杨校辉,杨辉,郭楠,等.舟曲堆积体滑坡强降雨破坏机理及滑带剪切特性试验研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1285-1295.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250322002

Yang Xiaohui, Yang Hui, Guo Nan, et al. Experimental study on failure mechanism and slip zone shear characteristics of Zhouqu accumulative landslides under heavy rainfall[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1285-1295. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250322002

舟曲堆积体滑坡强降雨破坏机理及滑带剪切特性试验研究

杨校辉[1,2], 杨 辉[1,2], 郭 楠[1,2], 朱 鹏[1,2], 杜一博[1,2]

(1. 兰州理工大学 土木与水利工程学院,甘肃 兰州 730050;
2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050)

摘要: 舟曲地区堆积体滑坡分布广泛,危害严重。为研究强降雨作用下该地区堆积体滑坡破坏机理及滑带土剪切特性,以舟曲江顶崖滑坡为例,分别开展强降雨物理模型试验与滑带土直剪试验。试验结果表明:(1)在强降雨作用下,滑坡破坏主要经历坡表侵蚀与局部破坏、滑带饱和与变形贯通、整体失稳三个阶段,破坏形式以冲蚀诱发的块状滑动为主,坡面冲沟发育成熟,坡脚局部破坏剧烈;(2)强降雨过程中,堆积体滑坡变形经历短时加速、短时减速、低速蠕变三个阶段;强降雨前期,滑坡发生牵引-推移式破坏;强降雨中后期,滑坡后部推移作用减弱,滑坡变形主要受前部牵引作用控制;(3)天然状态下,滑带土的破坏模式与正应力密切相关,浅部滑带土表现为应变软化特征,深部滑带土则呈现弱应变硬化特征;(4)降雨作用下,滑带土抗剪强度受含水率与正应力共同影响,其强度劣化主要受颗粒间摩擦特性弱化所主导;(5)堆积体滑坡在强降雨作用下的破坏链可概括为:坡表径流冲刷→前缘滑塌→前缘牵引-后缘推移协同滑移→雨水优势入渗→滑带强度衰减→后缘推移衰退→主滑面贯通→前缘牵引主导的整体滑移。研究成果可为强降雨作用下堆积体滑坡的工程防治提供参考。

关键词: 强降雨;堆积体滑坡;滑带;破坏机理;抗剪特性;模型试验

中图分类号: P642.22 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)06-1285-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250322002

Experimental study on failure mechanism and slip zone shear characteristics of Zhouqu accumulative landslides under heavy rainfall

Yang Xiaohui[1,2], Yang Hui[1,2], Guo Nan[1,2], Zhu Peng[1,2], Du Yibo[1,2]

(*1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;*
2.Western Engineering Research Center of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Accumulative landslides are widely distributed and cause severe damage in the Zhouqu

收稿日期:2025-03-22

基金项目:甘肃省科技重大专项(23ZDFA007);甘肃省联合科研基金(25JRRL007,25JRRA1155)

第一作者简介:杨校辉(1986-),男,博士,教授,主要从事非饱和土地基处理及滑坡防治等方面的研究工作。E-mail: yxhui86@126.com。

area, where their failure mechanism and slip zone shear characteristics under heavy rainfall remain a critical concern. Using the Jiangdingya landslide as a case study, this study conducted a physical model test simulating heavy rainfall together with direct shear tests on slip zone specimens to investigate these characteristics. The results indicate that the following: (1) Under heavy rainfall, landslide failure progresses through three main stages: slope surface erosion and local damage, saturation and deformation penetration of the slip zone, and overall instability, with the failure mode predominantly erosion-induced block sliding, accompanied by well-developed gullies on the slope surface and severe localized damage at the slope toe. (2) During heavy rainfall, the cumulative landslide experiences three stages: short-term accelerated deformation, short-term decelerated deformation, and low-speed deformation, with the failure mechanism evolving from traction-push failure in the early stage to a pattern in the middle and late stages, in which the push at the rear part weakens, and the landslide is instead controlled by traction at the front part. (3) In the natural state, the failure mode of the slip zone is closely related to normal stress, with the shallow slip zone exhibiting strain-softening behavior and the deep slip zone exhibiting weak strain-hardening behavior. (4) Under rainfall conditions, the shear strength of the slip zone is affected by both water content and normal stress, and its degradation is dominated primarily by the weakening of interparticle friction. (5) Overall, the failure evolution chain of accumulative landslides under heavy rainfall can be summarized as follows: slope surface runoff scouring → leading-edge collapse → leading-edge traction and trailing-edge push → preferential rainwater infiltration → slip zone strength attenuation → reduction in trailing-edge push force → formation of a throughgoing main sliding surface → leading-edge traction-dominated overall sliding. The findings provide a reference for the engineering prevention and control of such landslides under heavy rainfall.

Keywords: heavy rainfall; accumulative landslide; slip zone; failure mechanism; shear properties; model test

0 引言

舟曲县位于甘肃省南部、青藏高原东北边缘，是我国滑坡地质灾害高发区之一[1]。该区地形起伏大，地质构造复杂，碳质板岩作为主要岩组在区内广泛分布。堆积体滑坡约占舟曲地区滑坡总数的40%，是当地主要的滑坡类型。该类滑坡在强降雨等外界作用下极易复活，具有发生频次高、影响范围大、灾害后果严重的特点，严重制约区域发展并威胁人民生命财产安全。

目前，针对降雨诱发滑坡破坏机理的研究主要包括数值模拟[2-4]、现场实测[5]和模型试验[6-10]。其中，模型试验因直观性强，能较好控制变形因素并再现滑坡演化过程，被视为一种有效的研究方法[6]。孟生勇等[7]依托室内降雨滑坡模型试验，从孔隙水压力、基质吸力与含水率变化角度揭示了滑坡变形发展规律。王斌等[8]通过边坡模型试验，归纳了降雨条件下不同含石量堆积体边坡的变形破坏模式。左自波等[9]针对不同级配堆积体开展室内降雨模型试验，探讨了颗粒级配对堆积体边坡变形与破坏的影响。张强等[10]借助离心机试验研究了库岸滑坡失稳机制，发现坡体在降雨作用下呈推移式破坏。然而，由于降雨过程的复杂性及土体性质的多样性，现有研究尚难以全面解释滑坡失稳机理。因此，亟需深入探究不同降雨强度、降雨模式及土体条件对滑坡变形破坏的具体影响机制，并系统总结其破坏规律。更为关键的是，堆积层滑坡的稳定性受软弱滑带控制较为显著，这使得深入研究滑带土的力学特性成为揭示滑坡变形破坏本质的核心所在。

滑带作为控制滑坡稳定的关键结构面，其力学特性直接影响着滑坡的失稳与否。因此，精确揭示滑带力学特性至关重要。周春梅等[11]基于直剪试验与压缩试验，研究了不同含水率对滑带土抗剪强度和变形模量的影响。王鲁男等[12]采用环剪试验，揭示了不同条件下滑带土残余强度的变化规律，重点探讨了残余强度的速率效应及含水率对该效应的影响。蒋秀姿等[13]通过对锁儿头滑坡滑带土开展残余状态直剪蠕变试验，研究了滑带土剪切破坏

后的蠕变特性，并提出以残余强度替代长期强度用于复活型滑坡稳定性评价。苗发盛等[14]通过开展不同渗透压力条件下的滑带土环剪试验，发现其残余强度与渗透压力呈负相关，且随渗透循环次数增加，土体应变软化现象更显著。刘清秉等[15]通过开展滑带土在残余强度状态下的蠕变试验，研究了不同应力水平下的蠕变规律，发现其蠕变速率与剪切应力比相关。然而，上述研究多基于室内重塑扰动试样，虽提供了重要的力学参数和认识，但仍存在局限性。室内重塑样难以完全复现滑带土的原位结构与状态，导致试验结果可能存在偏差。此外，仅关注残余强度或单一特征强度的研究，难以全面解释滑坡的破坏机制[16]。因此，深入研究滑带土的完整力学特性显得尤为关键和必要。

基于此，本文以舟曲县江顶崖堆积体滑坡为研究对象，通过物理模型试验分析其变形破坏特征及机理。在此基础上，结合滑带土的原位及室内剪切试验，研究其剪切特性与强度变化规律，以期进一步阐明堆积体滑坡的破坏机理，为同类滑坡的研究和工程防治提供参考。

1　江顶崖滑坡概况

江顶崖滑坡位于甘肃舟曲南峪乡白龙江左岸，属南峪滑坡群的一部分（图 1）。2018 年 7 月，受汛期连续降雨的影响，江顶崖堆积体滑坡发生复活滑动。此次滑动的滑体（H_1 滑坡）位于江顶崖老滑坡体（H 号滑坡）中部（图 1），滑坡主滑方向长约 462 m，宽约 210 m，滑体厚约 26.5 m，总体积约 338.1×10^4 m^3。

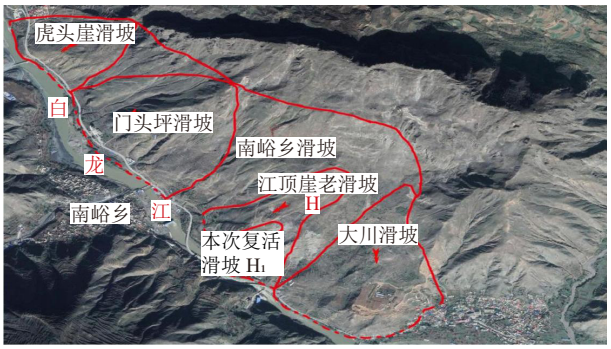


图 1　江顶崖滑坡全貌[17]

Fig. 1　Overview of Jiangdingya landslide[17]

江顶崖滑坡区地形以构造、侵蚀形成的山地为主，山脉与河谷相间分布，地形起伏较大。受构造单元影响，滑坡区内褶皱、断裂发育。此外，受舟曲—武都地震亚带影响，滑坡区地震活动频繁，过去 30 年间多次发生 5.0 级及以上地震，区内岩体破碎严重，土体结构松散。江顶崖滑坡滑体主要为碎石土[图 2（a）]，土体结构零乱且松散，透水性强；滑带以碳质板岩为主[图 2（b）]，属中-上志留统强风化岩，岩体结构相对致密，小型褶曲与片理发育，产状为 110°∠60，局部滑带混杂有含砾黏土成分；滑床主要由碳质板岩、千枚岩等构成，结构较密实，压实程度高。本次复活滑动导致滑坡后壁及侧壁共发育 4 处次级滑坡及多组张拉裂缝群；滑坡中下部存在大量陡坎与剪切裂缝，裂缝走向均垂直于滑向，东侧

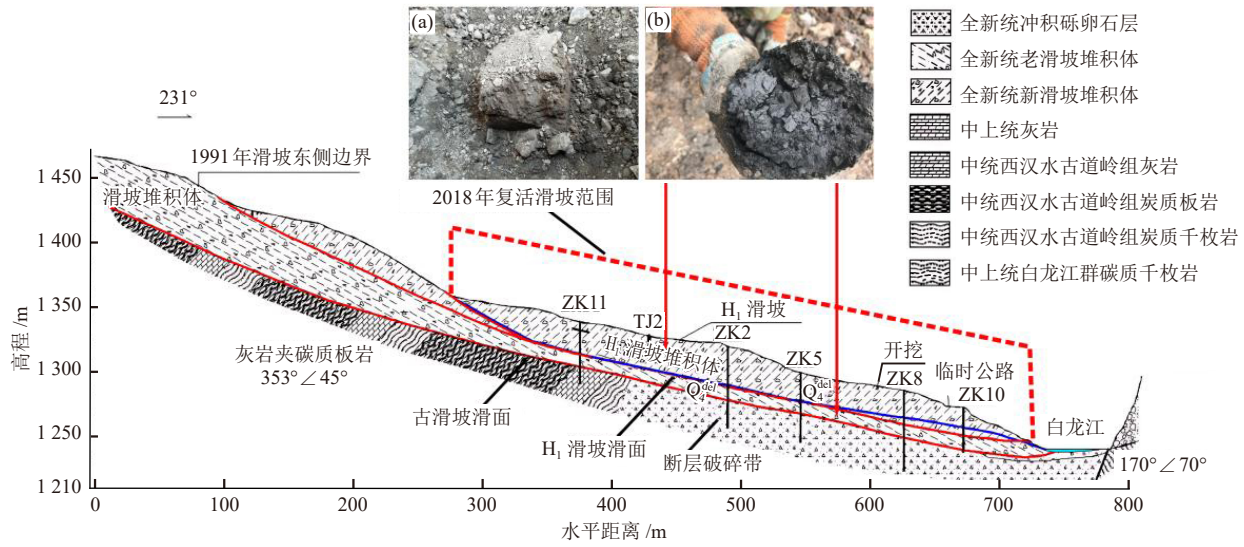


图 2　江顶崖滑坡工程地质剖面图

Fig. 2　Engineering geological profile of Jiangdingya landslide

部分地表出现下沉现象。

2 模型试验设计

2.1 模型设计与制作

本次试验采用地质力学模型，根据滑坡变形区规模及试验条件，综合确定几何相似系数 C_l=200。按几何相似比换算，确定模型尺寸为长 2 670 mm，宽 1 300 mm，高 1 400 mm。依据分析方程法与第二相似定理[18]，选定几何尺寸（C_l=200）、密度（C_ρ=1）、重力加速度（C_g=1）作为基本控制量，表 1、表 2 分别为模型相似判据和时间相似系数推导的主要过程。本次模型中土体渗透系数与降雨强度是根据实际工程背景和现场条件，直接采用现场实际状态进行控制，旨在更真实地反映原型在降雨作用下的响应过程。模型各物理量相似关系列于表 3。

表 1 边坡降雨模型相似判据主要推导过程

Table 1 Main derivation process of similarity criteria for the slope rainfall model

推导基础	相似指标关系	相似判据
基于弹性理论，原型静力平衡微分方程	$\frac{C_\sigma}{C_l C_F}=1$	$\pi_1=\frac{\sigma}{lF}$
基于弹性变形范围内材料应力-应变关系	$\frac{C_\sigma}{C_E C_\varepsilon}=1;\frac{C_\sigma C_\mu}{C_E C_\varepsilon}=1$	$\pi_2=\frac{\sigma}{\varepsilon E}$
基于弹性力学三维问题几何方程	$\frac{C_\delta}{C_l C_\varepsilon}=1$	$\pi_3=\frac{\delta}{\varepsilon l}$
基于弹性力学边界应力与面力关系方程	$\frac{C_T}{C_\sigma}=1$	$\pi_4=\frac{T}{\sigma}$

表 2 边坡模型降雨时间相似系数主要推导过程

Table 2 Main derivation process of time similarity coefficients for the slope model

推导基础	量纲关系	推导结果
基于牛顿第二定律及两个系统的运动相似确定时间相似系数	$\sigma=\frac{F}{l^2}$	$C_t=\sqrt{C_l}$

表 3 模型物理量相似关系

Table 3 Similarity relations of model physical quantities

物理量	相似关系	相似比
长度	C_l	200
密度	C_ρ	1
时间	$C_t=\sqrt{C_l}$	14
渗透系数	C_k	1
降雨强度	q	1

为真实反映滑坡变形破坏特征，模型采用滑坡现场原状土料进行填筑。经室内土工试验测定，滑体与滑带主要物理参数列于表 4。

表 4 试验土样物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of test soil samples

土层	含水率/%	天然密度/(g/cm³)	最大干密度/(g/cm³)	干密度/(g/cm³)	饱和渗透系数/(cm/s)
滑体	13.10	1.99	2.166	1.74	2.38×10^{-4}
滑带	11.85	2.02	1.837	1.63	2.91×10^{-6}

模型具体制作流程如下：(1)根据滑坡形态特征，砌筑基岩：采用红色砌砖模拟基岩层，砖块缝隙处用水泥土做缝隙填充。(2)填筑滑带、滑体：填筑之前测定每一层土样含水率、干密度等指标，当各项指标满足规定要求后方可采用分层填筑、分层夯实方法进行填筑，每次填筑土料厚度为 5 cm，填筑过程中采用人工击实方式对土料进行压实处理，其中滑体压实度为 0.80，滑带压实度为 0.88。每层土体填筑夯实完成后利用环刀取样进行含水率、干密度等指标测试，参数达标后进行土层刨毛处理，依次填筑模型，滑带和滑体位置由钢化玻璃上的简化轮廓线控制。

2.2 试验装置

本次试验设备包括模型箱、降雨装置和监测装置。模型箱尺寸为 3 100 mm×1 300 mm×2 000 mm（长×宽×高），框架由方形钢管及钢板焊接拼装而成。降雨采用自行设计的可调节便携式降雨装置进行，主要包括雾化喷头、储水罐、压力泵、控水阀和流量表等（图 3）。

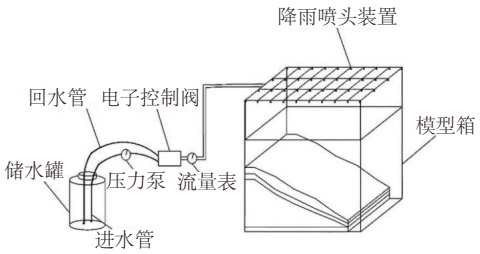


图 3 降雨装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the rainfall simulation device

为保证降雨均匀度，分别对单、双雾化喷头性能进行测试。单个喷头最大喷洒直径约为 1.0 m，其降雨强度峰值出现在距喷头 0.25 m 的圆周上[图 4(a)]；双喷头叠加作用下，雨强分布更均匀[图 4(b)]。基于喷头性能测试结果，试验中采用行列间距均为 0.25 m 的喷头布设方案，按 4 排×10 列矩阵布置共计 40 个雾化喷头。降雨装置布设完成后，为验证实际均匀度，在模型试验区域内均匀布置 5 个

测点，每个测点放置内径 4 cm 的标准量筒。降雨一段时间后，测量各量筒内累积雨量，并依据式(1)，计算得到该布设方案的降雨均匀度为 90.5%，满足大于 80% 的要求[19]。

$$U=1-\frac{\sum\left|R_i-\overline{R}\right|}{n\overline{R}} \tag{1}$$

式中：R_i 为测点 i 的降雨量；n 为测点数；$\overline{R}$ 为所有测点的平均降雨量。

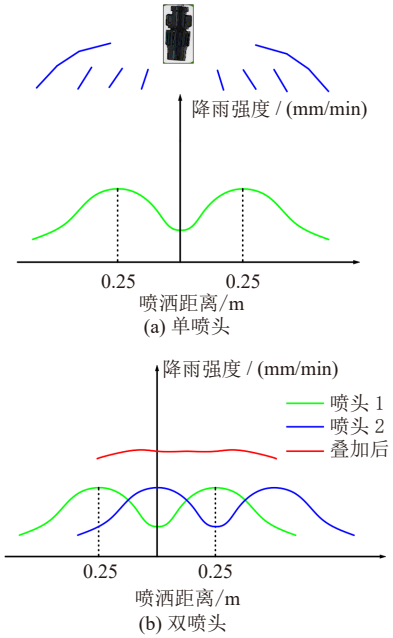


图 4　雾化喷头雨强示意图

Fig. 4　Schematic diagram of rainfall intensity of the atomizing nozzle

本次试验监测装置包括土壤水分计与全向位移计。水分计型号为 TDR-3，探头尺寸为直径 50 mm、长 200 mm；其原理是通过测量电磁波在土壤中的传播时间，反演介电常数，进而换算体积含水量。全向位移计型号为 JMQJ-7915ATS，测量范围为 ±15°，灵敏度为 0.001°，精度为 ±0.05%FS；其原理是通过测量土体变形引发的倾角变化，结合传感器布设位置，计算带动位移计偏移的土层水平位移。试验监测面与监测装置布设如图 5 所示。模型共设置 5 个监测面：后缘、中后部、中部、中前部及前缘。体积含水率监测点共 14 个，其中前缘 2 个，其余 4 个监测面各 3 个。位移监测点共 8 个，其中坡表 3 个、滑带 3 个、滑床 2 个。所有监测装置均垂直埋设，其中，滑体监测装置埋置于滑体表层下 1～3 cm 处。滑带内监测装置的埋深根据类型设置：水分计埋置于滑体水分计下方 20 cm 处，全向位移计埋置于滑体位移计下方 15 cm 处。滑床监测装置的埋深设置与滑带一致。滑坡模型实物如图 6 所示。

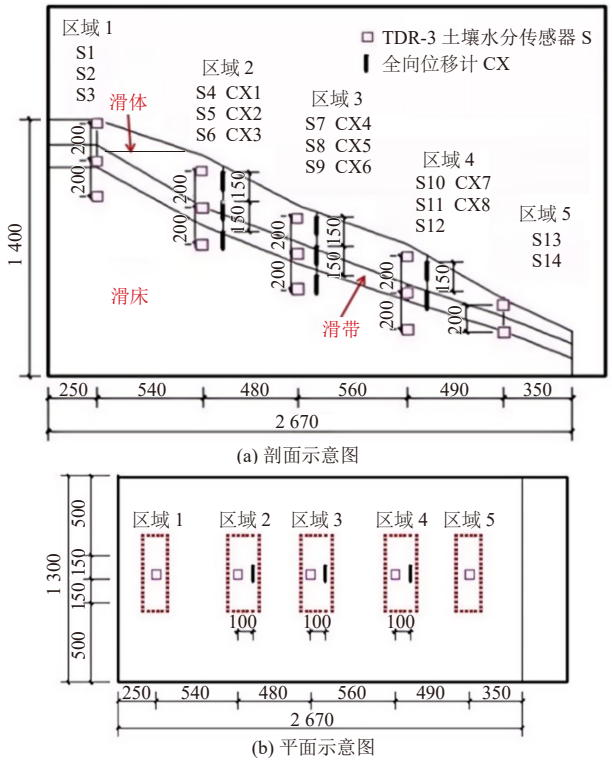


图 5　试验装置布置示意图(单位：mm)

Fig. 5　Layout diagram of test setup (unit: mm)

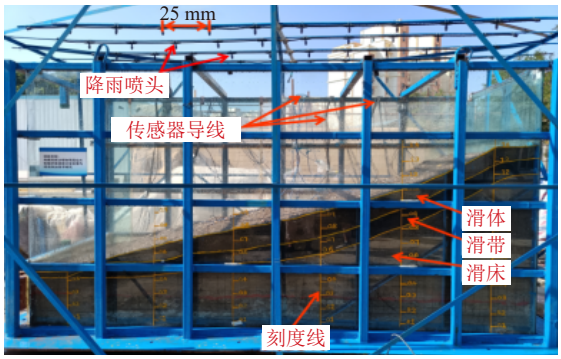


图 6　滑坡模型实物图

Fig. 6　Photograph of the landslide model

2.3　试验方案设计

舟曲地区降雨以阴雨或短时暴雨为主，日最大降雨量为 64 mm，1 h 最大降雨量为 50 mm。根据舟曲当地气象资料，结合滑坡发生前的实际降雨情况，确定对滑坡模型进行 50 mm/h 的连续强降雨模拟。在连续强降雨过程中，分别对模型不同区域、不同深度滑体、滑带、滑床的含水率与位移进行实时监测，直至坡体发生破坏，试验结束。

3 试验结果分析

3.1 滑坡变形破坏特征

本次试验采用高速摄像机记录滑坡变形破坏过程。图7展示了滑坡体在q=50 mm/h强降雨作用下的变形发展过程,其滑动破坏过程如下:

(1) 强降雨初期:坡体表面逐渐湿润,坡面土体颗粒逐渐黏结并形成泥团。大量雨水在坡面汇聚形成径流,并向前缘流动。

(2) 强降雨45 min[图7(a)]:大量径流汇集于坡体前缘,坡面部分土颗粒与小石块被径流冲刷带走,坡体前缘右侧发生小规模滑移。

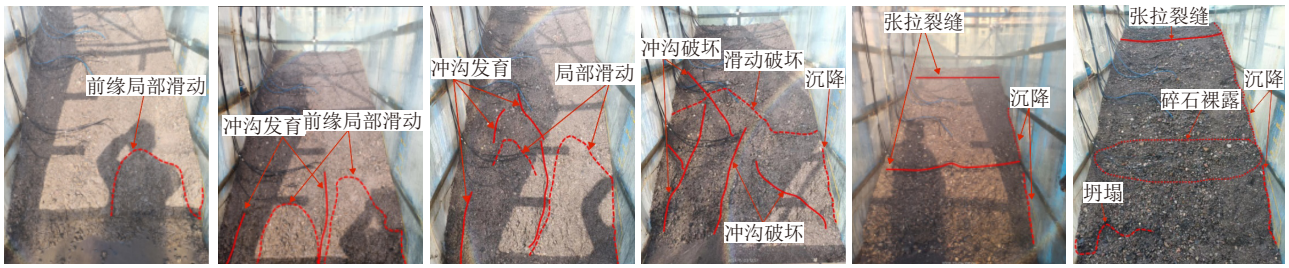
(3) 强降雨100 min[图7(b)]:坡体前缘左侧发生小规模滑移与塌陷,坡面前缘发育两条较长的冲沟,其中一条贯穿前缘滑块。

(4) 强降雨140 min[图7(c)]:坡面冲沟与裂缝开始增多,并逐渐由前缘向坡体中部延伸。同时,坡体变形破坏加剧,破坏范围由前缘向中部扩展,土体流失严重,大量泥沙与小砾石在前缘堆积。

(5) 强降雨200 min[图7(d)]:坡面冲刷与破坏现象严重,冲沟与裂缝数量显著增多,集中分布于前缘与中部坡面。坡体变形破坏范围扩展至坡体中部,各独立的滑块开始相互连接、贯通。滑坡中下部右侧出现轻微沉降。

(6) 强降雨1 d[图7(e)]:前缘与中部滑块连接、贯通形成整体,坡面最终呈现圈椅状滑动形态。坡体中部与后缘先后发育两条较宽的张拉裂缝。坡体中下部右侧发生显著沉降。

(7) 强降雨2 d[图7(f)]:坡体结构基本趋于稳定。坡面分布多条深长冲沟,坡面细小土颗粒几乎被全部冲刷带走,前缘与中部坡面冲蚀破坏显著。



(a)降雨45 min (b)降雨100 min (c)降雨140 min (d)降雨200 min (e)降雨1 d (f) 降雨2 d

图7 滑坡变形破坏现象

Fig. 7 Failure and deformation characteristics of the landslide

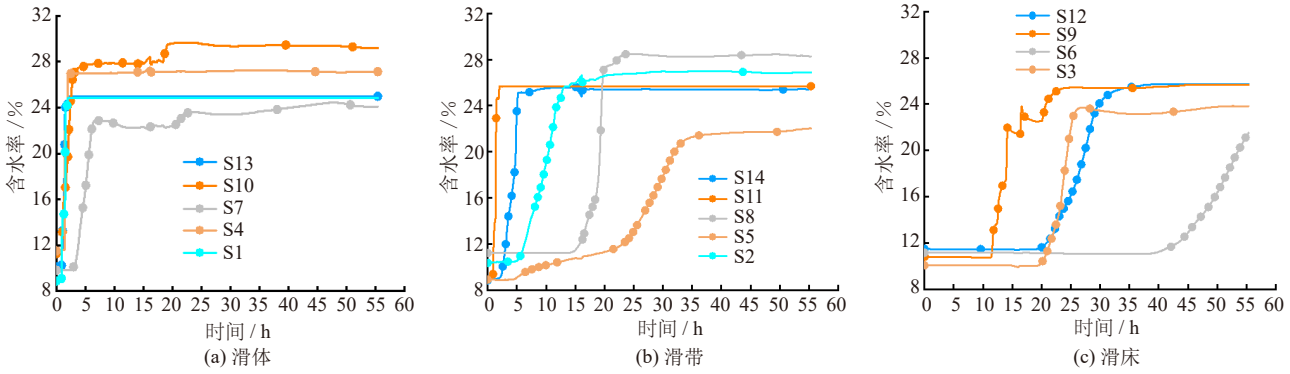
3.2 坡体含水率监测结果分析

强降雨作用下,滑坡不同部位含水率变化曲线如图8所示。由图可知,强降雨初期,滑体测点S1、S4、S10、S13含水率近乎同步增长,强降雨约2.5 h时测点含水率达到峰值,其降雨入渗速率相近(约5.5×10^{-4} cm/s)。随着强降雨持续,大量雨水入渗至滑带,其含水率相继开始增长。受滑体高透水性影响,部分区域滑带含水率变化与滑体近乎同步。强降雨约20 h时,除S5区域外,其余区域滑带基本达到饱和状态;强降雨约35 h时,全部滑带达到饱和状态。滑床因低渗透性制约,含水率增长速率显著小于滑体与滑带,直至试验结束仍未全部饱和。

受坡面积水持续作用及土体逐渐饱和的共同影响,雨水入渗速率随降雨历时呈总体下降趋势(表5),其中,强降雨前期(1~2 h)下降最快,强降雨中后期降幅逐渐趋缓。滑体与滑带含水率变化趋势相似:均表现为先快速上升,后趋于稳定。空间分布上,滑体饱和含水率沿滑坡纵向或沿滑坡主滑方向近似呈“M”形分布(图9),即中后部与中前部滑体饱和含水率最大,中部滑体饱和含水率最小;滑带饱和含水率分布特征与滑体正好相反,中部滑带饱和含水率最大,中后部滑带饱和含水率最小。

3.3 坡体位移监测结果分析

强降雨作用下,滑坡不同位置位移变化曲线如图10所示。由图可知,强降雨前期,滑体与滑带变形剧烈。其中,中前部滑体水平位移最大(约14.58 mm),变形速率最高(平均2.08 mm/h);其次为中后部(13.34 mm,1.91 mm/h)和中部(8.76 mm,1.25 mm/h)。强降雨中后期,边坡整体变形速率显著减小,中后部、中部、中前部滑体平均变形速率分别降至0.26 mm/h、0.49 mm/h、0.88 mm/h。强降雨约31 h,各部位滑体与滑带累计位移达到峰值。滑体累计位移表现为:中前部(约35.69 mm)>中部(约20.66 mm)>中后部(约19.61 mm);滑带累计



(a) 滑体　(b) 滑带　(c) 滑床

图 8　滑体-滑带-滑床含水率变化曲线

Fig. 8　Water content variation curves of the sliding mass, slip zone, and bedrock

表 5　强降雨关键时段雨水入渗深度与速率

Table 5　Rainwater infiltration depth and rate during critical periods of heavy rainfall

降雨历时/h	入渗深度/cm	入渗速率/($\times10^{-4}$ cm/s)
1	0～4	11.1
2	4～5	6.94
⩾4	5～7	4.86

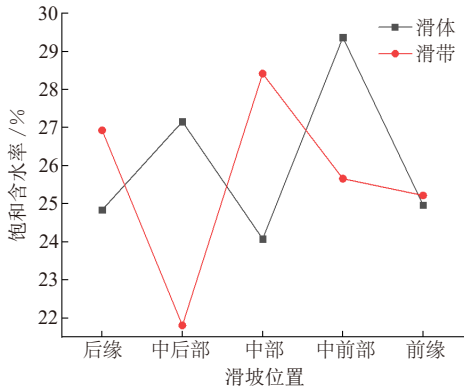
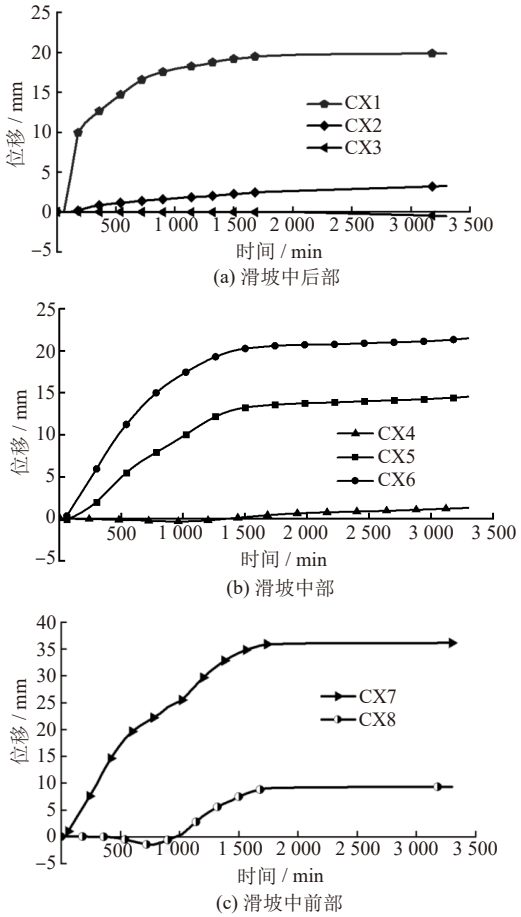


图 9　不同区域滑体与滑带饱和含水率变化曲线

Fig. 9　Variation curves of saturated water content in the sliding mass and slip zone across different zones

位移表现为：中部(13.65 mm)＞中前部(8.95 mm)＞中后部(2.57 mm)。

江顶崖堆积体滑坡在强降雨作用下发生“牵引-推移式”破坏[20]。强降雨前期，滑坡中前部与中部相对位移为 5.82 mm，中部与中后部相对位移为 −4.58 mm；强降雨中后期，滑坡中前部与中部相对位移为 9.21 mm，中部与中后部相对位移为 5.63 mm。根据滑坡各部相对位移结果发现，强降雨前期，滑坡主要依靠前部牵引与后部推移发生滑动；强降雨中后期，滑坡中前部与中部相对位移相较于强降雨前期继续增大，但中部与中后部相对位移出现反向增长，滑坡后部推移作用逐渐减弱，滑



(a) 滑坡中后部　(b) 滑坡中部　(c) 滑坡中前部

图 10　滑坡各位置时间-位移变化曲线图

Fig. 10　Time-displacement curves at different positions of the landslide

坡滑动主要依靠前部牵引。在强降雨过程中，滑坡变形主要经历了短时加速变形、短时减速变形、低速变形三个阶段。中部滑带变形最大，是控制滑坡滑移破坏的关键区域。滑坡变形速率与滑体含水率变化呈现显著同步性：在含水率快速上升期，滑坡进入快速变形阶段；而当含水率趋于饱和后，变

形速率则逐渐降低。这种同步变化规律表明,滑体含水率可作为有效指标之一,实时反映坡体的变形动态。

4 滑带剪切特性试验研究

准确获取滑带在天然状态下的真实抗剪强度参数,并定量评估含水量变化对其强度的弱化效应,是滑坡机理研究的核心基础。因此,本节首先通过滑带现场原位剪切试验,获取滑带在天然环境下的真实抗剪强度参数;其次,通过室内剪切试验,探究含水量对滑带强度的影响规律。

4.1 现场原位剪切试验

4.1.1 试验方案

现场直剪试验的试点选在滑坡后部滑带出露处,共制作6组长×宽×高均为0.6 m×0.6 m×0.35 m的试块。试验采用平推法,利用千斤顶施加水平荷载,并以现场机械设备及试坑侧壁作为反力支撑面(图11)。试验过程中,首先垂直于预定剪切面施加法向荷载,分6级逐级施加,目标值分别为100、200、300、400、500、600 kPa,每级荷载施加后,静置5 min,待法向变形稳定。随后,平行于预定剪切面并通过试件中心施加水平剪切荷载,按预估最大荷载的8%~10%分级等量施加,每5 min加载1次,直至试块剪断。



(a) 竖向加载装置



(b) 横向加载装置

图11 现场试验装置图

Fig. 11 Photograph of the field test setup

为直观观测剪切变形过程,每组试块均采用由角钢和有机玻璃加工而成的透明剪切盒。除500 kPa法向应力试块因加载系统故障未测得有效结果外,其余5组试块均顺利完成试验。

4.1.2 试验结果分析

滑带现场剪切试验的剪应力-剪切位移曲线如图12所示。整体而言,所有试块均表现出较低的强度水平。在不同正应力作用下,各试块剪切位移曲线的变化规律基本一致。随着正应力由100 kPa增至600 kPa,试块剪切位移曲线的初始斜率依次增大,峰值抗剪强度亦相应提高。在试验初始阶段,剪应力随剪切位移增加呈非线性快速增长,且法向应力越大,增长速率越大。正应力较小的试块,在剪切位移达到2 mm时出现明显的应变软化特征,剪应力小幅回落;正应力为300 kPa时,试块在剪切位移达到4.5 mm后表现出显著的软化特征,剪应力明显降低;正应力较大的试块未表现出应变软化特征,反而呈现弱应变硬化特征,剪应力随剪切位移增大而缓慢增加,增幅逐渐减小,破坏后试块进入理想塑性流动状态。

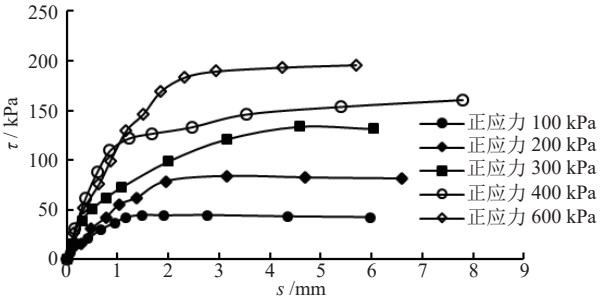


图12 滑带剪应力-剪切位移曲线

Fig. 12 Shear stress-shear displacement curves of the slip zone

天然状态下,江顶崖滑坡滑带强度特性与正应力水平密切相关,其破坏模式随约束条件不同存在显著差异:低约束条件下,滑带应变软化显著,强度损失较大;高约束条件下,滑带表现出一定的延性抗剪能力,能够维持较高的残余强度或发生渐进式破坏。基于最小二乘法拟合的天然状态下滑带抗剪峰值强度曲线如图13所示,根据莫尔-库仑强度准则,得到滑带的抗剪强度参数为:黏聚力14.7 kPa,内摩擦角19.7°。

4.2 室内剪切试验

4.2.1 试验方案

为研究含水量对滑带强度的影响,采用应变控

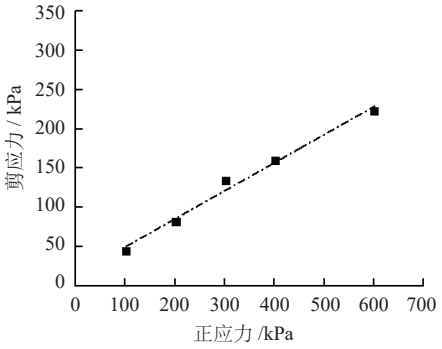


图 13　滑带抗剪峰值强度曲线

Fig. 13　Peak shear strength curve of the slip zone

制式剪切仪对重塑试样开展快剪试验,剪切速率为 2.4 mm/min。试验共制备 5 组不同含水率(6.7%、9.9%、12.2%、13.7% 及 15.4%)的重塑试样,分别在 100、200、300、400 kPa 四级竖向压力下开展试验。

4.2.2　试验结果分析

基于室内直剪试验数据,采用最小二乘法对不同含水率条件下滑带的剪应力-正应力关系进行拟合,并据此提取强度参数,拟合结果见图 14、15 及表 6。

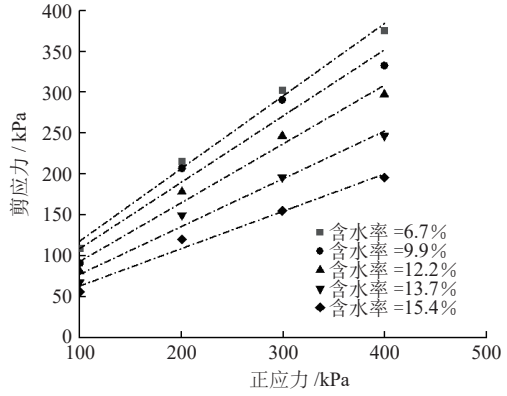


图 14　不同含水率滑带剪应力-正应力关系曲线

Fig. 14　Shear stress-normal stress relationship curves of the slip zone under different water contents

不同含水率条件下,滑带的剪-正应力关系曲线近似直线。相同含水率条件下,滑带抗剪强度与正应力成正比,正应力越大,抗剪强度越高;随着含水率增加,滑带抗剪强度衰减与正应力成反比,正应力越大,抗剪强度衰减越快。总体而言,滑带抗剪强度随含水率增加呈现非线性衰减:当含水率处于 9.9%～13.7% 区间时,滑带抗剪强度指标下降幅度最大,超过 50%;当含水率超过 13.7% 之后,滑带抗剪强度指标仍继续下降,但下降幅度逐渐减小。由图 15 可知,在降雨状态下,滑带内摩擦角与黏聚力

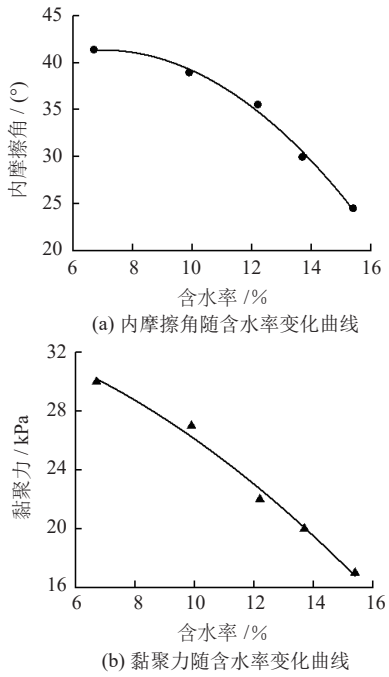


图 15　不同含水率滑带抗剪强度指标变化拟合曲线

Fig. 15　Fitting curves of shear strength parameters of the slip zone under different water contents

表 6　不同含水率状态下抗剪强度指标

Table 6　Shear strength parameters under different water content conditions

含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
6.7	30	41.41
9.9	27	38.97
12.2	22	35.56
13.7	20	29.98
15.4	17	24.51

随含水量增加呈指数关系降低;当含水率介于 6.7%～9.9% 时,滑带黏聚力衰减幅度较大;但当含水率超过 9.9% 时,内摩擦角衰减幅度远超黏聚力。综合对比,内摩擦角衰减程度明显高于黏聚力,由此表明滑带的内摩擦角对含水率变化更敏感,岩体强度衰减主要由颗粒间的摩擦特性弱化所致。

综上,在强降雨作用下,江顶崖滑坡滑带抗剪强度受正应力与含水率耦合影响。相同含水率下,正应力增强滑带抗剪强度;含水率上升时,正应力加速滑带抗剪强度衰减。岩体颗粒间摩擦特性主导滑带强度衰减。需指出的是,滑带室内试验与现场原位试验所获得的强度指标存在差异,原因可能在于岩体结构及含水率空间分布的差异,导致室内重塑样难以完全还原野外原位原状样的复杂状况。

4.3 讨论

4.3.1 破坏模式

综合物理模型试验结果,可将堆积体滑坡在强降雨作用下的破坏模式划分为以下3个阶段:

(1) 坡表侵蚀与局部破坏:滑体含水率快速上升,坡表径流冲刷作用强烈,滑坡前缘发生局部滑塌破坏;前部滑体牵引中部滑移,后部滑体同步推移,滑坡变形速率达到峰值。

(2) 滑带饱水与变形贯通:滑带含水率持续快速增长,滑体趋于饱和状态,各独立滑块贯通形成连续变形区;后部滑块变形速率逐渐减小,前缘牵引作用持续增强,后部推移作用逐渐减弱。

(3) 整体失稳:滑带完全饱水,抗剪强度趋于稳定,贯通性主滑动面形成,滑体与滑带变形达到峰值,滑坡进入整体失稳后的残余稳定状态,坡体变形速率降至极低水平。

4.3.2 破坏机理

基于物理模型试验与滑带直剪试验结果,堆积体滑坡强降雨破坏机理可归纳为以下3个阶段:

(1) 灾变触发:强降雨前期,坡表径流冲刷和雨水入渗软化共同导致前缘率先失稳滑塌;前缘牵引效应随降雨历时显著增强,诱发张拉裂缝形成,成为雨水快速入渗的优势通道,加速水分向深部滑带运移。

(2) 变形贯通:雨水快速入渗导致中部和前部滑带含水率急剧上升,滑带抗剪强度因岩体颗粒间摩擦特性弱化呈指数型衰减;中部滑带因快速变形成为破坏核心区,后缘滑体受前缘持续牵引与滑带弱化效应影响,由初始推移转变为被动张拉,张拉裂缝快速扩展。

(3) 整体破坏:滑带完全饱水后强度衰减趋缓,前缘滑体在重力作用下低速滑动,后缘滑体推移作用持续减弱至基本消失;待前部滑体趋于停滞,滑坡进入残余稳定状态。

5 结论

(1) 强降雨过程中,江顶崖堆积体滑坡主要经历坡表侵蚀与局部破坏、滑带饱水与变形贯通、整体失稳三个破坏阶段。滑坡以冲蚀作用诱导的块状滑动为主,坡面冲沟与裂缝发育充分,坡脚局部破坏剧烈。

(2) 强降雨作用下,堆积体滑坡变形主要经历短时加速变形、短时减速变形、低速变形三个阶段。强降雨前期,堆积体发生牵引-推移式破坏,前部滑体牵引作用与后部滑体推移作用显著;强降雨中后期,后部滑体推移作用减弱,滑坡运动以前部牵引为主导。

(3) 天然状态下,滑带破坏模式与正应力密切相关:浅部滑带呈应变软化特征,深部滑带表现为弱应变硬化。降雨作用下,滑带抗剪强度受含水率与正应力共同控制,其劣化主要由颗粒间摩擦特性的弱化主导。

(4) 强降雨作用下,堆积体滑坡的“破坏链”可概括为:坡表径流冲刷→前缘滑塌形成牵引区→前缘牵引-后缘推移协同滑移→雨水优势入渗→滑带抗剪强度指数型衰减→后缘推移显著衰退→主滑面贯通→前缘牵引主导整体滑移。

参考文献(References)

[1] Xie Z T, Chen G, Meng X M, et al. A comparative study of landslide susceptibility mapping using weight of evidence, logistic regression and support vector machine and evaluated by SBAS-InSAR monitoring: Zhouqu to Wudu segment in Bailong River Basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(8): 313.

[2] 李宁, 许建聪. 基于ABAQUS的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 667-674.
Li Ning, Xu Jiancong. Development and application of three-dimensional rainfall infiltration module based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 667-674.

[3] 朱元甲, 贺拿, 钟卫, 等. 间歇型降雨作用下缓倾滑坡稳定性数值模拟[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 208-212.
Zhu Yuanjia, He Na, Zhong Wei, et al. Numerical simulation of the stability of gently landslides under intermittent rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 208-212.

[4] 石浩, 李远耀, 许艺林, 等. 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 222-233.
Shi Hao, Li Yuanyao, Xu Yilin, et al. Seepage characteristics of accumulation landslides under different types of heavy rainfall stability analysis[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2025, 52(3): 222-233.

[5] 张明晓, 李德营, 倪冰冰, 等. 不同降雨类型对中层堆积层滑坡变形的影响: 以万州区学堂塝滑坡为例[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(5): 102-111.
Zhang Mingxiao, Li Deying, Ni Bingbing, et al. Deformation influence of rainfall types on medium-seated colluvial landslide: a case study of Xuetangbang landslide in Wanzhou[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(5): 102-111.

[6] 钟源, 李远耀, 殷坤龙, 等. 基于物理模型试验的厚层堆积层

滑坡强降雨触发机制[J]. 地球科学，2023，48(10)：3912-3924.
Zhong Yuan，Li Yuanyao，Yin Kunlong，et al. Failure mechanism of thick colluvium landslide triggered by heavy rainfall based on model test[J]. Earth Science，2023，48(10)：3912-3924.

[7] 孟生勇，江兴元，杨义，等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J]. 水文地质工程地质，2023，50(1)：104-112.
Meng Shengyong，Jiang Xingyuan，Yang Yi，et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology，2023，50(1)：104-112.

[8] 王斌，李洁涛，王佳俊，等. 强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(增刊1)：234-248.
Wang Bin，Li Jietao，Wang Jiajun，et al. Model tests on accumulation landslides induced by extreme rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(S1)：234-248.

[9] 左自波，张璐璐，王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报，2015，37(7)：1319-1327.
Zuo Zibo，Zhang Lulu，Wang Jianhua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides：effects of particle-size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(7)：1319-1327.

[10] 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 Qiang，Zheng Yanni，Jia Chaojun，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.

[11] 周春梅，赵子鹏，鲁阳. 含水量对滑带土强度变形参数及滑坡稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报，2016，36(2)：213-219.
Zhou Chunmei，Zhao Zipeng，Lu Yang. The influence of water content on strength and deformation parameters of sliding zone and slope stability[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2016，36(2)：213-219. .

[12] 王鲁男，晏鄂川，宋琨，等. 滑带土残余强度的速率效应及其对滑坡变形行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2017，48(12)：3350-3358.
Wang Lunan，Yan Echuan，Song Kun，et al. Rate effect of residual strength of slip soils and its impact on deformation process of landslides[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2017，48(12)：3350-3358.

[13] 蒋秀姿，文宝萍. 缓慢复活型滑坡滑带土的蠕变性质与特征强度试验研究[J]. 岩土力学，2015，36(2)：495-501，549.
Jiang Xiuzi，Wen Baoping. Creep behavior of slip zone of reactivated slow-moving landslide and its characteristic strength[J]. Rock and Soil Mechanics，2015，36(2)：495-501，549.

[14] 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 slip zone soils of Tongjiaping landslide in Three Gorges Reservoir area based on seepage-ring shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2023，45(7)：1480-1489.

[15] 刘清秉，王顺，夏冬生，等. 残余强度状态下原状滑带土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学，2017，38(5)：1305-1313.
Liu Qingbing，Wang Shun，Xia Dongsheng，et al. Experimental study of residual-state creep behavior of intact sliding-zone soil[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(5)：1305-1313.

[16] 范志强，唐辉明，谭钦文，等. 滑带土环剪试验及其对水库滑坡临滑强度的启示[J]. 岩土工程学报，2019，41(9)：1698-1706.
Fan Zhiqiang，Tang Huiming，Tan Qinwen，et al. Ring shear tests on slip soils and their enlightenment to critical strength of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2019，41(9)：1698-1706.

[17] 张卫雄，杨校辉，丁保艳，等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡堆积层剪切特性与强度参数分析[J]. 中国地质灾害与防治学报，2025，36(1)：65-72.
Zhang Weixiong，Yang Xiaohui，Ding Baoyan，et al. Analysis of shear characteristics and strength parameters in Jiangdingya landslide，Zhouqu County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2025，36(1)：65-72.

[18] 罗先启. 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. Landslide model test theory and its application[M]. Beijing：China Water Resources and Hydropower Press，2008.

[19] 孙恺，张季如. 针管式人工降雨装置的设计与应用[J]. 武汉理工大学学报，2013，35(12)：125-129，134.
Sun Kai，Zhang Jiru. Design and calibration of needle-tubing artificial rainfall device[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2013，35(12)：125-129，134.

[20] 郭长宝，张永双，刘定涛，等. 基于离心机模型试验的甘肃江顶崖古滑坡复活机理研究[J]. 工程地质学报，2022，30(1)：164-176.
Guo Changbao，Zhang Yongshuang，Liu Dingtao，et al. Centrifuge model test of reactivation mechanism of Jiangdingya ancient landslide in Gansu Province[J]. Journal of Engineering Geology，2022，30(1)：164-176.

（本文编辑：张向红）