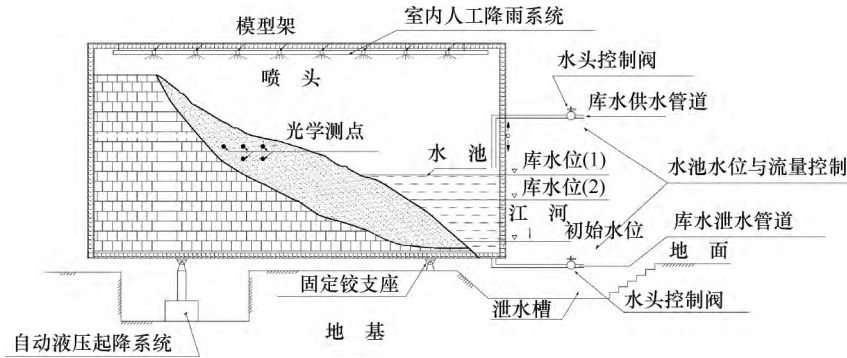


图3 滑坡模拟物理试验仪器示意

Fig. 3 Schematic diagram of the physical test apparatus for landslide simulation

头控制阀分别控制库水供水管道与库水泄水管道来完成水库的蓄水和泄水过程。通过对同种类型试验装置<sup>[37-39]</sup>进行雨滴粒径分布与速度调整,在模型架顶部通过自研的一套室内人工降雨系统来模拟降雨变化。

### 1.2.4 监测点布置

在监测点布置环节,为了更全面监测到吊岩壁滑坡内部变化,在滑坡模型内设置 I、II、III 观测剖面并布置孔隙水压力传感器、土压力传感器。在典型剖面 I 的滑体中部布置光学位移传感器,在剖面 I、II 处坡体表面放置拉线式位移传感器,土压力传感器埋于滑体土中部,孔隙水压力传感器埋于滑带处,监测点布置位置如图 4 所示。

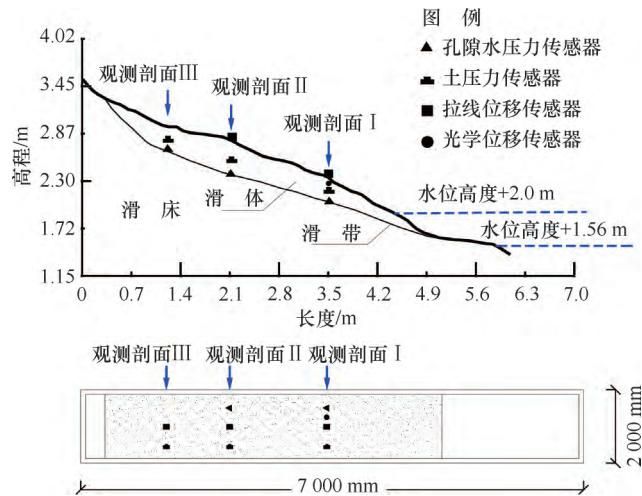


图4 吊岩壁监测点布置侧视与俯视

Fig. 4 Side and top views of hanging rock wall monitoring point arrangement

### 1.2.5 工况设置

三峡水库地处降雨充沛地区,且库水位常年在 145~175 m 之间周期性波动,导致消落带内岩土体材料在不断地经历干湿循环变化<sup>[40-42]</sup>,根据三峡水库

汛期运作方式的相关研究<sup>[43]</sup>,本试验在库水位变化上选取 175 m 缓降至 145 m 和 162 m 缓降至 145 m 作为不同水位变化工况。在不同水位变化工况上施加暴雨条件作为对降雨作用下滑坡变形影响因素的研究。为探究降雨与库水下落对滑坡破坏时滑坡内部变形形式,10°作为比较接近实际滑坡失稳倾角范围,另设置一组 10°倾斜和暴雨工况作为破坏阶段的工况组合,具体工况组合如表 2 所列。

表2 模型试验工况组合

Table 2 Model test condition combinations

研究阶段	工况组合	
第一阶段	工况 1	162 m 水位至 145 m 水位
	工况 2	162 m 降至 145 m 水位+暴雨
	工况 3	175 m 水位
	工况 4	175 m 降至 145 m 水位
	工况 5	175 m 降至 145 m 水位+暴雨
破坏阶段	模型倾斜 10°+175 m 降至 145 m 水位+暴雨	

## 2 监测结果

### 2.1 各工况下孔隙水压力监测结果

滑坡内孔隙水压力与水位下降具有复杂的耦合关系,水位下落速度和滑坡内部水渗透作用具有一定的迟滞性,滑坡内的孔隙水压力影响速率较慢,即使水位下落至 145 m 的时候滑坡内部的孔隙水压力稍微下降。根据图 5(a)(c) 中的数据分析得出,当库水缓降至 145 m 的过程中滑坡内孔隙水压力值并没有发生显著变化,第一剖面孔隙水压力值下降幅度 0.02 kPa,第二剖面孔隙水压力下降幅度 0.005 kPa,第三剖面孔隙水压力没有显著变化。

当施加暴雨作用时,如图 5(b)(d) 所示,滑坡内土壤孔隙被大量雨水渗入填充并在滑坡内部快速产生孔隙水压力,降雨快速在滑坡渗透性差的部位积累,加剧滑坡破坏变形的发生。在三日降雨依次施加时,第三剖面由于地形较高,更快响应降雨影响,因滑坡下部具有滞后性,滑坡上部孔隙水压力短时间内大于第二、第一剖面,但随着时间积累滑坡下部积累水分更多,导致第一剖面上孔隙水压力升高蓄水更多。工况 5 由于水位下降幅度比工况 2 大 10 m,滑坡前缘浸入水中部分遭受渗水时间更久,在第三天的滑坡孔隙水压力达到最大值 1.28 kPa,相比工况 2 的孔隙水压力增加 0.52 kPa,相比未降雨工况下的孔隙水压力值提升了 1.03 kPa。综上分析孔隙水压力受到水

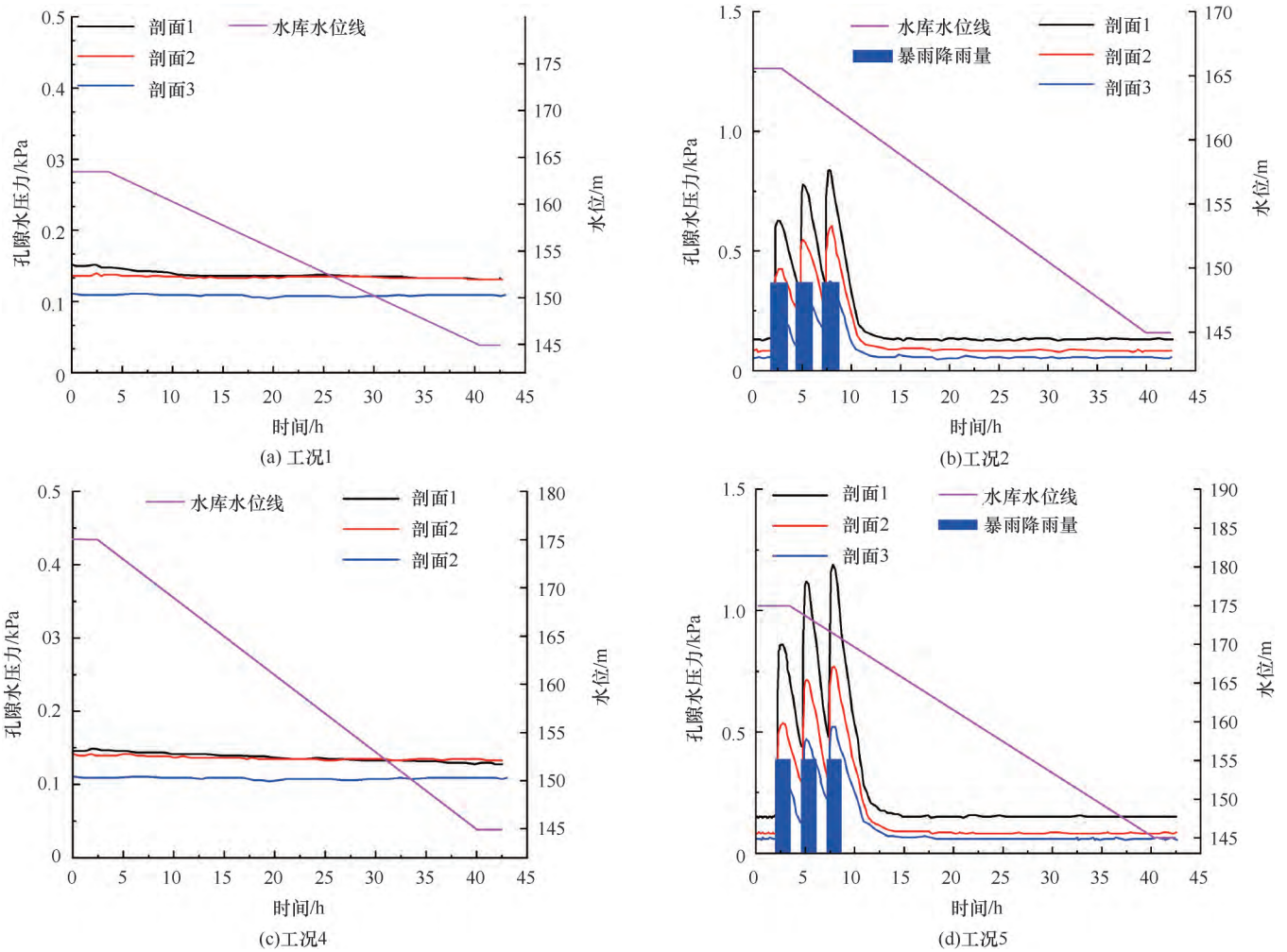


图5 各工况下孔隙水压力变化

Fig. 5 Variation of pore water pressure under various working conditions

位下降影响不明显, 对于降雨影响敏感度高、响应快。

## 2.2 各工况下土压力监测结果

如图6所示, 土压力数值在库水位下降过程中呈现反复波动现象, 其机理在于水位变化与滑坡体内部的渗透压力、土体的重力作用及孔隙水压力等因素的交互作用。当水位下降时, 土体受到的有效应力会发生变化, 导致土压力的波动。例如, 水位迅速下降时, 滑坡前缘的渗透压力梯度可能会发生剧烈变化, 这会导致土体的强度波动, 从而表现为土压力的周期性增减。根据各工况的数据对滑坡内部土压力进行分析: 在工况1、工况4下水位下降导致滑坡内部有效应力增大, 如图6(a)(d)所示, 滑体上部的监测点(剖面3)土压力值由1.72 kPa快速上升至2.02 kPa, 表现为快速响应水位变化, 滑体中间部分(剖面2)土压力随水库水位下降有效应力增加, 由2.81 kPa升至3.02 kPa。滑坡下部(剖面1)水位下降导致滑坡内

浸入水重力减少<sup>[25]</sup>, 滑坡下部土压力值先减小至3.10 kPa, 随后由于土体有效应力增大, 土压力值由3.10 kPa升至3.60 kPa。在工况2下水位下降同时耦合暴雨作用结果, 如图6(b)所示, 滑坡因降雨作用孔隙水压力加剧土体重量上升, 土压力快速响应降雨作用, 在图6(b)中表现为滑坡各监测剖面上土压力值迅速上升, 剖面1土压力值由初始值3.50 kPa快速升至最大值4.40 kPa; 剖面2土压力值由2.73 kPa上升至3.31 kPa; 剖面3土压力值由1.87 kPa上升至2.01 kPa。降雨影响过后滑坡土体内孔隙水及土体流失, 各剖面土压力值随土体重力下降而减少, 待滑坡内水分流失, 土体有效应力增大, 土压力值呈缓慢增长趋势。如图6(c)所示, 在工况3下水库水位线不变, 各剖面土压力值变化不明显。如图6(e)所示, 在工况5下滑坡土压力值由初始值4.27 kPa快速升至最大值4.90 kPa。降雨过后滑坡土体内孔隙水及土体流失, 土压力值伴随土体重力

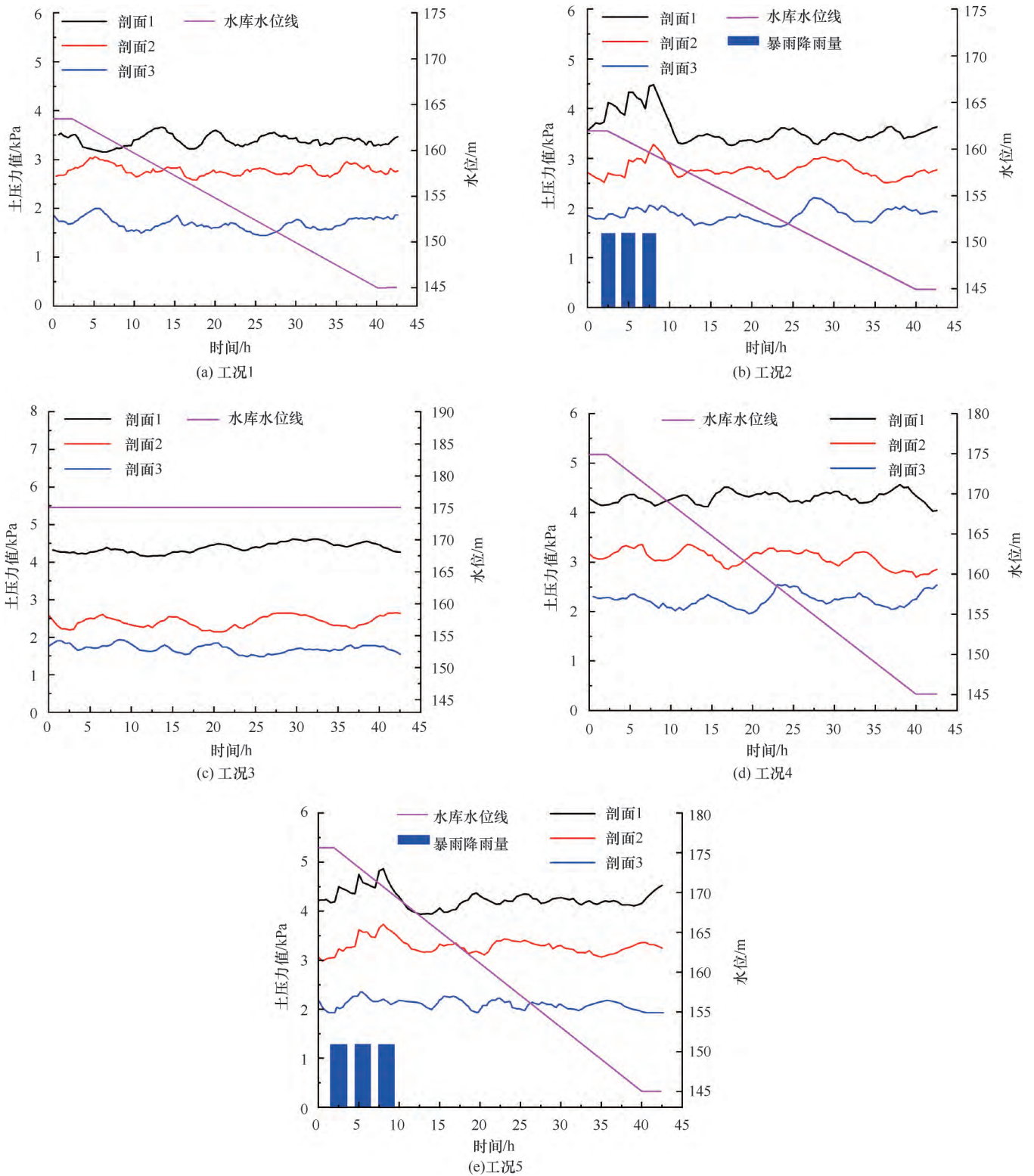


图6 各工况下土压力变化

Fig. 6 Discounted soil pressure change for each working condition

下降而减少, 由最大值 4.90 kPa 减少到 3.98 kPa。综上分析, 水库水位下降与暴雨作用对滑坡土压力的影响是相互耦合、相互作用的复杂过程, 5 种工况中高水位下降与暴雨作用是对滑坡内部土压力变化影响

最剧烈的因素, 两者同时发生时库水滑坡的稳定性安全风险最高。

### 2.3 剖面 1 下各工况位移监测结果

取典型观测剖面 1 处拉线位移监测数据进行分

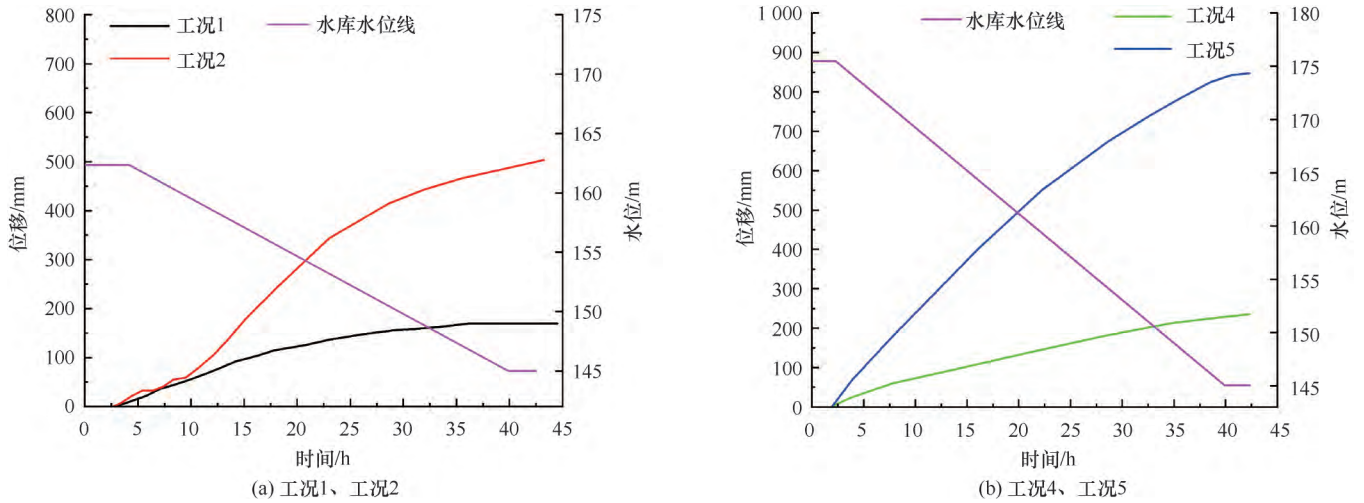


图7 各工况下位移变化

Fig. 7 Line graph of displacement change under each working condition

析。如图7(a)所示, 工况1下库水位由162 m下降到145 m时, 滑坡位移总量为0.15 m 整体呈现局部滑移, 其机理在于水位缓降起初, 滑坡前缘土压力由3.50 kPa 降至3.11 kPa, 滑坡浮托力减小导致的前缘牵引式位移。同时滑带孔隙水压力下降幅度小, 渗透滞后效应显著, 滑带软化未完全发展。工况2下库水位由162 m 降至145 m 耦合暴雨作用时, 滑坡累计位移量达到0.5 m, 滑坡整体发生滑移, 其机理在于暴雨入渗使滑体孔隙水压力由0.25 kPa 增至0.57 kPa, 滑带土有效应力下降, 同时滑坡后缘土压力由2.02 kPa 增至2.83 kPa, 后缘形成推力的同时与前缘受拉作用协同, 使得滑坡整体受到前拉后推的破坏模式。当水库水位由175 m 下降至145 m 时, 如图7(b)所示, 工况4下滑坡整体发生0.2 m 位移, 其机理在于水位骤降导致前缘土压力由3.50 kPa 降至2.10 kPa, 同时滑带土孔隙水压力下降0.02 kPa, 滞后效应使得滑带土体软化延迟, 破坏呈渐进性。在工况5下, 滑坡累计位移量达到最高值0.848 m, 在模型中体现为前缘优先发生破坏, 后缘随后发生破坏, 其机理在于暴雨工况使得孔隙水压力较工况4下迅速提升, 滑带上孔隙水压力由0.21 kPa 激增至1.28 kPa, 此时水位下降导致前缘浮托力下降, 前缘滑坡土体发生一级滑动, 随后降雨作用下的后缘土体重度上升, 沿滑动面的下滑分力提升导致土体破坏。

以上分析数据得出滑坡整体发生位移的主要原因在于以下几点: (1) 暴雨作用导致滑体表层土壤快速饱和, 引发土体重量增加和抗剪强度降低, 滑体的整体抗滑能力显著削弱; (2) 库水位下降过程中的渗透滞后效应形成了滑带区域的孔隙水压力梯度, 这种梯

度变化进一步削弱了滑体与滑床之间的接触强度, 最后导致滑坡整体失稳; (3) 累积降雨渗透作用在滑坡中上部形成局部的浮托效应, 导致滑体内局部区域发生显著位移。这些因素共同作用解释了在不同工况条件下滑体位移的主要成因。

### 3 耦合作用下滑坡破坏变形分析

为研究在水位下降以及暴雨作用下滑坡可能破坏的位置以及破坏形式, 在剖面1处设置1组光学位移传感器和拉线位移传感器, 在剖面2处设置一组拉线位移传感器。通过将模型倾斜 $10^\circ$ 达到失稳临界范围并施加水位下降以及暴雨条件直至滑坡破坏。在水库水位由175 m 骤降至145 m 遇暴雨条件情况下, 试验进行到第三日时模型发生破坏, 破坏位移变化过程如图8所示。试验历时达到8.12 h 时滑坡前缘开始产生滑动如图9所示, 滑裂面在地表位置大致在220 m 高程附近。随后由于前缘物质的滑落, 滑坡前缘形成新的临空面, 在持续暴雨作用下, 滑坡中后部发生整体滑

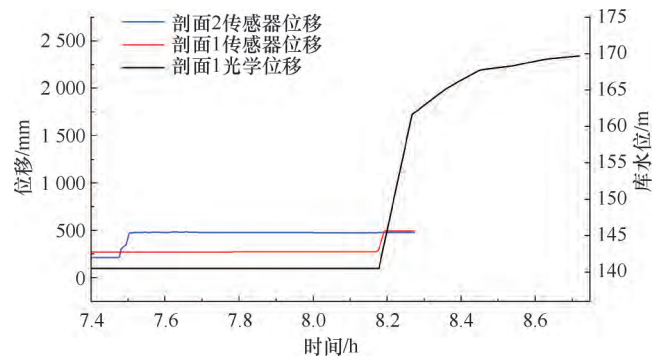


图8 破坏过程位移变化

Fig. 8 Displacement changes during damage

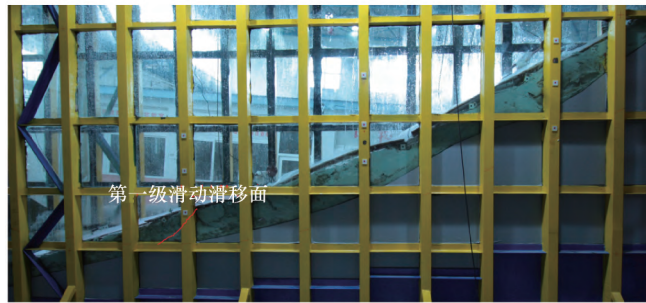
表3 监测剖面位移过程特征

Table 3 Characterisation of displacement processes in the monitored profile

监测断面	监测点初始坐标 $x/mm$	监测点初始坐标 $y/mm$	最大位移 $S_{max}/mm$	速度 $V_{max}/mm \cdot s^{-1}$	加速度 $a_{max}/mm \cdot s^{-2}$
剖面1 光学位移	2 323. 20	833. 17	2 319. 69	2. 43	0. 48
剖面1 传感器位移			230. 16	5. 17	1. 24
剖面2 传感器位移			279. 21	10. 48	1. 80



(a) 滑坡未发生破坏



(b) 滑坡前缘发生滑动



(c) 滑坡中后部发生滑动

图9 滑坡滑动破坏过程

Fig. 9 Landslide slide damage process diagram

动, 滑动沿地质模型中滑面滑动。滑坡的总滑距较长, 达到 2 323. 20 mm, 拉线式传感器监测到的中部最高滑速达到 10. 48 mm/s。

通过监测剖面位移过程特征(见表3)分析吊岩壁滑坡破坏模式, 可以得出以下几种结论: (1) 吊岩壁滑坡破坏模式是前缘滑落后向上牵引导致滑坡整体失稳破坏, 前缘滑动破坏是滑坡整体启动的重要条件; (2) 吊岩壁第一级滑动体滑动速度较低, 为 5. 167 mm/s; (3) 发生吊岩壁滑坡模型的次级牵引滑动破坏, 是以前缘滑落后临空面形成条件的。通过与滑坡地质勘察报告对吊岩壁变形特征的描述也可以证

实上文中提及的滑坡整体滑动的空间范围与模型中滑坡启动的范围一致。吊岩壁滑坡地质模型报告对吊岩壁滑坡的地质划分定为“初始变形阶段、牵引式、加载-库水位抬升型大型土质岩床滑坡”, 滑坡模型试验证实滑坡整体破坏模式为牵引式, 地质报告认为水库水位反复涨落是逐步削弱前缘局部的稳定状态主要因素, 但试验反映出在不耦合暴雨条件下, 滑坡前缘局部稳定性不会出现实质性变化。

#### 4 滑坡稳定性计算

利用 GEO-SLOPE 有限元软件对吊岩壁滑坡的主纵剖面采用四边形单元进行有限元网格剖分, 节点数为 6 698, 单元数为 6 597, 网格如图 10 所示, 根据《吊岩壁滑坡地质勘察报告》关于岩土体的物理力学参数建议值和反演<sup>[44]</sup>获得的滑体凝聚力和摩擦角, 类比三峡库区其他类似滑坡岩土体的物理力学性质参数值, 综合确定吊岩壁滑坡二维有限元数值计算参数和其他物理力学参数值如表 4 所列。计算工况按水库运行模式进行分类, 详细工况组合如表 5 所列, 利用计算参数及对应工况组合, 采用 Morgenstern-Prince 法对滑坡进行稳定性计算, 各工况下稳定性系数变化结果如图 11 所示。

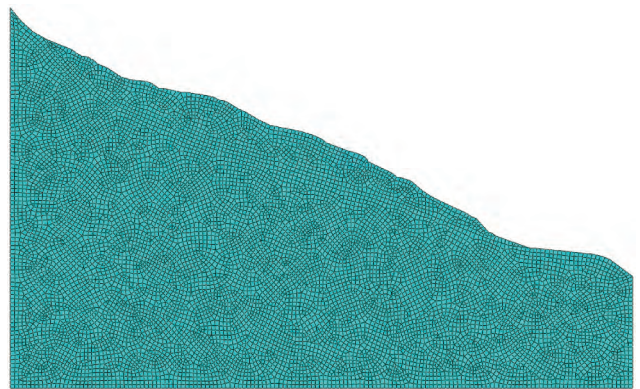


图10 吊岩壁滑坡有限元网格模型

Fig. 10 Finite element mesh model of hanging rock face landslide

由各工况下稳定性系数变化折线图分析, 在 175 m 下降至 145 m 过程的初始时刻, 分别叠加 3 d

表 4 吊岩壁滑坡计算参数

Table 4 Calculation Parameters of Hanging Rock Slide

部 位	容重 $\gamma$ /kN · m <sup>-3</sup>	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi$ /(°)	饱和渗透系数 k/cm · s <sup>-1</sup>
滑 体	21.0	22.3	28.5	$4.0 \times 10^{-4}$
滑 带	19.9	28.0	18.0	$3.0 \times 10^{-6}$
滑 床	25.0	3 100.0	40.6	$3.0 \times 10^{-7}$

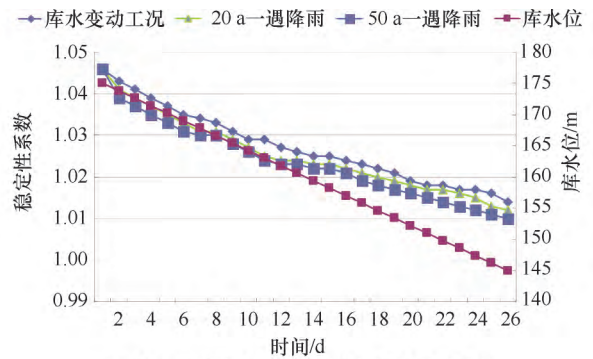
表 5 工况组合

Table 5 Table of working condition combinations

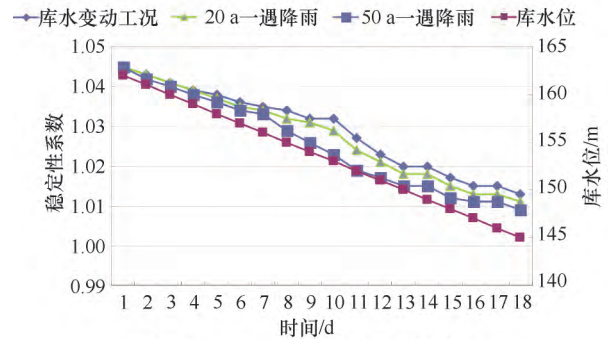
水库运行水位	工况编号	荷载组合内容
静止水位	1	自重+地表荷载+ 175 m 水位
水位降落	2	自重+地表荷载+水库水位从 175.0 m 降至 145.0 m(下降速率 1.2 m/d)
	3	自重+地表荷载+ 175.0 m 降至 145.0 m+50 a 一遇暴雨
	4	自重+地表荷载+ 175.0 m 降至 145.0 m+20 a 一遇暴雨
	5	自重+地表荷载+ 162.0 m 降至 145.0 m
	6	自重+地表荷载+ 162.0 m 降至 145.0 m+50 a 一遇暴雨
水位上升	7	自重+地表荷载+162.0 m 降至 145.0 m+20 a 一遇暴雨
	8	自重+地表荷载+ 145.0 m 升至 175.0 m
	9	自重+地表荷载+ 145.0 m 升至 175.0 m+50 a 一遇暴雨

注: 依据秭归县降雨资料统计分析得到 20 a 一遇暴雨  $q=59.065$  mm/d, 50 a 一遇暴雨  $q=66.217$  mm/d。

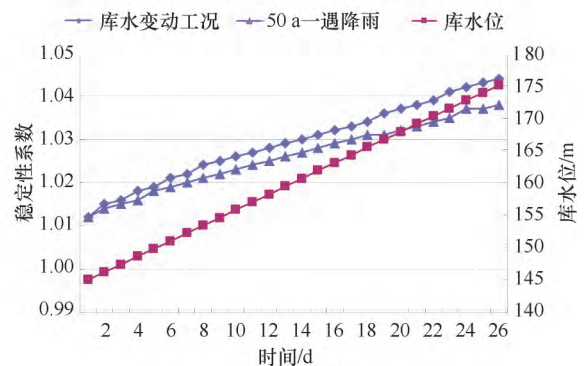
不同强度的降雨。在库水向外渗流的动水压力及降雨的作用下, 坡体稳定系数均显现不同幅度的下降, 从初始时刻的 1.046 下降到 1.008 左右。在不同强度降雨作用下, 降雨强度的变化对稳定性系数有一定影响。在 162 m 下降至 145 m 过程的初始时刻, 分别叠加不同强度的降雨。在库水向外渗流的动水压力及降雨的作用下, 坡体稳定系数均显现不同幅度的下降, 从初始时刻的 1.045 下降到 1.009 左右, 降雨强度的变化对稳定性系数有一定影响。在 145 m 上升至 175 m 过程中, 叠加 50 a 一遇暴雨, 坡体稳定系数随着库水位上升显现不同幅度的上升, 从 145 m 的 1.012 上升到 175 m 的 1.038 左右。50 a 一遇暴雨会使稳定系数有一定幅度的下降, 但其影响较小。对比物理模型试验数据发现, 数值模拟中降雨工况对稳定性系数的影响程度低于试验观测值。造成这种数据差异的原因在于: (1) 数值模型采用准静态渗流假定, 未完全考虑暴雨入渗引发的滑带土渗透系数动态变化; (2) Morgenstern-Prince 法在计算中采用固定强度参数, 未反映降雨导致的滑带土黏聚力动态衰减过程。



(a) 175 m 降至 145 m 工况下施加不同强度降雨



(b) 162 m 降至 145 m 工况下施加不同强度降雨



(c) 145 m 升至 175 m 工况下施加不同强度降雨

图 11 各工况下稳定性系数变化折线

Fig. 11 Stability coefficient variation line graph for each operating condition

吊岩壁滑坡最危险工况为工况 3 (库水位从 175.0 m 水位骤降至 145.0 m+50 a 一遇暴雨), 在该工况条件下, 滑坡的稳定系数最小值为 1.009, 滑坡处于临界状态, 与模型试验中的结论相吻合。采用离差平方方法<sup>[45]</sup> 计算库水下降与降雨对滑坡影响的比重。稳定性系数总变化量为 0.072, 库水位下降稳定性系数变化量为 0.035, 降雨稳定性系数总变化量为 0.037, 故库水位下降因素比重为 48.6%, 降雨因素比重为 51.4%。

## 5 结果讨论

本研究采用的“物理模型试验-数值反演”耦合方法在监测与机理方面展现出显著优势。相较于传统

单一数值模拟方法, 通过传感器系统实现应力场、渗流场与位移场的三场同步监测。与离心机试验的对比表明, 本模型在前缘位移速率、强度弱化等参数上具有一致性, 但在最不利工况下因未考虑非达西流动, 本构模型仍具有局限性。

为验证数值模型的可靠性, 选取工况 3(175 m 骤降至 145 m+暴雨) 进行对比分析。如图 11(a) 所示, 数值计算得出该工况下安全系数为 1.009, 而物理模型试验中滑坡累计位移达 0.848 m 并发生整体滑动, 对应实际安全系数应趋近于 1.0。两者相对误差为  $(1.009-1.0)/1.0 \times 100\% = 0.9\%$ , 满足  $<5\%$  的工程精度要求。通过白家包滑坡案例验证发现, 当水位从 170 m 骤降至 150 m 时, 数值计算结果安全系数 1.021 与现场 GNSS 监测显示的 1.0~1.02 临界状态区间吻合, 相对误差为 1.05%; 凉水井滑坡在 162 m 骤降工况下, 数值解 1.034 与离心机试验结果 0.989 的绝对误差为 4.55%。上述对比验证了本文方法在涉水滑坡稳定性分析中的可靠性。然而滑带土渗透系数变化的  $\pm 15\%$  将引发 22.4% 的安全系数波动, 这暴露出地质参数不确定性对预测结果具有显著影响, 跨尺度仿真技术的突破仍是当前研究难点。

## 6 结论

(1) 在降雨作用下, 水库水位下降对滑坡内孔隙水压力影响程度较小, 变化幅度为 0.02 kPa, 暴雨产生的水在滑坡渗透性差的部位积累, 加剧滑坡破坏变形。降雨过后岩土体内空隙被扩大, 并极易在下次降雨作用时形成滑动破坏面, 从滑坡前缘破坏的形式, 也可以推断出水位下降和降雨耦合作用加剧了滑坡下部的滑动破坏。

(2) 工况 5 是该滑坡最不利工况, 暴雨作用导致滑坡底部孔隙水压力由 4.27 kPa 急剧增加至 4.90 kPa, 滑坡上部土壤迅速饱和, 增加了整个滑体重量; 滑坡下部的有效应力与土压力波动导致下部摩阻力减小, 位移显著增加, 达到 0.848 m, 滑坡整体失稳风险急剧上升, 同时水位下降导致滑坡底部压力减小, 并导致滑坡发生失稳破坏。

(3) 通过比重离差平方计算结果表明, 暴雨公开对滑坡稳定性影响权重为 51.4%, 高于库水位骤降作用下的 48.6%, 其具体表现为: 库水位骤降通过孔隙水压力变化与浮托力变化诱发前缘牵引破坏; 暴雨作用降低滑带土体黏聚力、内摩擦角强度属性驱动后缘推挤变形。

(4) 暴雨与水位骤降耦合作用产生非线性叠加效

应, 安全系数降幅达 8.1% (从 1.046 降至 0.961), 显著大于单一因素降幅之和 (水位骤降 4.2% + 暴雨 3.6%)。

## 参考文献 (References):

- [1] 焦朋朋, 陈洪凯, 张金浩, 等. 三峡库区消落带滑坡灾害引发生态环境问题的研究进展 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2022, 39(2): 46-55.  
JIAO Pengpeng, CHEN Hongkai, ZHANG Jinhao, et al. Research progress on ecological environmental problems induced by landslide disasters in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 39(2): 46-55.
- [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 Zhifa. Spatiotemporal distribution characteristics and genetic analysis of landslides in the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 305-309.
- [3] YIN Yueping, HUANG Bolin, WANG Wenpei, 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.
- [4] 达明昌, 焦洁, 苏正洋. 库水位变动及降雨共同作用下心墙坝坝坡稳定性研究 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 90-93.  
DA Mingchang, JIAO Jie, SU Zhengyang. Stability of core-wall dam slope under combined effect of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(12): 90-93.
- [5] 查新元, 童富果, 薛松, 等. 三峡库区降雨型滑坡体特征分析 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(6): 142-145.  
CHA Xinyuan, TONG Fuguo, XUE Song, et al. Characterization of rainfall-type landslide body type in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Hydropower Energy Science, 2023, 41(6): 142-145.
- [6] 叶旭光, 王新刚, 刘凯, 等. 典型降雨诱发型堆积层滑坡机理研究 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2024, 54(1): 101-110.  
YE Xuguang, WANG Xingang, LIU Kai, et al. Mechanism of typical rainfall-induced colluvial landslides [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(1): 101-110.
- [7] 冯彦有, 王锦丽. 考虑水库水位升降条件下边坡稳定性影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 8(2): 6-9.  
FENG Yanyou, WANG Jinli. Study on the influence of slope stability under reservoir water level rise and fall conditions [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2025, 8(2): 6-9.
- [8] 王伟, 邹艺璇, 李尧, 等. 基于 GIS 与 Scoops 3D 的水动力型滑坡区域稳定性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 79-89.  
WANG Wei, ZOU Yixuan, LI Yao, et al. Regional stability analysis of hydrodynamic landslides based on GIS and Scoops 3D [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 79-89.

- [9] PENG Haiyou, XIE Qiang, CHEN Bolin, et al. Failure mode of the hazardous Diaozui rock mass of the Qutang Gorge in the Three Gorges Reservoir area based on a three-dimensional numerical analysis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(4): 100.
- [10] XUE Yang, MIAO Fasheng, LI Jingze, et al. Probabilistic back analysis of reservoir landslide considering hydro-mechanical coupled observations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 176: 106798.
- [11] HOU Tianshun, XU Guangli, ZHANG Daqian, et al. Stability analysis of Gongjiacun landslide in the three Gorges Reservoir area under the action of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(2): 1647-1683.
- [12] TANG Dong, LI Dianqiang, CAO Zijun. Slope stability analysis in the Three Gorges Reservoir Area considering effect of antecedent rainfall [J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2016, 11(2): 161-172.
- [13] TONG Defu, SU Aijun, TAN Fei, et al. Genetic mechanism of water-rich landslide considering antecedent rainfalls: A case study of Pingyikou Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Earth Science*, 2023, 34(6): 1878-1891.
- [14] 胡华, 吴轩, 张越. 基于降雨滑坡模拟试验的花岗岩残积土边坡破坏模式分析 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(6): 1098-1102.  
HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Failure mode analysis of granite residual soil slope based on rainfall-induced landslide simulation test [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, 60(6): 1098-1102.
- [15] 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, 27(12): 2089-2095.  
HU Xiuwen, TANG Huiming, LIU Yourong. Physical simulation test study on stability of Zhaoshuling landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 27(12): 2089-2095.
- [16] 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, 30(8): 1586-1593.  
LI S J, KNAPPETT J A, FENG X T. Centrifuge model test study on slope instability under reservoir water level fluctuation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 30(8): 1586-1593.
- [17] JIA G W, ZHAN 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): 92-103.
- [18] LUO X Q, SUN H, THAM L G, et al. Landslide model test system and its application on the study of Shiliushubao Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(2): 309-317.
- [19] 苗发盛, 赵帆程, 吴益平, 等. 基于渗透-环剪试验的三峡库区童家坪滑坡滑带土强度特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(7): 1480-1489.  
MIAO Fasheng, ZHAO Fancheng, WU Yiping, et al. Strength characteristics of sliding zone soil in Tongjiaping landslide in Three Gorges Reservoir area based on permeability-ring shear tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(7): 1480-1489.
- [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): 755-764.  
TANG Minggao, LI Songlin, XU Qiang, et al. Deformation characteristics of reservoir bank landslides based on centrifuge model tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 755-764.
- [21] FAN Lei, ZHANG Guangcheng, LI Zhangbo, 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.
- [22] 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.  
LI Songlin, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Centrifuge model test of buoyancy-reduced landslides under reservoir water level rise [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(5): 616-622.
- [23] LING H, LING H L. Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability [J]. *Journal of Geo-technical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(9): 1151-1157.
- [24] YANG Yuchuan, XING Huige, YANG Xingguo, 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.
- [25] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2007, 133(5): 575-587.
- [26] 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 Yongjun, SHENG Jinbao, et al. Model test study of reservoir slope landslide near dam under combined effect of rainfall and reservoir water level fluctuation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(3): 452-459.
- [27] 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.
- [28] 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 Xiaoping, HUANG Jingwu, WU Hongwei, et al. Centrifuge model test study of ancient reservoir landslides [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1496-1503.
- [29] 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 Huangsong, LI Tianbin, WU Boyun, et al. Centrifuge model test on stability of large-scale landslide with polygonal slip surface under rainfall condition [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,

- 2016, 38(4): 696-704.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2019.
- [31] 魏祥龙, 戴佳琦, 左利钦, 等. 水流冲刷作用下软体排守护边滩失稳机理概化模型试验初步研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(3): 773-786.
- WEI Xianglong, DAI Jiaqi, ZUO Liqin, et al. Preliminary study on generalized model test of instability mechanism for soft mattress-protected shoal under flow scouring[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(3): 773-786.
- [32] 孟振江, 张凡, 彭建兵, 等. 预设节理条件下降雨型黄土滑坡模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1528-1537.
- MENG Zhenjiang, ZHANG Fan, PENG Jianbing, et al. Model test study of rainfall-induced loess landslides with preset joints [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1528-1537.
- [33] 赵培琳, 张明礼, 冯微, 等. 毛细阻滞层防治季节冻土路基覆盖效应试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 28-39.
- ZHAO Peilin, ZHANG Mingli, FENG Wei, et al. Experimental study on covering effect of capillary barrier for seasonal frozen soil subgrade protection [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2025, 22(1): 28-39.
- [34] 肖捷夫, 李云安, 胡勇, 等. 库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 471-480.
- XIAO Jiefu, LI Yun'an, HU Yong, et al. Model test study on deformation characteristics of ancient landslides under reservoir water fluctuation and rainfall conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 471-480.
- [35] 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 Xianqi, GE Xiurun. Landslide Model Test Theory and Its Applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [36] 李巍岳, 刘春, SCAIONI M, 等. 基于滑坡敏感性与降雨强度-历时的中国浅层降雨滑坡时空分析与模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4): 473-484.
- LI W Y, LIU C, SCAIONI M, et al. Spatiotemporal analysis and simulation of shallow rainfall-induced landslides in China based on landslide susceptibility and rainfall intensity-duration [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 47(4): 473-484.
- [37] 高盼星, 王义民, 赵明哲, 等. 考虑不同成洪暴雨类型的洪水频率计算[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3): 166-174.
- GAO Panxing, WANG Yimin, ZHAO Mingzhe, et al. Flood frequency calculation considering different storm types for flood formation [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(3): 166-174.
- [38] 唐理斌. 降雨和库水位变化联合作用下滑坡稳定分析及可靠度评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- TANG Libin. Landslide Stability Analysis and Reliability Evaluation under Combined Action of Rainfall and Reservoir Water Level Fluctuation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [39] 齐永正, 杨子明, 刘玮民, 等. 水位升降与水下冲刷作用下边坡破坏试验研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 51-54.
- QI Yongzheng, YANG Ziming, LIU Weimin, et al. Experimental study on slope failure under water level fluctuation and underwater scouring [J]. Yellow River, 2022, 44(2): 51-54.
- [40] 黄大维, 李彬鑫, 石钰锋, 等. 地下水位变化对砂土地层地铁隧道沉降影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(1): 122-130.
- HUANG Dawei, LI Binxin, SHI Yufeng, et al. Experimental study on influence of groundwater level variation on subway tunnel settlement in sandy stratum [J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 122-130.
- [41] 李肖男, 傅巧萍, 张松, 等. 三峡水库汛期运行水位运用方式研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 21-26.
- LI Xiaonan, FU Qiaoping, ZHANG Song, et al. Study on operation level utilization modes of Three Gorges Reservoir during flood season [J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 21-26.
- [42] 史学磊, 韩旭东, 杨秀元, 等. 三峡库区溪沟湾滑坡的诱发因素及前期降雨影响[J]. 地质力学学报, 2023, 29(2): 253-263.
- SHI Xuelei, HAN Xudong, YANG Xiuyuan, et al. Triggering factors and antecedent rainfall effects of Xigouwan landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(2): 253-263.
- [43] 陶志刚, 许闯, 刘淞源, 等. 降雨条件下含近水平弱层边坡的破坏机理物理模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4671-4686.
- TAO Zhigang, XU Chuang, LIU Songyuan, et al. Physical model test study on failure mechanism of slope with near-horizontal weak layer under rainfall conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4671-4686.
- [44] 徐鹏松, 贺可强, 陈小羊, 等. 降雨型滑坡抗剪强度参数反演研究[J]. 青岛理工大学学报, 2024, 45(5): 52-59.
- XU Pengsong, HE Keqiang, CHEN Xiaoyang, et al. Back analysis of shear strength parameters for rainfall-induced landslides [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2024, 45(5): 52-59.
- [45] 宋慈勇, 赵新宇, 孙吉刚, 等. 基于离差平方集对分析评标模型[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(6): 78-79.
- SONG Ciyong, ZHAO Xinyu, SUN Jigang, et al. Bid evaluation model based on deviation square set pair analysis [J]. China Water Transport (Second Half of Month), 2009, 9(6): 78-79.

(责任编辑 王海锋)