

刘柄材, 江兴元, 孟生勇, 等. 降雨与地下水联合入渗下斜坡变形机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 202-211. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.016

LIU Bingcai, JIANG Xingyuan, MENG Shengyong, et al. Study on slope deformation mechanism under combined infiltration of rainfall and groundwater[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 202-211. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.016

降雨与地下水联合入渗下斜坡变形机理研究

刘柄材¹, 江兴元^{1,2,3}, 孟生勇¹, 杨义^{1,2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 【目的】为了探究降雨与地下水联合入渗下斜坡内部水土变化特征和斜坡变形破坏机理。【方法】采用粉质黏土, 设计了两种不同地下水入渗水头高度和降雨相组合的模型试验, 对土体体积含水量和孔隙水压力进行监测, 研究斜坡内部水土响应特征及失稳模式。【结果】结果显示: 降雨与地下水联合入渗下, 斜坡内部渗流场发生变化。地下水入渗水头较低时, 坡底土体接受地下水和降雨入渗, 坡脚和斜坡中上部土体接受降雨入渗; 地下水入渗水头较高时, 斜坡底部、坡脚和斜坡中部土体接受地下水入渗, 斜坡上部土体接受降雨入渗。且湿润锋平行坡顶、坡面和坡底向斜坡内部发展。【结论】斜坡前部土体饱和时, 斜坡以流滑为主。但地下水入渗水头较低时, 流滑范围较小且达到失稳平衡所需时间较长。

关键词: 降雨与地下水入渗; 物理模型试验; 渗流场; 失稳模式

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0202-10



与作者互动
请扫码

Study on slope deformation mechanism under combined infiltration of rainfall and groundwater

LIU Bingcai¹, JIANG Xingyuan^{1,2,3}, MENG Shengyong¹, YANG Yi^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Guizhou Zhengye Engineering Technology Investment Co., Ltd., Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the characteristics of soil and water change and the mechanism of slope deformation and failure under the combined infiltration of rainfall and groundwater. [Methods] Therefore, two model tests of different groundwater infiltration head height and rainfall phase combination were designed with silty clay to monitor soil volume water content and pore water pressure, and to study the response characteristics of soil and water in the slope and the instability mode. [Results] The result show that the seepage field inside the slope changes under the combined infiltration of rainfall and groundwater. When the groundwater infiltration head is low, the soil at the bottom of the slope receives groundwater and rainfall infiltration, and the soil at the foot of the slope and the middle and upper part of the slope receives rainfall infiltration. When the groundwater infiltration head is high, the soil in the bottom, foot and middle of slope receives groundwater infiltration, and the soil in the upper slope

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-04-27; 录用日期: 2024-05-25; 网络出版日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007271); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般119)

作者简介: 刘柄材(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 1171804955@qq.com

通信作者: 江兴元(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地质工程、岩土工程方面的教学及科研工作。E-mail: xyjiang3@gzu.edu.cn

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

receives rainfall infiltration. And the wetting front develops in parallel to the slope top, slope surface and slope bottom.

[Conclusion] When the soil in front of the slope is saturated, the slope is dominated by flow slip. However, when the groundwater infiltration head is low, the flow slip range is small and it takes a long time to reach the unstable equilibrium.

Keywords: rainfall and groundwater infiltration; physical model test; seepage field; instability mode

0 引言

近年来,在全球气候变化的背景下,由降雨引起的滑坡呈现日益增长的趋势^[1-2]。在降雨丰沛期,地下水水位往往会迅速抬升,并渗入至斜坡土体中^[3]。水在岩土体中入渗、流动会导致边坡力学平衡的破坏^[4]。目前对于降雨联合地下水入渗作用下的斜坡失稳机理研究日渐丰富。例如党杰等^[5]监测黔西市仓堡田滑坡变形特征,显示地下水和降雨是斜坡发生变形破坏的触发因素。汪标等^[6]监测三峡库区谭家河滑坡地下水位变化特征,分析降雨导致地下水位变化后的滑坡失稳机理。刘佳意等^[7]监测四川后山里滑坡连续三年的降雨量和地下水位,分析降雨—土体含水率—地下水之间的响应规律。

降雨和地下水入渗是影响非饱和土边坡安全稳定的重要因素。冯学茂等^[8]结合经典弹塑性本构模型和失稳模量概念,建立了考虑降雨入渗下非饱和土的渗流稳定性准则,并在此基础上预测了边坡失稳时的含水率。LIU等^[9]基于瞬态流动作用下的可变形非饱和土的流体力学响应规律,建立了非饱和流动的非线性、完全流体力学耦合模型,预测了降雨入渗过程。白亚军等^[10]利用含水率分布函数改进了 Mein-Larson 降雨入渗模型,并与非饱和和无限长边坡稳定分析方法相结合,计算了降雨入渗下黄土边坡稳定性。赵宇等^[11]基于 Green-Ampt 入渗模型和水量平衡原理,建立考虑地下水影响的浅层边坡入渗方程解析解,并推导了边坡稳定性。WANG等^[12]根据建立的渗流场计算模型推导了不同降雨强度下边坡内部实时含水率分布解析解。LIU等^[13]以饱和入渗原理和 Green-Ampt 模型为基础,建立了土坡表面非饱和入渗模型,推导了非饱和土边坡在降雨入渗下的入渗深度和入渗率。EDGAR等^[14]基于 ABAQUS 软件分析讨论了降雨入渗对孔隙水压力响应和边坡稳定性影响。GRABER等^[15]利用有限元模拟方法,研究 Zarzal 和 Chico 滑坡发生破坏时的地下水条件,结果显示,滑坡发生与地下水位有极大的关系。

相较使用数值模拟和理论分析方法研究降雨与地下水入渗对斜坡的影响。使用物理模型试验能在降雨与地下水入渗过程中,直观地观察到渗流-变形整个

过程。王司法等^[16]、ZHOU等^[17]通过模型试验研究含裂隙土坡在降雨下入渗特征和湿润锋变化规律。宋享桦等^[18]、ZHANG等^[19]、SUN等^[20]通过物理模型试验研究不同降雨参数对土质边坡渗流、水土响应特征等的影响。李子安等^[21]通过模型试验研究了泉水补给地下水情况下,斜坡内部水土特征变化趋势、变形破坏特征和失稳模式。ZHANG等^[22]、裴向军等^[23]、吴浩宇等^[24]、慕焕东等^[25]通过离心机研究黄土滑坡在因灌溉导致地下水位雍高条件下变形破坏特征和失稳机理。张强等^[26]、MIAO等^[27]、肖捷夫等^[28]、江强强等^[29]通过物理模型试验,分析水库调度和降雨条件下堆积体内部孔隙水压力和土压力变化特征。WEI等^[30]利用物理模型和现象学模型对降雨诱发的深层滑坡地下水位进行了预测。WANG等^[31]开展梯度降雨诱发滑坡物理模型试验时,发现地下水的上升和有效应力的减小是导致滑坡变形的根本原因。以上研究表明降雨入渗和地下水入渗可以增加土体的容重导致斜坡的下滑力增大;且会导致引起孔隙水压力增大,从而减小了有效应力,使得土体的抗剪强度参数减小;且当斜坡内部土体水力梯度较大时,强大的渗透力将导致斜坡流滑。

对于降雨与地下水入渗下斜坡渗流特征在数值模拟方面已经取得了大量的成果。但是在物理模型试验方面,关于降雨和地下水联合入渗作用下斜坡变形破坏特征。大多数集中在单一降雨或地下水位变化、降雨与水库升降、降雨沿节理裂隙等入渗导致地下水位抬升方面。关于坡外降雨和坡内地下水双向入渗的物理模型研究较少关于坡外降雨和坡内地下水双向入渗的物理模型研究较少。且降雨与地下水双向入渗不同单一降雨、地下水位抬升和降雨促使水库升降等单面入渗,或是具有时间先后顺序双向入渗。因此本文选取粉质黏土为材料,通过物理模型试验研究斜坡在降雨和地下水双向入渗作用下变形破坏过程,以及斜坡内部水土响应规律。以及分析斜坡在降雨和地下水双向入渗作用下变形失稳机理。为更好的认识降雨与地下水双向入渗作用下斜坡失稳过程和机理提供一定的参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验用土取于黔西滑坡, 为粉质黏土夹碎石, 主要呈棕红色, 含碎石。通过室内土工试验已获得相关物理力学参数, 如表 1 所列。为满足室内模型试验水槽模型最大允许粒径, 按照(《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019)规定对滑坡土体的颗粒级配进行调整, 将原始碎石粒径大于 20 mm 的颗粒剔除, 试验土样级配如图 1 所示。

表 1 土样的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil samples

干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土粒 比重	孔隙比	黏聚力 /kPa	内摩 擦角 / $(^\circ)$	天然含 水率 /%	饱和含 水率 /%	残余 含水率 /%
1.81	2.57	1.02	21.10	9.82	17	42	6

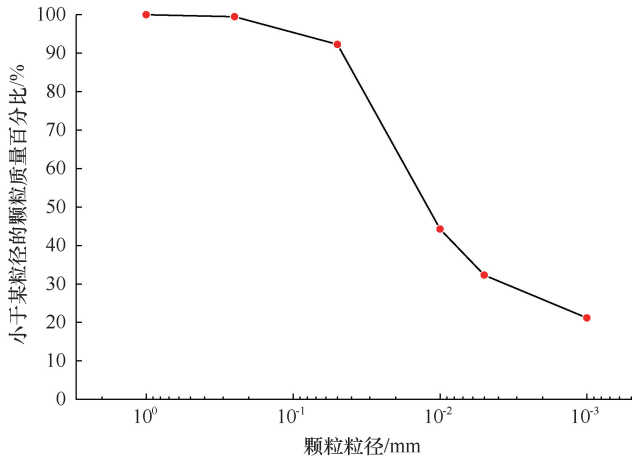


图 1 试验土样颗粒级配

Fig. 1 Soil particle gradation curve in tests

1.2 试验设计

(1) 试验模型装置设计。为满足实验工况需求设计了试验模型装置(见图 2), 该装置包括模型箱、降雨装置和地下水供给装置。模型箱以钢筋作为骨架支撑, 底部以钢板为底托并铺设 2 cm 混凝土模拟基覆面, 两侧及后侧以亚克力板为侧壁以便观察试验并记录试验过程。为了使降雨均匀, 使用 5 个雾化喷头间隔 30 cm 连成一排, 固定在钢架上方中间位置, 并用带有水管流量计连接和雾化喷头和自来水, 以便控制降雨量。地下水供给系统以内径为 15 mm 的 PVC 管为地下水流通管道, 设计地下水流通管道共四排, 每排间隔 20 cm, 并在每排间隔 20 cm 开孔, 作为地下水流出口。并用纱布缠住出水口, 使地下水均匀渗透。并用水管将 PVC 管和不同高度(1.7 m 和 2 m)的

水箱出水口连接来实现地下水入渗水头高度的变化。



图 2 试验模型装置

Fig. 2 Test devices

(2) 传感器布置。为监测斜坡失稳过程中体积含水量和孔隙水压力变化过程, 在沿斜坡中轴线设置了 4 个监测剖面(20 cm、40 cm、60 cm、90 cm), 号为 I、II、III、IV, 并在不同深度(10 cm、30 cm、40 cm、50 cm)设置了不同的监测点, 并埋设体积含水量和孔隙水压力传感器, 编号为 1~3(如 I-1), 具体布置如图 3 所示。其中体积含水量传感器型号为 EC-5, 理论量程范围为 0%~100%, 实际量程为 0%~59.98%; 孔隙水压力传感器型号为 HC-25, 量程范围在 0~20 kPa, 精度达 97.1%。

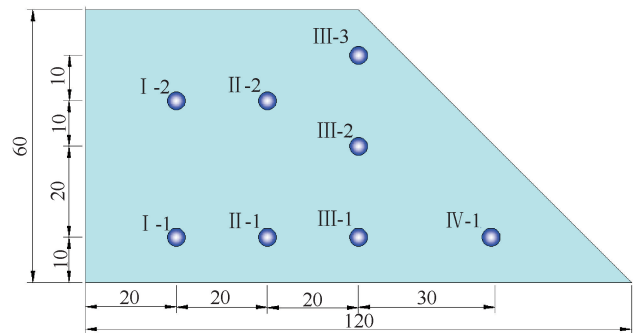


图 3 传感器布置(单位: cm)

Fig. 3 Sensors layout profile(Unit: cm)

(3) 试验工况设计。为简化模型, 并未以某具体案例为模型进行相似尺寸设计, 本试验设计模型长 1.20 m、宽 0.80 m、高 0.60 m, 坡角 45°, 基岩面与斜坡倾角为 0°。降雨强度设计为 90 mm/h, 属特大暴雨工况。参考黔西地区滑坡中泉水流量, 2~4 L/s。且模型试验中设计地下水出水口极小, 因此设计地下水入渗水头高度设计为 1.7 m 和 2 m, 以便达到合适的地下水入渗流量。工况设计如表 2 所列。

表 2 试验工况

Table 2 Design of tests conditions

编号	斜坡长/m	斜坡宽/m	斜坡高/m	降雨强度/mm·h ⁻¹	斜坡角度/(°)	地下水水头高度/m
Test-1	1.2	0.8	0.6	90	40	1.7
Test-2						2

1.3 试验流程

(1) 试验制备。待土样自然风干后, 碾碎过 15 mm 筛。再按 7%~10% 的含水率配置土样, 加水搅拌后盖住塑料薄膜, 使水土充分混合。

(2) 模型堆砌。先在模型箱底部先铺设地下水供给装置。并以每层 10 cm, 18.1 kN/m³ 的条件, 用电子称称取所需质量, 按逐层堆砌的方法堆砌。每层堆砌往后进行找平, 并在需埋设传感器的土层找平后在相应部位布置传感器。

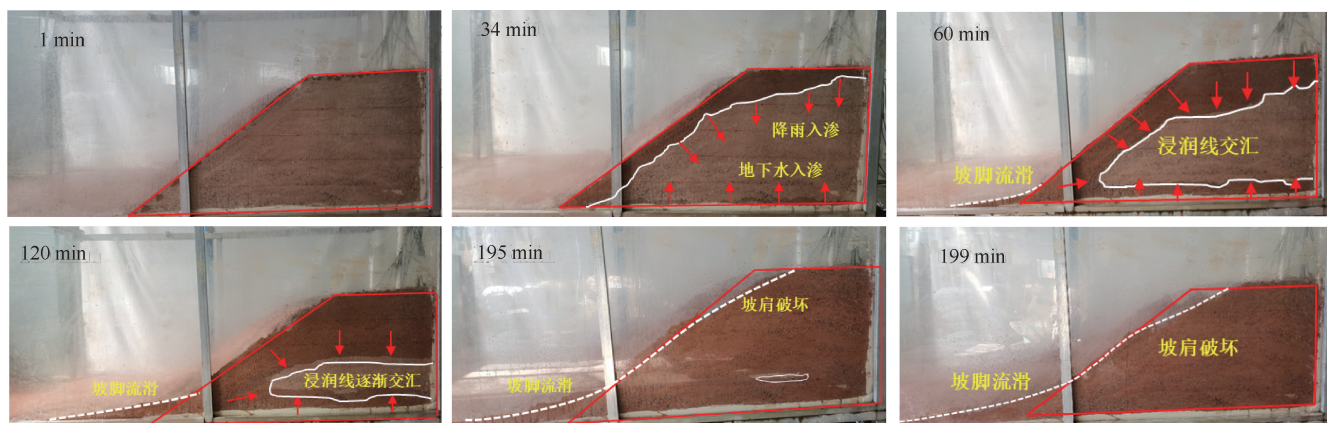
(3) 模型堆砌完成后静置 24 h, 以减小不相关因素对试验结果的影响。试验开始前 0.5 h 打开各类传感器采集器, 待采集数据稳定后同步打开降雨装置和

地下水补给装置。

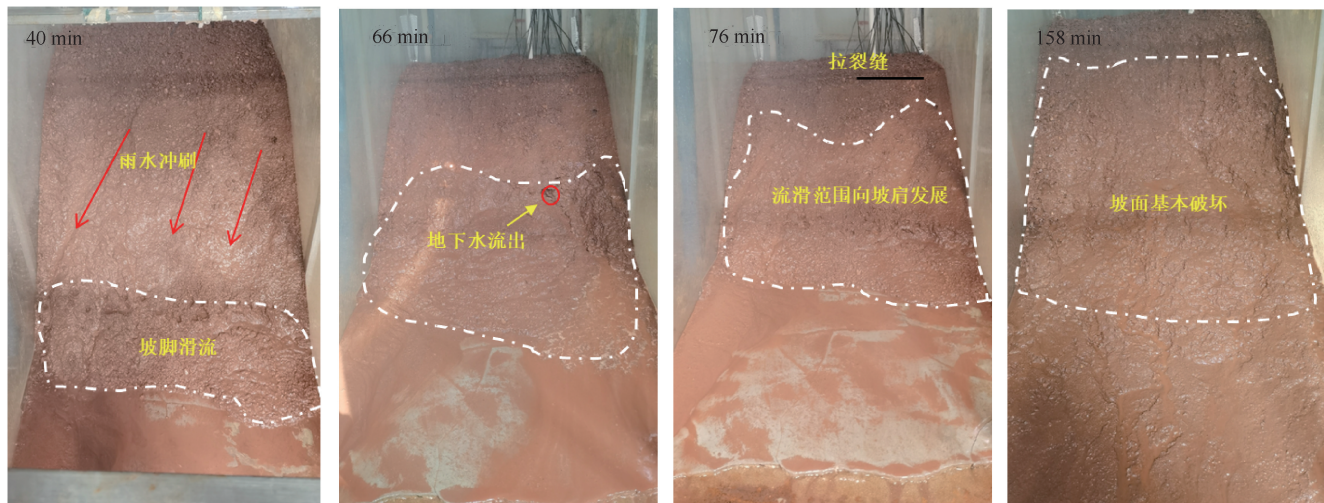
2 结果

2.1 斜坡变形宏观特征

试验开始前, 滑坡处于天然状态。地下水水头高度为 1.2 m 时, 变形过程如图 4 所示。当 $t = 40$ min 时, 坡脚处出现流滑现象; $t = 60$ min 时, 降雨与地下水浸润线开始交汇; $t = 66$ min 时, 坡表地下水流出, 并冲刷坡脚土体, 流滑范围扩大; $t = 76$ min 时, 流滑范围向坡肩发展, 并在坡肩形成一拉裂缝; $t = 158$ min 后, 斜坡坡面基本完全破坏; $t = 199$ min 时, 坡肩发生滑动, 斜坡不再变形, 试验结束。



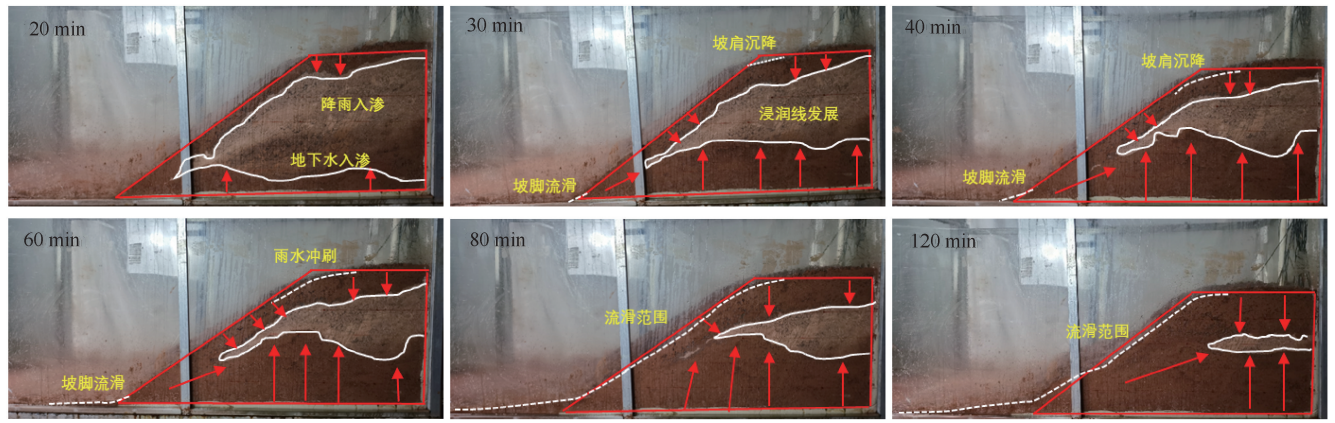
(a) Test-1 侧面视角



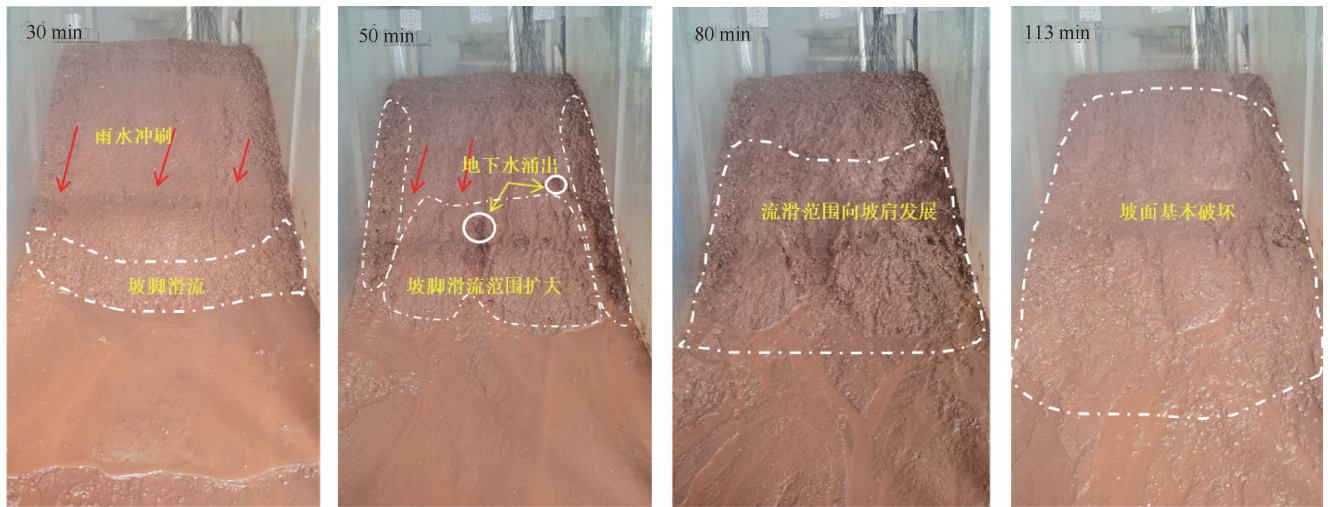
(b) Test-1 正面视角

图 4 Test-1 变形破坏过程

Fig. 4 Deformation and failure process in Test-1



(a) Test-2侧面视角



(b) Test-2正面视角

图5 Test-2变形破坏过程

Fig. 5 Deformation and failure process in Test-2

地下水水头高度为 1.7 m 时, 变形过程如图 5 所示。当 $t=20$ min 时, 降雨与地下水水浸润线交汇; $t=30$ min, 坡脚出现流滑, 坡肩沉降 1.2 cm; $t=50$ min 时, 在坡面形成两个地下水流出出口, 位于坡脚的流出口较大, 且在流出口下方形成冲沟; $t=80$ min 时, 冲沟不断拓宽, 并向后方溯源侵蚀, 以及降雨冲刷, 流滑范围进一步扩大; $t=113$ min 时, 坡面基本完全破坏, 斜坡不再变形, 试验结束。

2.2 水土响应特征

试验结果发现, 不同试验条件下的地下水水渗透速率不同, 导致不同试验工况条件下的测点含水率和空隙水压力传感器反应时间各不相同(见图 6 和图 7)。在 Test-1 中, $t=20$ min 时, 坡脚处的含水率(IV-1)迅速增大, 土体孔隙水压力增大使有效应力减小, 导致发生流滑现象。 $t=48$ min 和 50 min 时, 降雨湿润锋达到斜坡上部中前位置(II-2 和 III-3), 其

体积含水率快速增长。66 min 时, 斜坡内部流土破坏, 地下水从渗流优势通道流出坡表。 $t=75$ min 时, 斜坡中上部土体(II-2 和 III-3)饱和, 坡面中部土体流滑, 在坡顶形成拉裂缝, 且导致流土形成的优势通道塌陷, 坡底(I-1 和 II-1)土体含水率开始上升。 $t=98$ min 时, 降雨湿润锋达到斜坡底部, 坡底土体含水率再一次上升。在 $t=120$ min 时, 坡肩处(III-3)拉裂缝扩张, 导致孔隙水压力降低。 $t=199$ min 时, 降雨与地下水完全交汇, 斜坡土体饱和, 加之雨水在拉裂缝中形成动水压力, 增加土体下滑力, 坡肩滑动破坏, 孔隙水压力降低。

在 Test-2 中, $t=8$ min 时, 坡脚和坡底处土体含水率开始升高, 斜坡底部后缘(I-1)孔隙水压力上升, 斜坡底部中前位置因土体液化, 坡脚形成流滑现象, 因此 II-1 和 IV-1 处孔隙水压没有上升; 此外因流滑导致坡肩处土体出现沉降, 降雨在坡肩和坡顶前

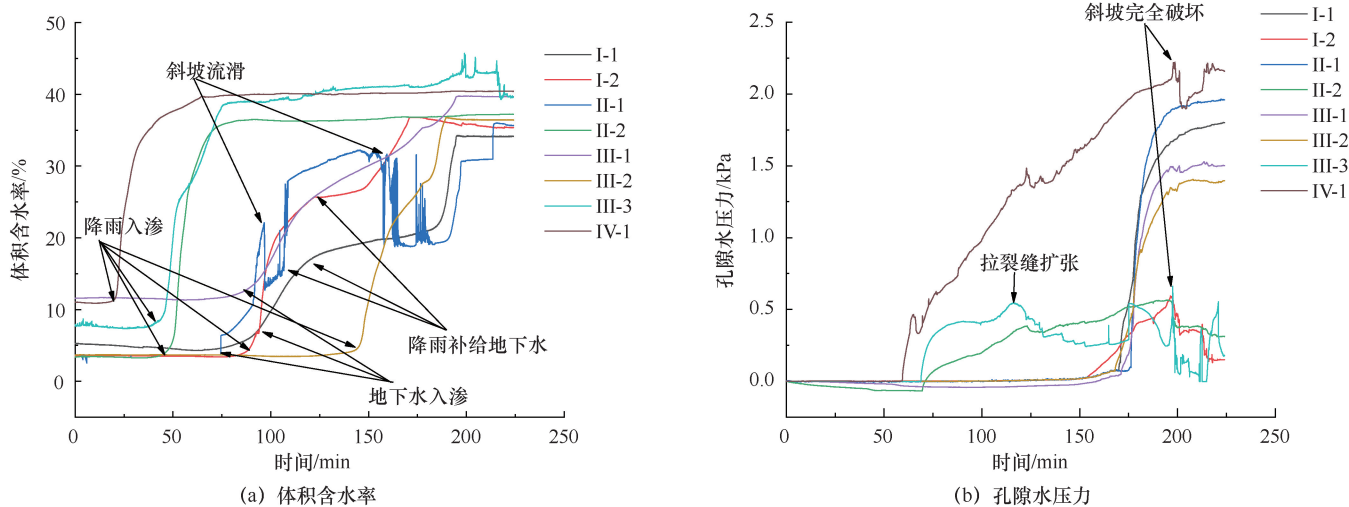


图6 Test-1 体积含水率和孔隙水压力变化

Fig. 6 Test-1 volume water content and pore water pressure change diagram

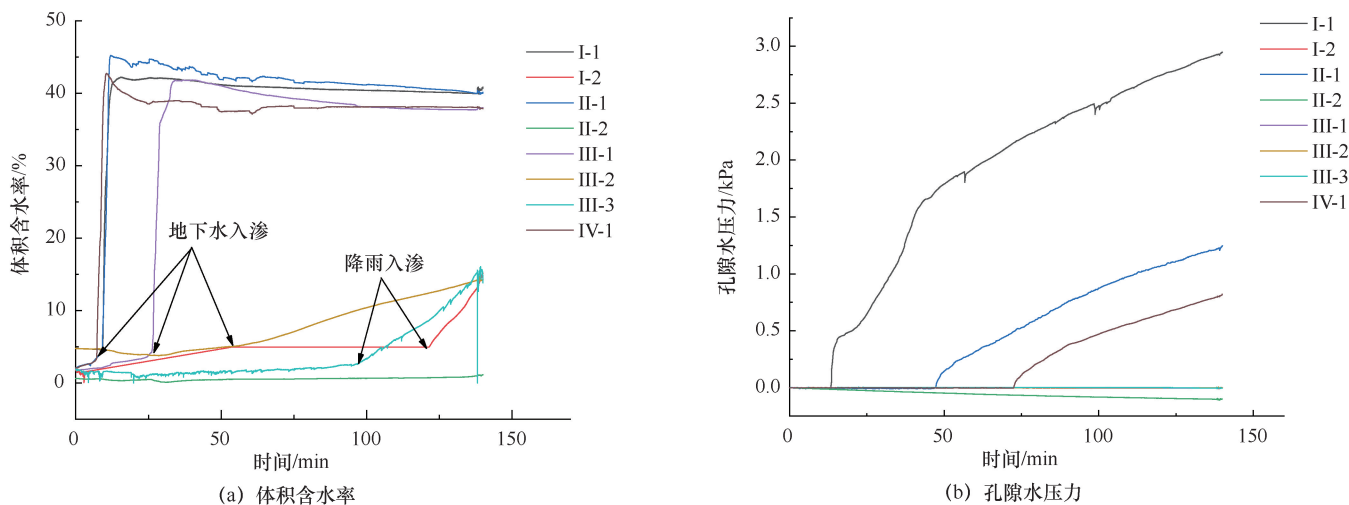


图7 Test-2 体积含水率和孔隙水压力变化

Fig. 7 Test-2 Volume water content and pore water pressure change diagram

中部易沿坡面流失, 因此导致坡顶部上和坡肩处土体含水率增长缓慢。 $t = 50 \text{ min}$ 时, 斜坡中部土体含水率增高, 在坡表形成流土, 且有两处地下水流出, 地下水冲刷出水口下方土体, 形成冲沟; 以及两侧土体出现流滑现象; 同时流土形成的渗流优势通道塌陷, 斜坡中间剖面的底部土体 (II-1) 孔隙水压力开始上升, 上部土体 (II-2) 孔隙水压力开始下降。 $t = 75 \text{ min}$ 时, 流滑范围沿地下水出水口向后溯源侵蚀, 侵蚀冲刷下来的土体在坡脚堆积, 坡脚处 (IV-1) 孔隙水压力开始上升。 $t = 100 \text{ min}$ 时, 降雨入渗至坡肩处 (III-3), 坡肩处土体含水率开始增长。

2.3 湿润锋运移特征

在湿润带的末端, 土壤含水量突变, 与下层干土有明显的界面, 因此通过观察不同时刻模型箱侧面土

体干湿分层界面, 绘制了湿润锋变化过程 (见图 8)。降雨和地下水联合入渗作用下, 湿润锋平行坡顶、坡顶和坡面向斜坡内部发展。通过计算可知, Test-1 中地下水入渗湿润锋发展速率为 0.137 cm/min , Test-2 中地下水入渗湿润锋发展速率为 0.4 cm/min , 降雨入渗湿润锋发展速率为 0.2 cm/min 。并且观察斜坡湿润锋变化过程, 可知 Test-1 中地下水湿润锋发展高度为 10 cm , Test-2 中则为 30 cm 。结合体积含水率传感器反应时间 (见表 3) 可知, Test-1 中, 坡底土体前期接受地下水入渗含水率升高, 后期降雨入渗补给地下水, 坡底土体才达到饱和状态; 坡脚、坡中和坡顶土体接受降雨入渗达到饱和状态。在 Test-2 中, 坡底、坡脚和坡中土体接受地下水入渗达到饱和状态, 斜坡上部土体接受降雨入渗达到饱和状态。且 Test-2

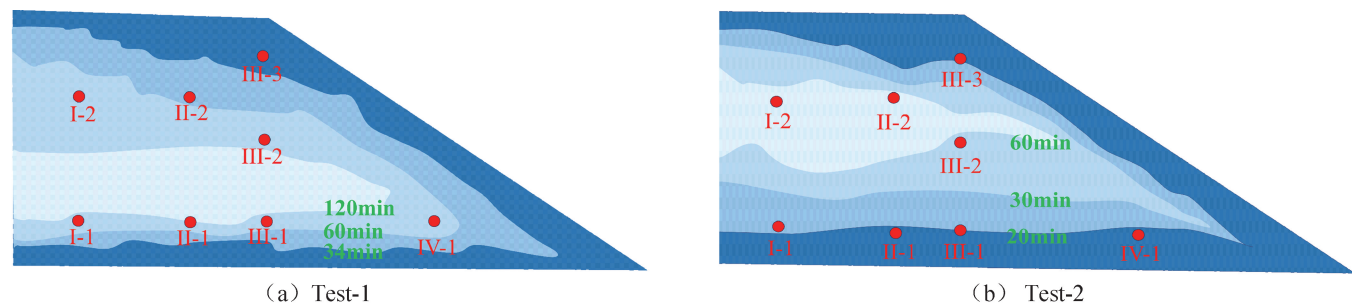


图8 斜坡湿润变化

Fig. 8 Slope wetness change

表3 体积含水率传感器响应特征

Table 3 Response characteristics of volume moisture content sensor

传感器位置		体积含水率开始增长时间/min		初始体积含水率/%		稳定时最大体积含水率/%		体积含水率增长速率/min ⁻¹	
		Test-1	Test-2	Test-1	Test-2	Test-1	Test-2	Test-1	Test-2
坡底	I-1	88.9	9.3	5.9	4.6	34.0	41.1	0.27	11.8
	II-1	74.4	5.7	3.7	2.8	35.8	45.1	0.23	6.9
	III-1	69.3	26.0	11.4	4.2	39.6	41.4	0.22	5.1
坡脚	IV-1	20.5	7.1	11.3	3.3	39.0	42.1	0.70	12.7
上部	I-2	89.6	121.6	6.1	5.0	36.0	15.2	0.37	0.5
	II-2	47.2	0	3.6	0.5	35.0	0.5	1.35	0
	III-2	137.5	73.5	3.9	6.8	36.7	14.3	0.63	1.0
坡肩	III-3	43.7	98.2	8.6	3.4	40.1	15.6	0.40	0.1

中地下水入渗速度快, 导致斜坡土体快速达到饱和状态, 孔隙水压力快速增长, 土体有效应力减小。因此 Test-2 斜坡达到变形稳定所需时间更短, 且流滑现象也越明显。

3 斜坡失稳模式

Test-1 中, 试验前期, 坡脚处土体受降雨入渗, 体积含水率快速上升, 有效应力减小, 坡脚出现流滑。试验中期, 斜坡底部土体受地下水入渗饱和, 形成流土, 地下水从坡面流出, 地下水冲刷下游坡面; 斜坡中部土体受降雨入渗, 土体流滑, 导致坡

肩形成拉裂缝。试验后期, 降雨和地下水联合入渗, 流滑范围向坡肩处扩展; 雨水沿拉裂缝入渗, 雨水在拉裂缝中形成静水压力推动土体向下滑动 [见图 9(a)]。

Test-2 中, 试验前期, 斜坡底部和坡脚处土体受地下水入渗, 体积含水率迅速上升, 加之粉质黏土渗透性差, 土体液化, 坡脚出现流滑, 坡肩沉降。试验中期, 地下水入渗至斜坡中部, 形成流土, 地下水从坡表流出, 冲刷下游和两侧坡面。在试验后期, 在降雨和地下水联合入渗下, 坡面完全破坏 [见图 9(b)]。

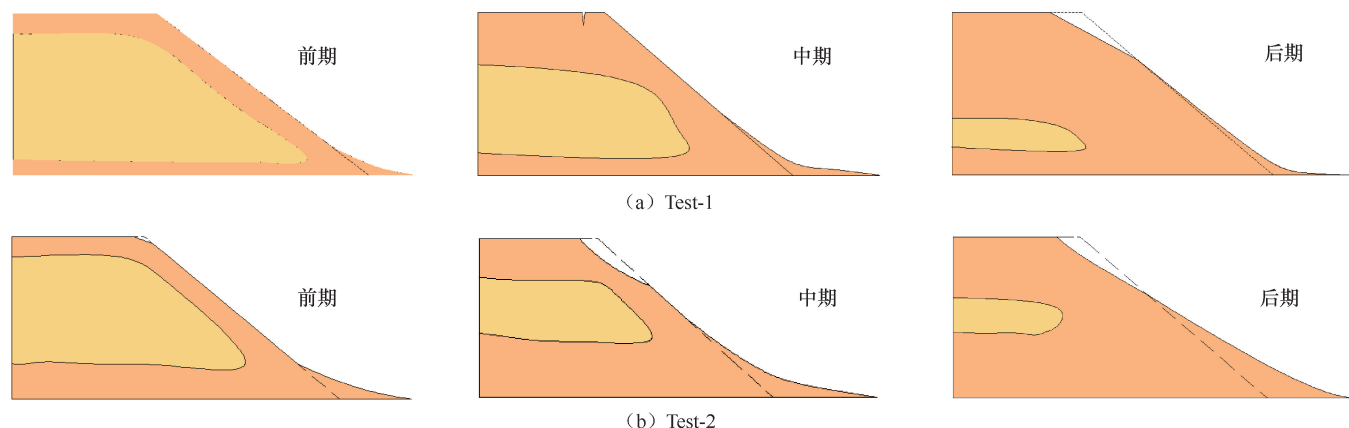


图9 斜坡失稳模式

Fig. 9 Slope instability mode

4 结果讨论

针对降雨与地下水联合入渗下斜坡失稳机理研究, 目前常用的方法多为理论分析方法。然而对此方面的研究需了解斜坡在变形失稳过程中宏观变化特征及内部水土响应规律。因此通过模型试验研究, 弥补了理论分析方法在视觉直观上了解失稳过程的缺陷。

通过模型试验可知, 降雨与地下水入渗是导致斜坡失稳的重要因素。在降雨与地下水渗流作用下, 斜坡底部土体饱和, 坡脚发生流滑, 导致在坡顶形成卸荷裂隙或者不均匀沉降, 这与裴向军等^[23]、吴昊宇等^[24]和慕焕东等^[25]等单一地下水入渗研究结果基本一致。但不同于单一地下水入渗, 坡脚流滑后, 坡顶出现多条拉裂缝。本文中坡顶土体受降雨入渗, 土体含水率较高, 抗剪强度较低, 在坡脚流滑后, 坡顶拉裂缝较少或出现不均匀沉降。拉裂缝的形成有利于降雨入渗, 并在拉裂缝内形成静水压力, 推动土体滑动, 这与张强等^[26]、MIAO 等^[27]研究结果相同。不同于单一地下水入渗或者降雨入渗^[16-18], 因下部土体滑移变形, 导致上部土体在自重力下发生崩滑。模型试验中上部土体因降雨与地下水快速入渗, 达到饱和, 导致坡脚流滑向坡肩处发展。模型试验的结果基本重现了降雨与地下水联合入渗下, 以粉质黏土为滑体的斜坡变形破坏过程。因此在降雨期间, 应提高对此类滑坡的关注程度, 并做好斜坡的排水工程。

由于文中模型试验概化了滑坡的形态, 缩小了模型尺寸, 并对土体颗粒级配进行调整, 因此不能完全重现滑坡的变形破坏过程。此外, 本文对降雨与地下水联合入渗下斜坡失稳机理只是进行了简单的研究。对于土体类型、密实度、级配等影响因素, 以及斜坡内部土体受力状态未展开研究, 因此后续可在此方面展开进一步研究。

5 结论

(1)降雨与地下水联合入渗作用下, 地下水入渗水头为 1.7 m 的斜坡, 斜坡底部土体前期受地下水入渗, 后期降雨补给地下水后, 土体才达到饱和状态; 坡脚处、坡中和坡顶处土体受降雨入渗。地下水入渗水头为 2 m 的斜坡, 斜坡底部、坡脚和中部土体受地下水入渗达到饱和状态; 斜坡上部土体受降雨入渗达到饱和状态。

(2)斜坡内部湿润锋, 呈平行坡顶、坡面和坡脚向斜坡内部发展。其中 Test-2 湿润锋发展速率比 Test-1 快, 且 Test-2 地下水湿润锋最高可达 30 cm,

Test-1 仅为 10 cm。

(3)Test-1 变形失稳经历了降雨入渗促使坡脚发生流滑—降雨入渗促使坡中土体流滑与坡肩形成拉裂缝—降雨与地下水入渗促使坡面流滑与坡肩土体推移式破坏; Test-2 经历了坡底土体受地下水入渗导致流滑与坡肩塌陷—坡中土体受地下水入渗与坡面流滑—坡上部土体受降雨入渗, 土体发生流滑。

参考文献 (References):

- [1] NILSEN T H. Influence of Rainfall and Ancient Landslide Deposits on Recent Landslides (1950—1971) in Urban Areas of Contra Costa County, California[M]. Washington D. C: US Government Printing Office, 1975.
- [2] JIAO Y Y, ZHANG H Q, TANG H M, et al. Simulating the process of reservoir-impoundment-induced landslide using the extended DDA method[J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 37-48.
- [3] 李白露. 某邻近滑坡山区铁路大桥边坡变形监测[J]. *铁道勘察*, 2024, 50(3): 28-33.
- LI B L. Slope deformation monitoring of railroad bridge in mountainous area adjacent to a landslide[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2024, 50(3): 28-33.
- [4] 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. Research on seepage stability and control design of landslide in Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(4): 649-659.
- [5] 党杰, 范宣梅, 田维勇. 贵州黔西市仓堡田滑坡变形特征及成因分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(33): 14617-14625.
- DANG J, FAN X M, TIAN W Y. Deformation characteristics and cause analysis of Cangbotian landslide in Qianxi City, Guizhou Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(33): 14617-14625.
- [6] 汪标, 易庆林, 牛岩, 等. 地下水动态作用下大型碎裂顺层岩质滑坡变形响应规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2): 4140-4151.
- WANG B, YI Q L, NIU Y, et al. Analysis of deformation response of large-scale cataclastic bedding rock landslide under groundwater dynamics [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 42(S2): 4140-4151.
- [7] 刘佳意, 陈春利, 付昱凯, 等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 183-191.
- LIU J Y, CHEN C L, FU Y K, et al. Genetic mechanism and stability prediction model of rainfall-induced shallow accumulation landslide [J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 2024, 51(2):

183-191.

- [8] 冯学茂, 刘敏, 宋祉辰, 等. 基于失稳模量理论的降雨条件下非饱和边坡流滑与滑移失稳机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 81-91.
- FENG X M, LIU M, SONG Z C, et al. Study on fluid-slip and sliding instability mechanism of unsaturated slope under rainfall conditions based on instability modulus theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2024, 51(3): 81-91.
- [9] MIN L, MAO X F, HENG L Z, et al. A hydro-mechanical coupling model for predicting infiltration and ponding in unsaturated soils[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(10): 3435-3449.
- [10] 白亚军, 任建民, 田敏, 等. 基于改进 Mein-Larson 降雨入渗模型的黄土边坡稳定性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 131-139.
- BAI Y J, REN J M, TIAN M, et al. Stability analysis of loess slope based on improved Mein-Larson rainfall infiltration model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(4): 131-139.
- [11] 赵宇, 马朋博, 梁腾, 等. 初始地下水对浅层边坡降雨入渗及稳定性影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 61-70.
- ZHAO Y, MA P B, LIANG T, et al. Effect of initial groundwater on rainfall infiltration and stability of shallow slope [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 61-70.
- [12] WANG R C, WEN S J, SUN Z L. Analytical solution of rainfall infiltration in unsaturated soil slopes considering initial water content distribution[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(11): 4419-4431.
- [13] ZHEN Z L, XIN Z Y, HONG Z Q, et al. Stability analysis of an unsaturated soil slope considering rainfall infiltration based on the Green-Ampt model [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(10): 2577-2590.
- [14] JOE J E, ALI N, JUSOH N S. Numerical modelling of coupled seepage-deformation subjected to rainfall infiltration in unsaturated slope[J]. World Journal of Engineering, 2020, 17(6): 867-875.
- [15] ANDREW G, PAUL S, PABLO A M. Constraining the critical groundwater conditions for initiation of large, irrigation-induced landslides, Siguan River Valley, Peru [J]. Landslides, 2021, 18(12): 3753-3767.
- [16] 王司法, 江兴元, 杨义, 等. 降雨条件下裂隙土坡水土响应与变形破坏特征试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 143-153.
- WANG S F, JIANG X Y, YANG Y, et al. Experimental study on soil and water response and deformation and failure characteristics of fractured soil slope under rainfall conditions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 143-153.
- [17] ZHOU Y F, THAM L, YAN R, et al. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55330-55341.
- [18] 宋享桦, 谭勇, 陆焯, 等. 不同入渗边界条件下简单均质砂土边坡失稳模型试验和数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(5): 1204-1218.
- SONG X H, TAN Y, LU Y, et al. Model test and numerical simulation of instability of simple homogeneous sandy soil slope under different infiltration boundary conditions [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(5): 1204-1218.
- [19] ZHANG Q Z, LUO Z J, CHEN Y, et al. Physical model experiments on failure mechanism on slopes of weathered basalt doils during heavy rainfall events[J]. Materials, 2023, 16(2): 832-832.
- [20] SUN P, WANG G, WU Z L, et al. Physical model experiments for shallow failure in rainfall-triggered loess slope, Northwest China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(6): 4363-4382.
- [21] 李子安, 陈璠, 吴道勇, 等. 泉水补给型地下水渗透诱发堆积层滑坡机理物理模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 142-153.
- LI Z A, CHEN F, WU D Y, et al. Study on physical simulation of accumulation landslide induced by spring recharge groundwater infiltration [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4): 142-153.
- [22] ZHANG S, PEI X J, WANG S Y, et al. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in Northwest China[J]. Engineering Geology, 2019, 259105170-105170.
- [23] 裴向军, 张硕, 黄润秋, 等. 地下水雍高诱发黄土滑坡离心模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 55-63.
- PEI X J, ZHANG S, HUANG R Q, et al. Centrifugal model test of loess landslide induced by groundwater flooding [J]. Engineering Science and Technology, 2018, 50(5): 55-63.
- [24] 吴昊宇, 崔圣华, 裴向军, 等. 灌溉诱发黄土滑坡的离心试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(S1): 259-263.
- WU H Y, CUI S H, PEI X J, et al. Centrifugal test study on irrigation-induced loess landslide [J]. People's Yangtze River, 2017, 48(S1): 259-263.
- [25] 慕焕东, 宋登艳, 张茂省, 等. 灌溉诱发黄土滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 172-177.
- MU H D, SONG D Y, ZHANG M S, et al. Centrifugal model test of irrigation-induced loess landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 172-177.
- [26] 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 Z J, et al. Centrifugal test study on landslide of accumulative body under complex reservoir operation and rainfall condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2427-2440.
- [27] MIAO F S, WU Y P, ÁKOS T, et al. Centrifugal model test on a

riverine landslide in the Three Gorges Reservoir induced by rainfall and water level fluctuation[J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, 13(3): 101378.

[28] 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 J F, LI Y A, HU Y, et al. Model test study on deformation characteristics of ancient landslide under reservoir water fluctuation and rainfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42 (2): 471-480.

[29] 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 Q Q, JIAO Y Y, SONG L, et al. Model test of reservoir bank

landslide under the combined action of rainfall and reservoir water level [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (11): 4361-4370.

[30] WEI Z L, WANG D F, SUN H Y, et al. Comparison of a physical model and phenomenological model to forecast groundwater levels in a rainfall-induced deep-seated landslide [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124894.

[31] WANG H L, JIANG Z H, XU W Y, et al. Physical model test on deformation and failure mechanism of deposit landslide under gradient rainfall [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(1): 66.

(责任编辑 王璐)