

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400550



本刊网刊

降雨及库水联合作用下膨胀土滑坡变形机理研究

黄晓虎^{1,2}, 胡禹龙^{1,2}, 郭飞^{1,2*}, 杨岚峒^{1,2}, 邓茂林^{1,2}, 肖宇煌³

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002;
3. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉 430034)

摘要:丹江口库区广泛分布的膨胀土滑坡对水库的长期稳定及安全运营造成巨大威胁。研究降雨及库水升降作用下膨胀土滑坡的失稳破坏机制, 是开展丹江口水库的滑坡灾害气象预警、风险评价及工程治理等防灾减灾工作的关键。以十堰市郧阳区金岗村滑坡为研究对象, 在综合分析地质勘察、全球导航卫星系统(GNSS)监测及降雨、库水等资料的基础上, 设计滑坡物理模型, 通过设置 3 种物理模拟工况, 实时监测滑坡破坏过程中孔隙水压力、含水率数据及坡体变形数据, 对降雨和库水位作用下的膨胀土滑坡的失稳机理进行了研究。主要研究结果如下: 1) 金岗村滑坡在降雨及库水联合作用下表现为逐级牵引式破坏。2) 库水和降雨导致滑坡内部孔隙水压力和含水率呈现不同的响应模式。3) 库水位下降对滑坡前缘会产生持续性的变形。降雨对滑坡会产生整体性的变形, 该变形明显大于库水位下降对滑坡产生的变形。经历库水位循环升降后的滑坡在强降雨条件下更容易发生大变形, 甚至失稳。4) 降雨及库水联合作用影响的膨胀土滑坡持续变形受到外部附加应力与内部强度指标减小的双重作用。

关键词:膨胀土滑坡; 变形破坏机理; 物理模型试验; 库水位升降; 降雨

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)02-0109-14

丹江口水库是亚洲第一大人造淡水湖, 也是中国南水北调中线工程水源地。库区范围内普遍分布了一种特殊性岩土——膨胀土, 土中富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物, 对水的作用十分敏感, 因此降雨极易诱发膨胀土边坡出现失稳破坏^[1-2]。调查显示, 受水库周期性蓄降水、降雨等因素影响, 库区有规模较大的膨胀土滑坡 78 处, 对水库的长期稳定及安全运营造成巨大威胁^[3]。因此, 研究降雨及库水升降作用下膨胀土滑坡的失稳破坏机制, 对于开展丹江口水库的滑坡灾害气象预警、风险评价及工程治理等防灾减灾工作, 具有重要实际意义。

长久以来, 如何应对膨胀土滑坡的失稳破坏机制问题一直是工程建设中的一大难题^[4]。膨胀土自身的结构特性、胀缩特性和强度衰减特性, 是膨胀土滑坡失稳破坏的主要原因^[5], 并呈现浅层性、牵引性、平缓

性、季节性和反复性等典型特征^[6]。同时, 就失稳模式而言, 部分学者将膨胀土滑坡破坏的力学机制归纳为两类: 一类是周边水环境变化引发的坡体含水率变化, 导致坡体膨胀变形、强度衰减和应力重分布, 从而引发浅层滑动; 另一类是膨胀土原生裂隙贯通延伸导致破坏, 从而引发深层滑动^[7-9]。例如: 黄润秋等^[10]利用简化 Bishop 法建立了非饱和土边坡的稳定性计算方法, 分析了边坡吸力、分层和表层裂隙对非饱和膨胀土边坡的稳定性影响, 揭示了边坡浅层滑动的原因; 姚海林等^[11]认为膨胀土中的裂隙对土坡中孔隙水压力和体积含水量分布有着显著的影响, 且裂隙越深, 对滑坡稳定性的影响越大; 李亚师^[12]发现横向裂隙的逐步贯通主导膨胀土边坡的失稳过程; 袁俊平^[13]对膨胀土裂隙网络渗流特性、裂隙土体强度特性等方面进行了全面系统研究, 并建立膨胀土边坡裂隙网络

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-11-05 网络出版日期: 2025-02-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42007237); 国家自然科学基金面上项目(42172303); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2022KDZ16; 2022KDZ14)

作者简介: 黄晓虎(1987—), 男, 副教授。研究方向: 地质灾害预测与防治方面。E-mail: 88569096@qq.com

* 通信作者: 郭飞, 副教授, E-mail: ybbnui.2008@163.com

入渗的数学模型和非饱和裂隙膨胀土固结的数学模型。显然,膨胀土滑坡的失稳破坏往往伴随着水的作用,这意味着需要考虑膨胀土从非饱和到饱和过程强度的变化^[14-15]。例如:Qi等^[16]基于非饱和和土力学理论分析了膨胀土滑坡的浅层破坏特征;郑澄锋^[17]、陈建斌^[18]等基于非饱和和土力学理论,通过数值模拟研究了干湿循环(降雨—蒸发)作用下的膨胀土边坡变形破坏的发展过程。

另外,模型试验是除了数值模拟外较好的认识滑坡变形破坏机理的方法。靳福杰^[19]、韦秉旭^[20]、Dai^[21]等构建了模型试验,揭示了降雨—蒸发条件下膨胀土边坡裂隙演化规律,发现随着干湿循环次数增加,裂隙的条数、总长度、区块个数、裂隙率也随之增加,相应的裂隙平均长度和区块面积随之减小,明确了裂隙演化与膨胀土边坡失稳的关系。赵金刚等^[22]在安康市某膨胀土填方边坡上设置原位监测网络,分析了该边坡在静置期、降雨期和积水期的变形演化规律,发现在降雨作用下,坡顶主要表现为竖向的胀缩变形,坡面则以水平向的累积变形为主。程展林等^[23]进行了降雨条件下膨胀土边坡模型试验,进一步揭示了影响膨胀土边坡浅层稳定性的最根本原因是土的胀缩特性而非膨胀土的超固结性或裂隙性。Zhang等^[24-25]选取2018年安徽芜湖至安庆沿江高速公路建设过程中出现的138处膨胀土边坡的失稳破坏中的典型案例进行了变形机理研究,发现干裂引起的优先流对膨胀土边坡的稳定性有重要影响。目前的相关研究多集中于降雨对膨胀土滑坡的浅层破坏的作用机理。对于大型且

受库水影响的膨胀土滑坡,尚需进一步厘清降雨与库水的联合作用对滑坡变形破坏的影响。

因此,本文以金岗村滑坡为例,结合地质勘察及降雨、库水位、GNSS监测等原位监测数据,在分析滑坡变形特征的基础上,设计制作物理模型,通过设置位移、孔隙水压力和含水率等传感器,实时监测滑坡在不同强降雨和库水作用工况下相关参数的变化,分析降雨与库水联合作用下膨胀土滑坡的变形破坏机理。研究结果对膨胀土滑坡破坏理论的研究及实际防灾减灾工作具有借鉴意义。

1 滑坡实例

1.1 基本概况

金岗村滑坡位于郧阳区城关镇金岗村2、3组。中心地理坐标为东经110°44'56.1"、北纬32°51'27.3"。滑坡所在区域总体地势北高南低,分布高程为152.0~220.5 m,前后缘最大相对高差为68.5 m。主滑方向为185°,坡度为15°~25°,平面形态为向南不规则的舌形,纵向长约为270 m,后缘宽约为570 m,中部至前缘宽为670~740 m,面积约为 $17.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,厚为10.3~15.6 m,平均厚为12.0 m,规模为 $206.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,是一个大型土质滑坡,滑坡全貌、工程地质平面及西段1-1'地质剖面图,分别如图1、2(a)、3所示。滑坡中前缘发育一个冲沟,横向上将滑坡分割为东西两段。东段地形纵向上呈多级坎状,坡体经人工改造强烈,台阶高一般为1~5 m,宽为10~50 m不等。西段坡内居民密集。东、西段均有膨胀土分布。

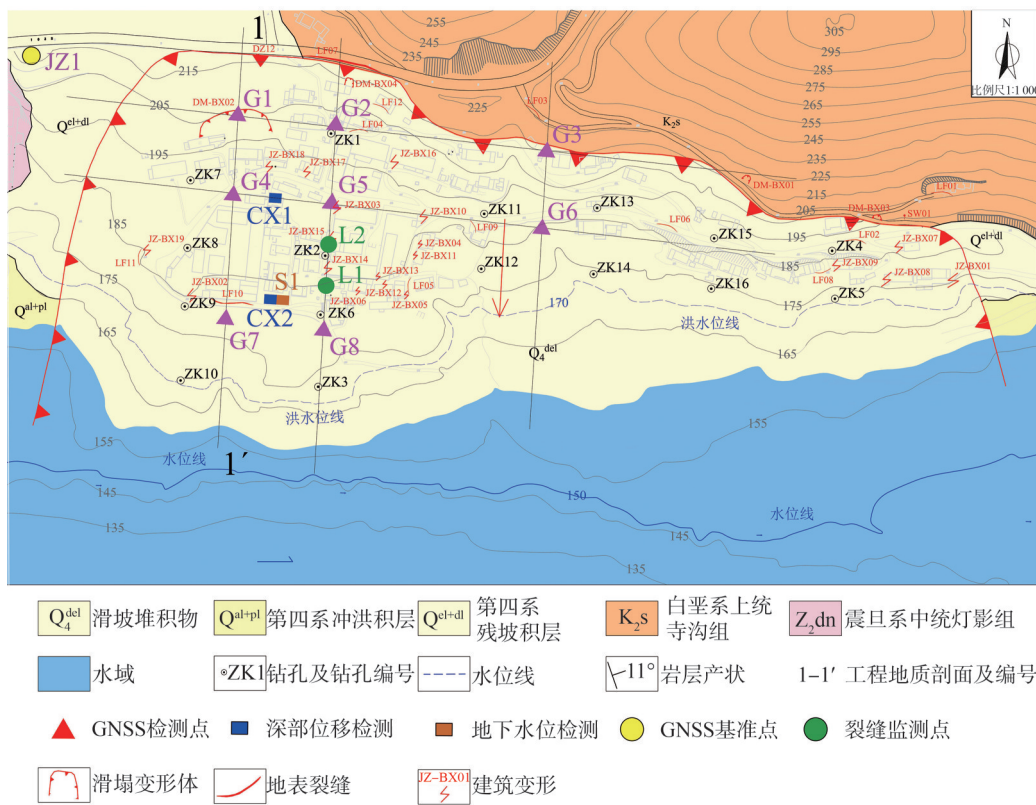


图1 金岗村滑坡全貌

Fig. 1 Aerial photo of Jinggang Village landslide

滑坡滑体主要组成物质为含砾黏土及含砾粉质黏土,黄褐色,稍湿,呈可塑~硬塑状,砾石含量为10%~30%,岩土结构松散,透水性中等,富水性一般。滑体纵向上中部厚两端略薄,横向上西侧厚东侧略薄,滑体整体

厚度变化差异较大,如图3所示。滑带厚为15~30 cm,浅黄色,黏感强烈,饱水、可塑,手可轻易搓泥条。受变形挤压,土层稍密,透水性差。滑坡滑床主要为白垩纪粉砂岩、粉土岩、砂砾岩互层,以及震旦纪白云质灰岩。



(a) 金岗村滑坡工程地质平面图

图 2 金岗村滑坡工程地质平面

Fig. 2 Engineering geological plan of Jingang Village landslide

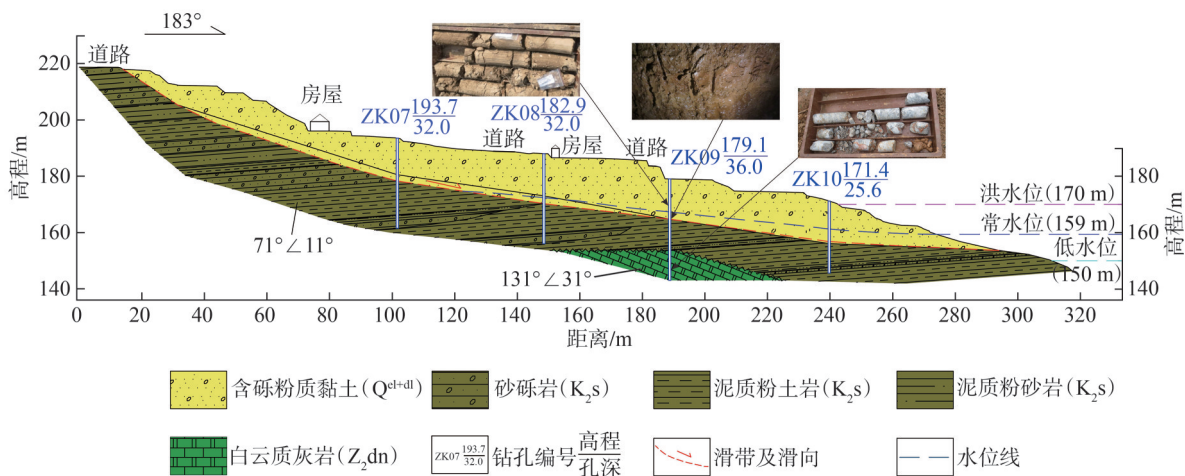


图 3 金岗村滑坡西段 1-1'地质剖面

Fig. 3 Geological section 1-1' in the western section of Jingang Village landslide

1.2 膨胀土物质组成与工程地质特性

经 X 射线衍射分析测得滑体土体 (剔除了大颗粒) 中矿物成分有石英 50%、钠长石 3%、钾长石 2%、伊利石 12%、高岭石 5%、蒙脱石 28%。通过室内试验, 获取了研究区内膨胀土物理力学性质指标参数, 如表 1 所示。

以滑坡中部冲沟 (图 1) 为界, 对西侧钻孔 (ZK06~ZK10) 和东侧钻孔 (ZK11~ZK16) 进行取样, 0~5 m

范围内每米取样, 5 m 以下选择性取样, 测定自由膨胀率。各段土体自由膨胀率统计特征见图 4。如图 4(a) 所示, 区内的膨胀土主要分布在滑坡西侧; 如图 4(b) 所示, 东侧坡段膨胀率具有不均一性, 局部区自由膨胀率在 40% 以下, 膨胀土多分布于坡体的表层。两个区域的自由膨胀率均在 40%~60% 之间, 具有弱膨胀潜势。土体在 0~5 m 之间时自由膨胀率随深度增加而增加, 5 m 后随深度增加而减弱。

表 1 研究区膨胀土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of expansive soil in the study area

天然含水率 $\omega/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L	自由膨胀率 $F_e/\%$	膨胀率 $e_p/\%$	膨聚力 P_e/kPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	泊松比 ν
20.6	20.1	0.63	47.4	22.3	-0.14	53	4.43	25	27.0	17.0	0.30

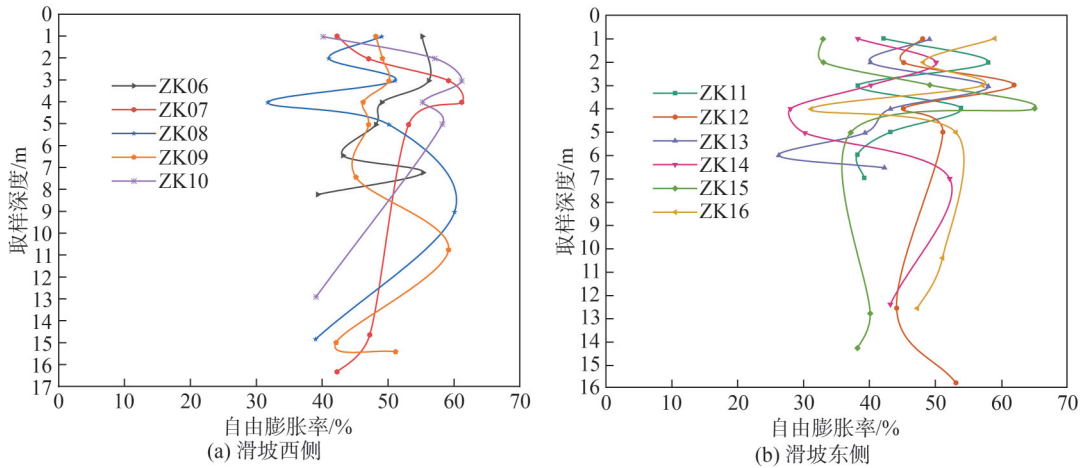


图 4 滑坡坡面土体自由膨胀率随深度变化关系

Fig. 4 Relation of free swelling ratios of landslide soil with depth

1.3 滑坡宏观变形特征

滑坡区域高程在 185~205 m 范围内的居民区受到主要由膨胀土的胀缩性引发的宏观变形破坏,表现为不均匀的竖向或水平的胀缩变形,造成位移、开裂、倾斜,甚至破坏,且往往成群出现,多为房屋及道路开裂变形、挡墙变形、地坪隆起等,见图 2(b)~(e)。

通过现场调查发现,2017年10月,金岗村滑坡前缘出现拉张裂缝 LF10,长度为 20 m,宽度为 2~10 cm,深度为 15 cm,如图 2(b)所示,说明在早期库水和降雨作用下,滑坡的早期变形集中于前缘区域。2018年雨季,滑坡中后缘开始出现明显的变形迹象(LF07),长度为 40 m,最大宽度为 5 cm,变形有向中后部延展的迹象,如图 2(c)所示,说明降雨对滑坡的影响是整体性的。另外,滑坡的局部陡坎处极易受蠕滑影响而产生浅层破坏,破坏规模一般在 20~100 m³不等,如图 2(d)所示。同时,受膨胀土的胀缩性及滑坡整体蠕变影响,坡体上发育众多横向地表裂缝,例如,位于滑坡左侧高程 180 m 附近的裂缝 LF08,走向 65°,平面形态呈折线型,裂缝长度为 12 m,宽度为 1~2 cm,可见深度为 2~3 cm,如图 2(e)所示。这些发育的地表裂缝会明显增加降雨入渗量,导致金岗村滑坡持续变形。

1.4 变形监测信息分析

滑坡体上共布设 8 个 GNSS 监测点 G1~G8,外围设置 1 个雨量计。滑坡布设深部位移监测、地下水位监测,布设位置见图 2。图 5 展示了滑坡从 2017 年 12 月 12 日至 2020 年 12 月 12 日期间地下水、降雨、库水位与裂缝变形、地表位移的关系。

金岗村滑坡的地下水整体变化趋势与库水变化趋势近似,并在 16.5~18.5 m 附近波动。同时,也明显受到降雨影响。而 2018 年 5 月 17 日和 2018 年 6 月 18 日的持续强降雨,显著提升了地下水位,特别是 2018 年 6 月 18 日的强降雨,使地下水位上升至 15.3 m 附近,随着降雨停止,水位回落。

滑坡区居民点的低层民用建筑出现较为严重的群发性裂缝。主要原因是建筑地基受季节性气候影响而产生胀缩变形,进而造成开裂破坏。例如,墙体裂缝 L1、L2 的监测数据显示,整体变形分别在 -1.0~2.5 mm、5~6 mm 范围内浮动。从数据上看,墙体裂缝变形量并不大,但存在一个典型特征,表现为:裂缝随季节性气候变化而变化;降雨偏多时,裂缝的变形量相对较大;雨水明显较少时,裂缝的变形量相对较小,并出现少量回缩。

地表位移数据显示,各监测点位移数据呈持续增长趋势。滑坡各监测点变形位移数据存在一定的差异,根据现场调查发现:G1 所在区域曾发生降雨诱发的局部垮塌(DM-BX02),因此,G1 的位移一定程度上受局部垮塌(DM-BX02)的影响,G1 位移达到 190.9 mm;G5 整体变形位移量最小,位移量在 35 mm 左右。其中,位于滑坡地形陡坎附近的监测点的位移大于位于平缓地形上的监测点的位移。

整个监测周期内,滑坡出现 3 次明显的“阶跃”变形(图 5 阴影区域)。第 1 次出现在 2018 年 3 月 12 日—2018 年 9 月 12 日,1-1' 监测剖面的 G1、G4、G7 分别发生位移 93.63、48.39、26.82 mm,对应的最大位移速率为 5.06、

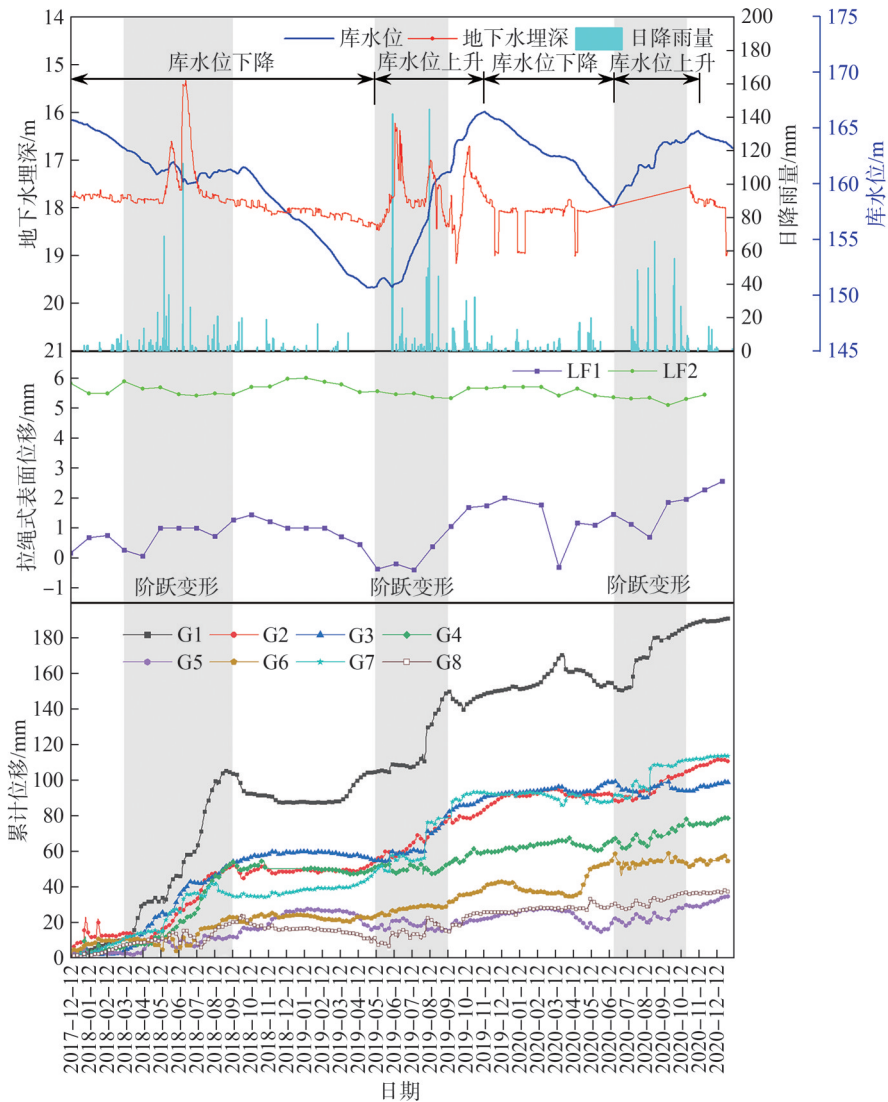


图 5 监测点累积位移与降雨-库水位-地下水曲线

Fig. 5 Accumulated displacement of monitoring points and rainfall-reservoir level-groundwater curves

1.26、3.03 mm/d。第 2 次出现在 2019 年 6 月 12 日—2019 年 9 月 12 日, G1、G4、G7 分别发生位移 40.52、4.72、21.72 mm, 对应的最大位移速率为 9.19、3.76、6.52 mm/d。第 3 次出现在 2020 年 6 月 12 日—2020 年 10 月 12 日, G1、G4、G7 分别发生位移 29.53、9.42、22.73 mm, 对应的最大位移速率为 6.46、2.20、7.75 mm/d。

由此可见, 滑坡前缘 G7 的位移量大于滑坡后缘 G4, 滑坡在一定程度上呈现牵引性破坏的特征。第 1 次“阶跃”变形发生于 160 m 水位持续运行阶段, 后两次“阶跃”发生于水位上升阶段, 这 3 个阶段均有持续的强降雨。同时, 在两次库水位下降阶段, 滑坡各监测点整体位移变形较小, 仅在小范围内上下浮动。分析可知, 由于滑坡滑体主要以含砾粉质黏土为主, 透水性很弱, 富水性一般, 在库水下降时, 坡体内的水不易于排出, 地下水位变化幅度不大, 但其库水下降时产生的指向坡外的动水压力驱动滑坡前缘产生持续性

的变形, 平均变形速率为 0~1 mm/d, 对滑坡稳定性亦有不利影响。

G1、G4、G7 的位移速率变化曲线, 如图 6 所示。在强降雨期间, 库水处于 160 m 水位持续运行阶段和水位上升阶段, 各监测点的位移速率均出现较大变化。而在降雨量较小的其他时间段, 不论库水位如何变化, 各监测点的位移速率在 0 刻度附近波动。因此, 可以初步认为: 库水位下降对滑坡前缘会产生持续性的变形; 库水上升阶段, 会使滑坡的变形趋缓。图 6 所示的库水位的上升与日降雨量的增加而产生的较大变形, 很明显是受强降雨所致。降雨会对滑坡产生整体性的变形, 该变形明显大于库水位下降对滑坡产生的变形。同时, 由于滑体为膨胀土, 其吸水膨胀、失水收缩的特性, 使坡体发育大量裂缝; 当出现降雨时, 雨水沿着裂缝能更快进入坡体内部, 加剧了滑坡的变形。降雨停止后, 雨水蒸发使膨胀土失水收缩, 坡体产生

了与滑坡位移方向不同的变形,此时位移速率为负,这解释了图6曲线中部分时间段位移速率为负的现象。

经历库水位循环升降后的滑坡在强降雨条件下更容易发生大变形,甚至失稳。

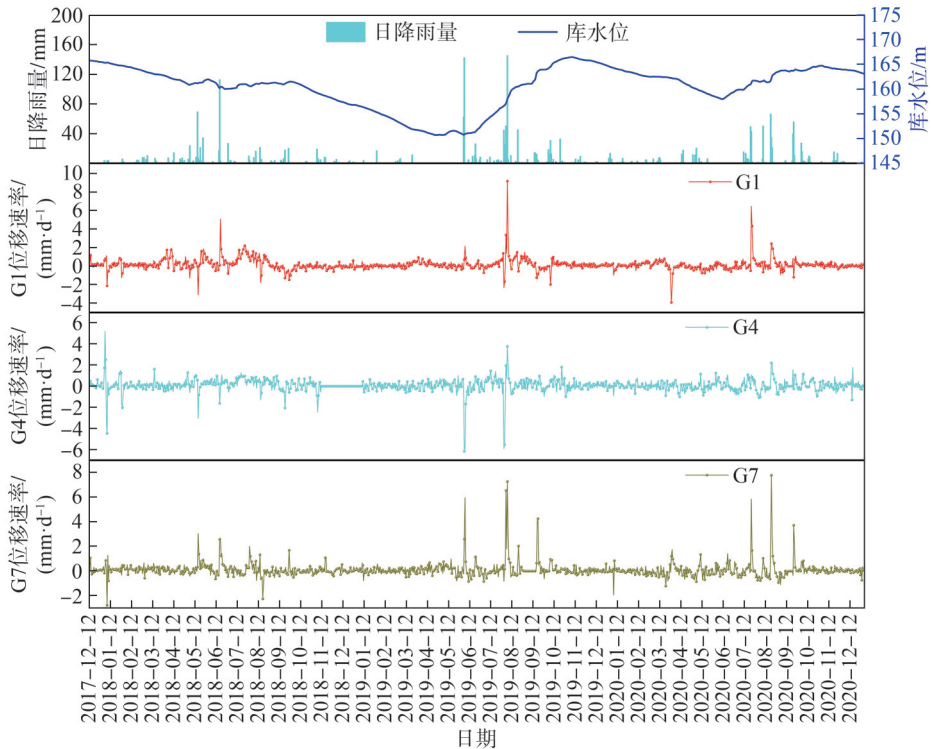


图6 监测点位移速率与降雨-库水位曲线

Fig. 6 Displacement rates of monitoring points and rainfall-reservoir level curves

2 物理模型试验设计

2.1 试验模型

室内试验选取滑坡主滑方向上的典型剖面1-1' (图2)建立二维斜坡试验模型,该模型不考虑滑坡的边界形态、微地貌等。根据滑坡结构特征将模型自上而下分为滑体、滑带和滑床。滑坡模型试验水平长度为2.77 m,前后缘高差为0.51 m。从前缘到后缘依次设置3个竖向监测剖面,每个观测剖面设有含水率传感器和

孔隙水压力传感器,同时,在滑坡模型浅表布置位移传感器。模型试验中,布设9个孔隙水压力传感器K1~K9、9个含水率传感器H1~H9、1个拉线式位移传感器D1。监测剖面及各传感器位置如图7所示。其中:孔隙水压力传感器量程为 ± 10 kPa,精度为 $\pm 0.1\%$ F.S.。土壤含水率计量程为0~100%,精度在0~50%范围内为 $\pm 2\%$,精度在50%~100%范围内为 $\pm 3\%$ 。拉线式位移传感器量程为0~2 000 mm,最大拉线速度为1 000 mm/s,测量精度为 $\pm 0.05\%$ F.S.,分辨力无限小。

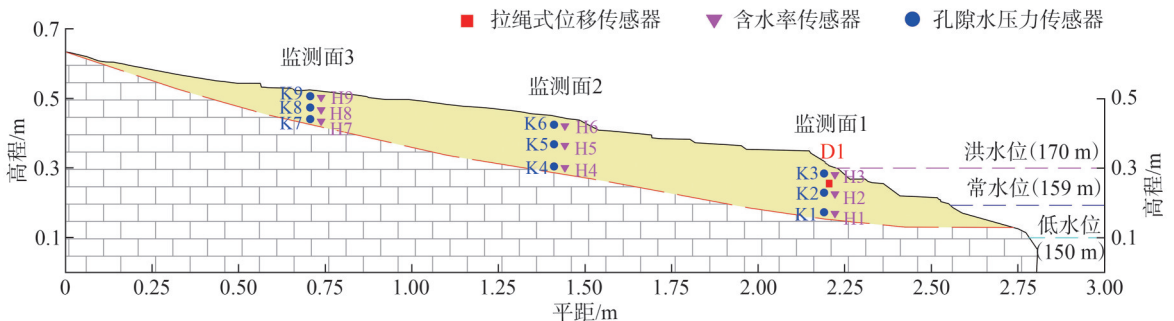


图7 监测剖面与传感器位置布设

Fig. 7 Monitoring profile and sensor location layout

2.2 相似材料

物理模型试验依据相似原理开展,但模型材料很难做到与实际滑坡物质的所有因素都相似,一般认为依据研究目的考虑滑坡的重要因素相似而忽略次要因素,

仍可得到相近的试验结果。因此,本试验尽可能保证重要因素相似,得到模型各部分材料配比及参数见表2。其中,为了体现膨胀土的膨胀性,试验滑体选取碾碎过筛的滑坡原状土,剔除大粒径(> 5 mm)颗粒,通过采用

原状土:河砂:碎石:膨润土:水=10:8:2:3:4的配比进行配置,然后分层压实填筑。在填筑前,试验测定配置后的物理力学指标与现场原状土满足相似关系。滑床基岩主要起支撑基座作用,不考虑相似材料。

根据试验平台尺寸和滑坡变形区规模,确定试验模型相似比 $n=100$,几何相似比 $C_l=100$,库水高程相似

比 $C_h=100$,雨强相似比 $C_q=10$,时间相似比 $C_t=10$,模型密度、重力加速度相似比 $C_\rho=C_g=1$;由无量纲量相似比等于1,推导得到:位移相似比 $C_u=100$,黏聚力相似比 $C_c=100$,内摩擦角相似比 $C_\phi=1$,含水率相似比 $C_w=1$,泊松比相似比 $C_\mu=1$,变形模量相似比 $C_E=100$,渗透系数相似比 $C_k=10$ 。

表 2 金岗村滑坡与模型滑坡相似材料部分参数对照

Tab. 2 Comparison of some parameters of Jingang Village landslide and model landslide

滑坡结构和设计		密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
坡体	原型坡体	2.01	27.00	17.8	3.66×10^{-4}
	配制坡体	1.98	7.60	17.0	1.15×10^{-5}
	配制方案	原状土:河砂:碎石:膨润土:水=10:8:2:3:4			
滑带	原型坡体	1.91	4.67	16.3	
	配制坡体	1.85	0.50	16.5	
	配制方案	膨润土:玻璃珠:水=3:3:1			
滑床	配制方案	砖砌基岩			

2.3 试验工况

根据第 1.4 节阐述的滑坡 3 次“阶跃”变形对应的库水位波动和降雨量特征,结合金岗村滑坡所处地区气象和水文资料可知,丹江口水库的强降雨多发生在库水位高水位运行及库水位上升阶段^[26],设计对应的物理模拟试验工况(表 3)。工况 1 为库水升降工况,选取 1.68 m/d 的最大库水位升降速率,模拟库水位从低水位升至高水位后保持静止 6 h,再降回至低水位,进行多次循环。工况 2 为高库水降雨工况,通过相似比换算降雨强度为 0.69 mm/h,模拟保持高库水位期间持续发生强降雨。工况 3 为库水上升降雨工况,在工况 1 的基础上,模拟库水位以 1.68 m/d 的速率从低水位升至高水位过程中,持续发生强降雨。

表 3 试验模拟工况

Tab. 3 Simulated test conditions

工况编号	降雨强度 $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	库水位涨落
1		库水位从 150 m 升至 170 m, 静止 6 h 再降至 150 m
2	0.69	保持 170 m 高库水位静止
3	0.69	库水位从 150 m 升至 170 m

2.4 试验结果

2.4.1 宏观破坏过程

试验开始前,试验坡体处于天然状态。工况 1 试验过程中,滑坡整体未见明显变形破坏,在前 180 min 水位第 1 次从 150 m 上升至 170 m,试验坡体前缘水位淹没位置以下可见微小裂缝,如图 8(a)所示。水位升至 170 m 高程后,保持该水位运行至坡体内浸润锋逐渐趋于稳定后,540 min 时水位开始下降,在此过程中,在坡体前缘表面微小裂缝略有扩展。第 2 次水位快速升

降过程中,已有裂缝继续扩展。在第 3 次水位升降过程中,滑坡存在的变形仍以前缘坡体表面产生的裂缝为主,如图 8(b)所示。

工况 2 破坏过程中,总体表现为牵引性破坏,从坡脚最先破坏,逐渐向上发展,形成多级垮塌,如图 8(e)所示。试验前 195 min 为库水位上升期,水位升至 170 m 后保持静止至 345 min,使坡体内浸润锋保持稳定,随后开始降雨并保持水位稳定在 170 m 直至试验结束。在缓慢蓄水和保持库水位稳定的过程中,滑坡未见明显变形,当试验进行至 255 min 时,坡体内浸润锋达到稳定。试验进行至 345 min 时,开始施加强降雨,420 min 时坡脚右侧出现垮塌,如图 8(c)所示;随着降雨继续,坡脚右侧垮塌逐步向上扩展变大。551 min 时滑坡前缘左侧出现贯通拉张裂缝,随后裂缝前方土体垮塌,如图 8(d)所示;随着降雨持续,裂缝后方坡体发生浅层滑移,与右侧垮塌合并扩展,整体以蠕滑方式发生变形,直至 585 min 时试验结束。

工况 3 变形破坏特征如图 8(h)所示,滑坡呈现较明显的阶梯状,属于典型的牵引式破坏。在库水位上升的过程中施加强降雨条件,降雨前 38 min 内未见滑坡存在明显变形破坏,仅在坡体表面产生部分细小裂缝。试验进行到 42 min 时坡脚处最先发生变形破坏,表现为前缘坡脚右侧的小型垮塌。降雨至 54 min 时,坡脚左侧出现第 2 处垮塌,随后降雨入渗和坡面径流开始趋于稳定,滑坡前缘整体处于蠕滑变形阶段。在 120 min 时,滑坡前缘裂缝逐渐贯通,坡脚岩土体率先发生滑动,随后快速扩展为滑坡前缘整体变形破坏。当前缘坡脚完全破坏后,牵引后方岩土体继续垮塌,直至扩展为前缘坡体完全发生破坏,如图 8(f)所示,其破坏过程表现为明

显的逐级牵引式破坏。滑坡前缘整体破坏后,在垮塌断裂处形成陡坎和临空面,上部土体在自重、雨水冲刷和

坡体内向外的渗透力作用下,进一步向下逐级垮塌破坏,如图 8(g)所示,直至试验结束破坏逐渐停止。

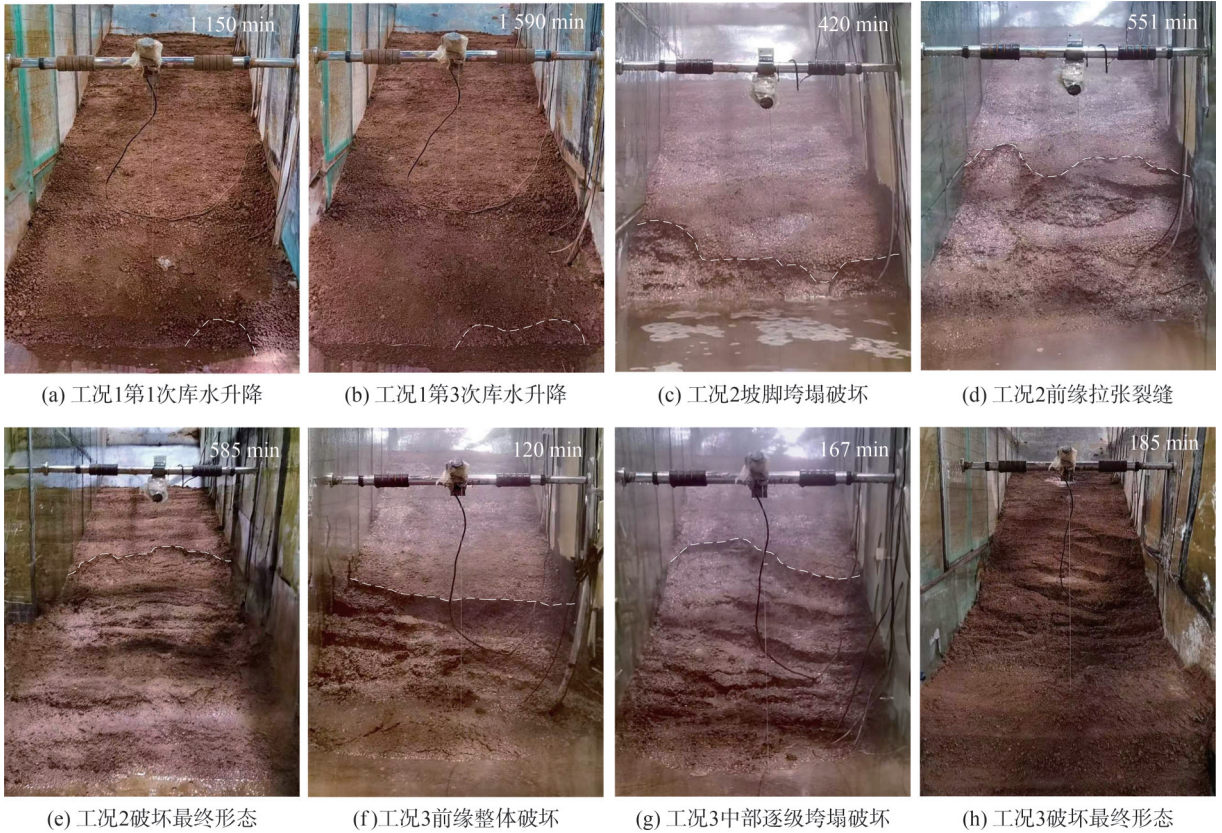


图 8 滑坡宏观变形过程

Fig. 8 Macroscopic deformation process of landslide

2.4.2 地表位移

工况 1 的监测点 D1 位移变化曲线如图 9(a)所示。在第 1 次水位上升至静止过程中,由于库水浮托作用及库水向坡体内入渗,使得 D1 存在向上的微小移动,约为 -0.3 mm;当坡内浸润锋线趋于稳定后,D1 开始沿

滑坡向下移动,并在水位下降过程中发生明显位移,累计位移量约为 2.1 mm;至水位第 2 次上升,该点开始保持稳定,此时 D1 受库水波动影响较小;在第 3 次水位上升过程中,D1 位移呈现缓慢上升趋势,并在水位下降过程中再次出现位移,累计位移量约为 3 mm。

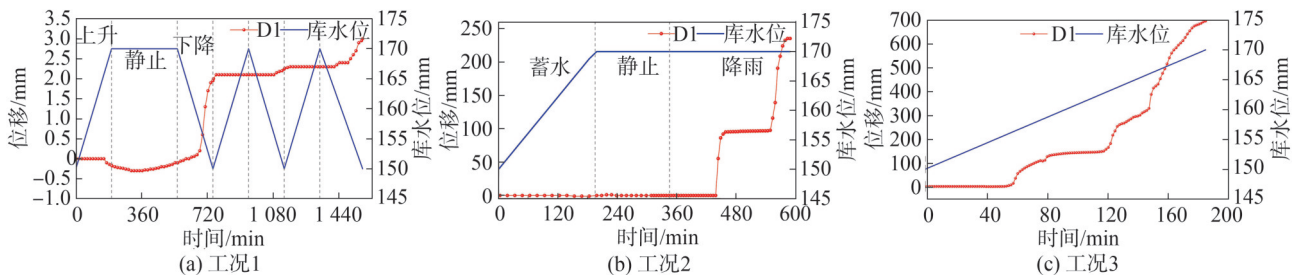


图 9 监测点 D1 位移变化曲线

Fig. 9 Displacement variation curves of monitoring point D1

工况 2 的监测点 D1 位移变化曲线如图 9(b)所示。在蓄水至 170 m 水位并保持水位稳定的过程中,D1 未发生明显变形,仅存在微小波动,对滑坡稳定性影响较小。当试验进行到 345 min 时,开始施加强降雨;降雨初期 D1 仍处于稳定状态;当试验进行到 445 min (降雨 100 min) 时,D1 发生较大变形,累计位移量约为 96.5 mm,随后趋于稳定;当试验进行至 555 min 时,D1 再次发生明

显移动,至试验结束,累计位移量约为 237.7 mm。

工况 3 的监测点 D1 位移变化曲线如图 9(c)所示。在库水位上升和降雨初期,D1 未发生较明显移动;在降雨 60 min 后,D1 开始移动,保持缓慢增长趋势;随着降雨入渗,坡体达到饱和,土体自重增加;在降雨 120 min 后,D1 开始大幅移动,位移量骤增,累计位移量约为 695 mm。

对比 3 组工况可以发现:工况 1 的位移变形明显小于工况 2、3;其原因在于库水下降时产生的指向坡外的动水压力驱动滑坡产生持续的微小变形,平均变形速率仅为 0.1~0.2 mm/h,对滑坡稳定性有一定的不利影响。工况 2 的位移变形小于工况 3,这是由于膨胀土吸水膨胀、失水收缩的特性,在经历库水升降循环后,坡体发育裂缝,降雨时雨水能沿着裂缝更快进入坡体内部,加剧了滑坡的变形。

2.4.3 体积含水率监测结果分析

工况 1 的体积含水率变化曲线如图 10(a)所示。工况 1 受库水位变化影响的含水率计以滑坡模型前缘的 H1、H2、H3 为主,滑坡中后缘的 H4~H9 未发生明显的变化。随着坡体的浸润锋线不断向坡体内发展,位于前缘底部的 H1 最先发生变化,随后 H2、H3 依次响应。在试验过程中,由于坡体水排泄的滞后效应,H1 附近一直处于饱和状态。同时,H2、H3 在水位下降和上升过程中体积含水率均受到库水影响,表现为体积含水率随库水的周期性变化。

工况 2 的体积含水率变化曲线如图 10(b)所示。蓄水阶段,库水上涨使得前缘地下水位抬升,H1、H2 体积含水率先发生变化。蓄水结束后水位稳定,坡体内水位继续上升,至 273 min 时 H3 体积含水率开始增大。位于库水影响范围外的 H4~H9,含水率数值保持不变。

345 min 时开始降雨,由于 H1 位于水位以下已处于饱水状态,未因前缘破坏而传感器出露,因此在降雨过程中体积含水率保持基本稳定。H2、H3 在 540 min 时由于前缘土体垮塌而传感器出露,使测得的含水率再次上升。H4~H9 突变时间有明显的先后顺序,降雨初期,各监测点的含水率保持稳定;当降雨入渗的浸润锋线到达各监测点位时,含水率数值开始急剧变化,这种变化趋势与渗流路径长短密切相关。

工况 3 的体积含水率变化曲线如图 10(c)所示。施加降雨至 14 min 时,上层监测剖面中,H3、H9 最先响应,H6 的响应时间略微滞后。下层的 H1、H4、H7 受降雨的影响滞后于中上层其他监测点,其中,H4、H7 变化曲线在上升至最高后保持稳定,最终稳定在 42% 左右;降雨至 120 min 时,滑坡前缘出现垮塌(图 8(f)),水体在前缘监测点附近富集,含水率逐渐上升;随着局部垮塌不断向后方扩展,前缘监测点处的传感器被冲出,监测点含水率出现下降。中层监测剖面中,H2 位于前缘坡体中部,由于前缘经历了库水循环升降,其初始含水率较高,在降雨过程中仅略微增长。H8 的响应时间提前于 H5,这是由于 H8 位于坡体后缘中部,厚度相对较薄,雨水先于 H5 达到,故其响应时间早于 H5。3 个监测点最终体积含水率均稳定在 43% 左右。

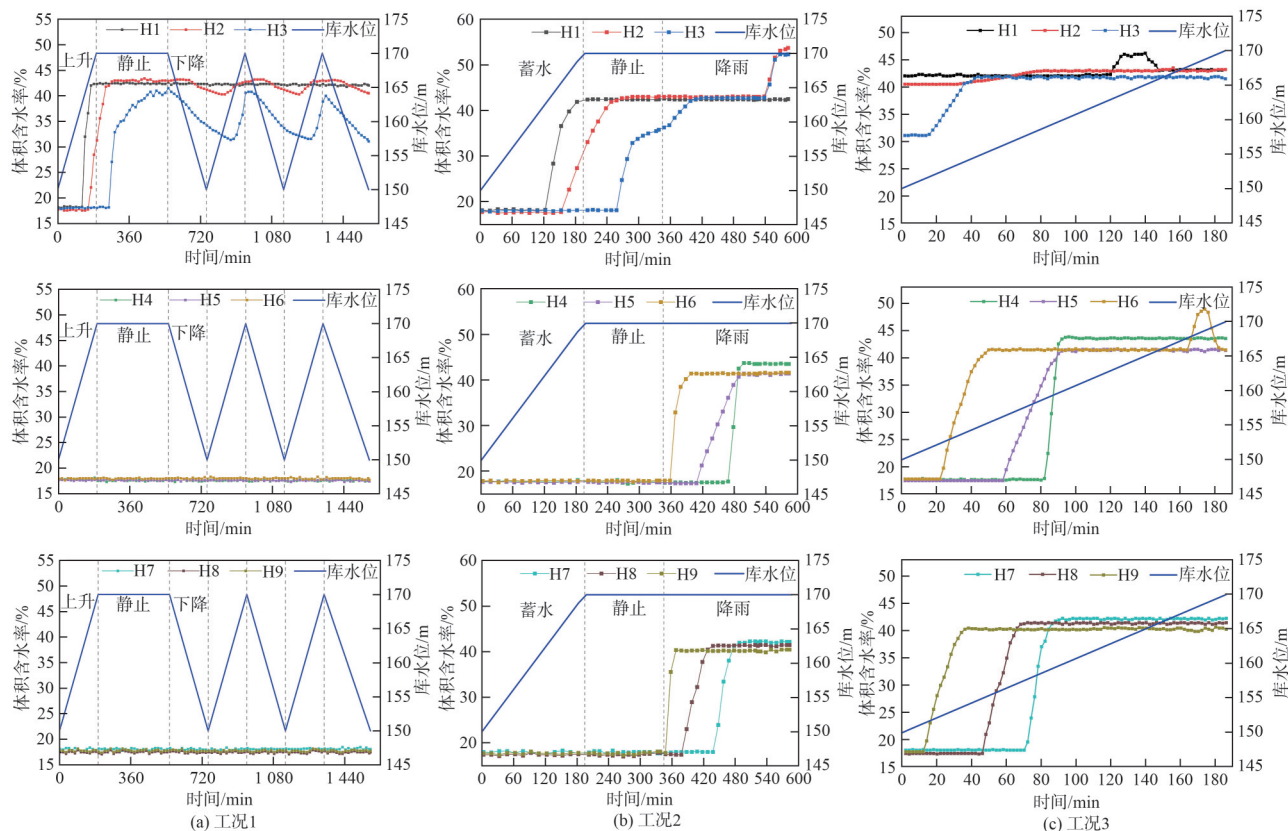


图 10 监测点含水率变化曲线

Fig. 10 Moisture content change curves at monitoring points

对比 3 种工况下体积含水率的变化情况,可以发现体积含水率的变化反映了渗流场的改变。工况 1 中,库水位变化主要影响坡体前缘,而监测到的体积含水率变化区域也在前缘,并且随库水位的升降,体积含水率呈周期性变化。工况 2 中,降雨主要受垂直入渗影响,浅层体积含水率传感器的响应时间早于深层。施加降雨后,中后部的体积含水率开始出现变化,伴随着中后部坡体出现变形,这说明渗流场的改变对滑坡变形的影响较大。工况 3 中,在经历库水升降循环后,坡体发育裂缝,降雨时雨水能沿着裂缝更快进入坡体内部,使深部土体含水率传感器快速响应。同时,由于前缘坡脚长期浸泡在库水位下,该区域土体处于饱和状态,土体抗剪强度相对较低,与工况 2 相比更容易发生大变形。

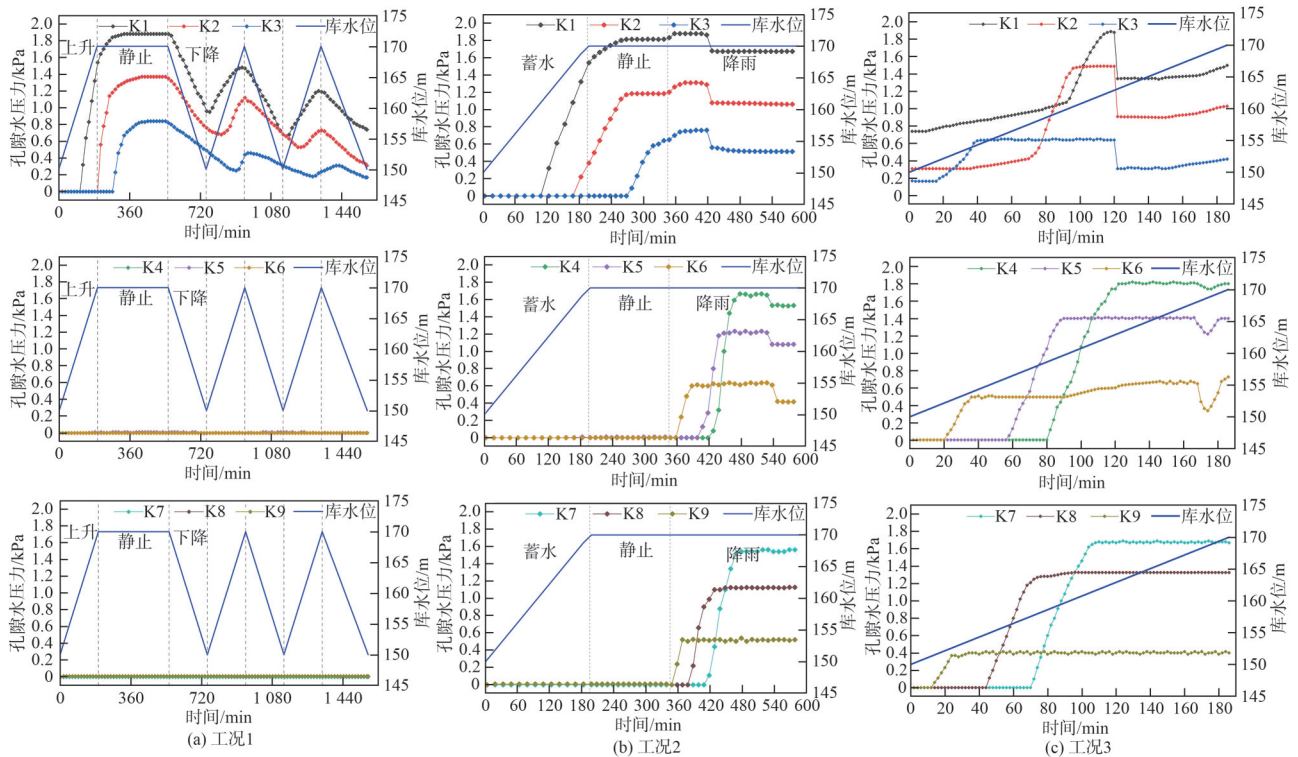


图 11 孔隙水压力变化曲线

Fig. 11 Pore water pressure variation curves

工况 2 的孔隙水压力变化曲线如图 11(b) 所示。在工况 2 进行至 345 min 时开始降雨,各监测点孔隙水压力开始出现响应。由于滑坡前缘地下水水位接近饱和,孔隙水压力趋于稳定,降雨对前缘各监测点孔隙水压力影响均不明显,因此, K1~K3 孔隙水压力仅呈缓慢上升趋势,整体变化幅度较小;当降雨进行至 75 min 时(试验 420 min),由于滑坡前缘出现局部垮塌(图 8(c)), K1~K3 孔隙水压力随之减小。K4~K6 孔隙水压力在降雨过程中,由于渗流路径长度不同,响应时间也由上到下依次增加;在试验进行至 540 min 时,由于垮塌变形

2.4.4 孔隙水压力监测结果分析

工况 1 的孔隙水压力变化曲线如图 11(a) 所示。工况 1 库水升降循环对滑坡孔隙水压力的影响主要在滑坡前缘,滑坡中后缘 K4~K9 在试验过程中基本没有发生变化。在水位上涨初期,随着库水逐渐入渗,滑坡前缘地下水位抬升, K1~K3 在水位静止 20 min 后达到峰值。水位下降阶段,坡体内地下水位降低,孔隙水压力随着土中水位下降逐渐减小。在第 2、3 次水位升降循环中,传感器测得孔隙水压力随着水位升降而增减,孔隙水压力与库水位呈正相关特征。并且,随着库水位升降循环次数增加,各监测点孔隙水压力的最大值呈逐渐减小趋势,分析其原因是膨胀土的渗透系数较小,第 2、3 次库水升降循环高水位的时间较短,导致孔隙水压力无法达到第 1 次的峰值。

已向上延伸至滑坡中部(图 8(d)), K4~K6 孔隙水压力也产生了不同程度的下降。K7~K9 位于滑坡后缘,各监测点孔隙水压力随着降雨持续进行而逐渐增大,并最终保持稳定至试验结束。

工况 3 的孔隙水压力变化曲线如图 11(c) 所示。工况 3 在库水位上升和降雨初期,由于库水和降雨入渗需要时间,各监测点孔隙水压力基本保持稳定;随着降雨入渗和库水渗入坡体,位于坡体表层的 K3、K6、K9 孔隙水压力最先发生响应。随着降雨持续入渗,滑坡前缘 K2、K1 孔隙水压力分别先后在 70、92 min 开始骤

增。在120 min时,由于前缘发生破坏(图8(f)),K1~K3孔隙水压力出现骤降;随着后方土体向前推移,传感器上方水柱再次上升,监测点测得孔隙水压力数值缓慢增大。随着试验进行,K8、K7、K5、K4孔隙水压力先后开始增大,在达到峰值后最终保持稳定状态;由于167 min时滑坡中部坡体发生垮塌(图8(g)),K4、K5、K6孔隙水压力下降,随着垮塌土体后方破坏持续发展,传感器再次被掩盖,孔隙水压力再次升高。

对比3种工况下孔隙水压力的变化情况发现:孔隙水压力传感器的响应顺序与土体含水率传感器的响应顺序基本一致,深层孔隙水压力传感器的响应滞后于浅层孔隙水压力传感器。并且,库水与降雨对坡体内孔隙水压力均有影响,但两者影响的滑坡区域和程度有所不同。滑坡前缘对库水波动较为敏感,其变化趋势基本与库水变化趋势保持一致;降雨因素对滑坡整体影响较为显著,降雨条件下表层孔隙水压力随雨水入渗影响反应迅速且明显,根据入渗路径不同,内部响应速度也存在一定差异。

3 变形破坏机理

金岗村滑坡地处丹江口水库,滑坡前缘受库水位的周期性涨落(150~170 m)影响。原位监测和模型试验结果表明,库水位升降对滑坡整体稳定性的扰动较小。这是由于库水位的周期性涨落使金岗村滑坡地下水位在16.5~18.5 m之间波动。其库水下降时产生的指向坡外的动水压力驱动滑坡产生持续的微小变形。同时,由于前缘坡脚岩土体长期浸泡在库水位下,该区域土体处于饱和状态,土体抗剪强度相对较低,使坡脚区域最先出现破坏,进而对滑坡的稳定性造成一定影响。

降雨是诱发膨胀土滑坡失稳的主要外部因素。原位监测与试验结果均表明,降雨对滑坡稳定性的影响大于库水对滑坡稳定性的影响。一方面,坡体土体因膨胀土吸水膨胀、失水收缩的影响,产生大量裂缝,降雨更易入渗至坡体内部,这使得坡体自重增加,地下水位急剧升高,进而产生更大的下滑力。另一方面,饱水后坡体的 c 、 φ 值快速减小。当下滑力增大到突破极限平衡状态后,坡脚的局部变形转变为滑坡中前部的整体破坏,同时,在滑坡断裂处形成临空面和陡坎,随后发展为逐级垮塌破坏。

经历3次库水位循环升降后,在库水位再次快速上升过程中施加强降雨,前缘坡脚最先发生垮塌,随后垮塌向上扩展,在前缘形成贯通裂缝后沿裂缝产生垮塌破坏,形成临空面;随着降雨继续,滑坡逐级发生破坏,表现为牵引式渐进破坏。与强降雨加高库水位

工况试验结果对比发现,经历库水位循环升降后的滑坡在强降雨条件下更容易发生失稳。

4 结论

本文按照相似理论建立了滑坡物理模型,通过合理选取相似材料与科学设计相似模型,研究了不同强降雨和库水作用工况下滑坡的变形特征与破坏规律,分析降雨与库水联合作用下膨胀土滑坡的变形破坏机理。主要结论如下:

1)模型试验表明,金岗村滑坡破坏过程表现为牵引性破坏,最先起始于坡脚的局部变形,然后逐渐向上发展,在中前部的整体破坏,同时在滑坡断裂处形成临空面和陡坎,随后发展为逐级垮塌破坏。

2)库水和降雨导致滑坡内部孔隙水压力和含水率呈现不同的响应模式。仅库水位升降时,前缘坡体的孔隙水压力和体积含水率呈周期性变化,中后缘无反应。施加降雨后,库水影响范围外的孔隙水压力和体积含水率开始出现响应,随着降雨持续增大,最终保持稳定。滑带处的含水率上升幅度远大于坡表处,表明水体最终在滑带附近富集。

3)原位监测及物理模型试验表明,库水位下降对滑坡前缘会产生持续性的变形。降雨对滑坡会产生整体性的变形,同时该变形明显大于库水位下降对滑坡产生的变形。经历库水位循环升降后的滑坡在强降雨条件下更容易发生大变形,甚至失稳。

4)降雨及库水联合作用影响的膨胀土滑坡持续变形受到外部附加应力与内部强度指标减小的双重作用。持续性的强降雨会沿着坡体上的裂缝快速入渗至坡体内部,抬升地下水位,同时在地下水较长时间的浸泡软化作用下滑带土强度的持续降低,是大型膨胀土滑坡持续变形的关键因素。

参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [2] Kong Lingwei, Zeng Zhixiong, Bai Wei, et al. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslides occurrence in the Yanji section of the Jilin—Hunchun high-speed railway[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1491–1503.
- [3] Cheng Xue, Wang Caihong, Lu Yongpeng. Stability analysis and treatment measures of an expansive soil bank slope in a reservoir area[J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(8): 55–59. [程雪, 王彩虹, 卢勇鹏. 库区某膨胀土岸坡稳定性分析及治理措施[J]. 水电与新能源, 2022, 36(8): 55–59.]

- [4] Yin Zongze, Xu Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454–459. [殷宗泽, 徐彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454–459.]
- [5] Chen Shangfa, Wen Shiyi, Leng Xinghuo, et al. Treatment measures for expansive-soil canal slope of Phase I Works of Middle Route Project of S–N Water Diversion[J]. Yangtze River, 2010, 41(16): 65–68. [陈尚法, 温世亿, 冷星火, 等. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡处理措施[J]. 人民长江, 2010, 41(16): 65–68.]
- [6] Wang Wensheng, Xie Yongli, Liang Junlin. Classification of expansive clay slope on road cutting[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 25(1): 20–24. [王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 20–24.]
- [7] Xiong Zichao. Model experiment and numerical simulation of slope stability of expansive soil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021. [熊子超. 膨胀土岸坡稳定性模型试验和数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.]
- [8] Lu Dingjie, Chen Shanxiong, Luo Hongming, et al. Study of failure characteristics and evolution mechanism of canal slope of Nanyang expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 189–196. [陆定杰, 陈善雄, 罗红明, 等. 南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 189–196.]
- [9] Gong Biwei. Relationship of fracture and strength with stability of expansive soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 1–7. [龚壁卫. 膨胀土裂隙、强度及其与边坡稳定的关系[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 1–7.]
- [10] Huang Runqiu, Wu Lizhou. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 129–133. [黄润秋, 吴礼舟. 非饱和膨胀土边坡稳定性分析[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 129–133.]
- [11] Yao Hailin, Zheng Shaohe, Ge Xiurun, et al. Assessment on slope stability in cracking expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp2): 2331–2335. [姚海林, 郑少河, 葛修润, 等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊2): 2331–2335.]
- [12] Li Yashuai. Research on the fissure development indoor test of expansive soil cracks under the action of dry-wet circulation[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2018, 35(1): 32–37. [李亚帅. 干湿循环作用下膨胀土裂隙开展室内试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 32–37.]
- [13] Yuan Junping. Generalized model of fissures distribution & slope stability analysis for unsaturated expansive soils[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. [袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.]
- [14] Chen Yong, Zou Haotian, Su Jian, et al. Impact analysis and prediction research of soil-water characteristic curves based on data mining[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 451–466. [陈勇, 邹皓天, 苏剑, 等. 基于数据挖掘的土水特征曲线影响分析及预测研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 451–466.]
- [15] Li Jianping, Jiang Shuihua, Huang Faming, et al. Investigation of large deformation failure characteristics of slopes under rainfalls considering spatial variability of hydraulic conductivity[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(1): 72–84. [李剑平, 蒋水华, 黄发明, 等. 考虑渗透系数空间变异性的降雨作用下边坡大变形破坏特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(1): 72–84.]
- [16] Qi Shunchao, Vanapalli S K. Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 70: 68–82.
- [17] Zheng Chengfeng, Chen Shengshui, Wang Guoli, et al. Numerical simulation of deformation process of expansive soil slopes due to dry-wet cycling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1360–1364. [郑澄锋, 陈生水, 王国利, 等. 干湿循环下膨胀土边坡变形发展过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1360–1364.]
- [18] Chen Jianbin, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Numerical simulation of dynamic response of expansive soil slope to atmospheric conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 674–682. [陈建斌, 孔令伟, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 674–682.]
- [19] Jin Fujie, Wang Yejiao, Xu Yongfu, et al. Simulation of cracks evolution in expansive soil slope under evaporation–rainfall condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 239–249. [靳福杰, 王叶娇, 徐永福, 等. 蒸发–降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 239–249.]
- [20] Wei Bingxu, Huang Zhen, Gao Bing, et al. Crack evolution rules of expansive soil and the effect on the shear strength under the action of dry-wet circulation[J]. Highway Engineering, 2015, 40(4): 127–130. [韦秉旭, 黄震, 高兵, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 127–130.]
- [21] Dai Zhangjun, Chen Shanxiong, Li Jian. Physical model test of seepage and deformation characteristics of shallow expansive soil slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8): 4063–4078.

- [22] Zhao Jingang, Wang Jiading, Gu Tianfeng, et al. Study on the field model test of expansive soil fill slope under atmospheric influence[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(6): 939–946. [赵金刚, 王家鼎, 谷天峰, 等. 大气作用下膨胀土填方边坡现场模型试验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(6): 939–946.]
- [23] Cheng Zhanlin, Ding Jinhua, Rao Xibao, et al. Physical model tests on expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 716–723. [程展林, 丁金华, 饶锡保, 等. 膨胀土边坡物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 716–723.]
- [24] Zhang Jiaming, Luo Yi, Zhou Zhi, et al. Research on the rainfall-induced regional slope failures along the Yangtze River of Anhui, China[J]. Landslides, 2021, 18(5): 1801–1821.
- [25] Zhang Jiaming, Luo Yi, Zhou Zhi, et al. Effects of preferential flow induced by desiccation cracks on slope stability[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106164.
- [26] Dai Zhenwei, Zhang Chenyang, Wang Lei, et al. Interpreting the influence of rainfall and reservoir water level on a large-scale expansive soil landslide in the Danjiangkou Reservoir region, China[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106110.

Study on the Mechanism of Landslide Promotion of Expansive Soil Under the Combined Action of Rainfall and Reservoir Water

HUANG Xiaohu^{1,2}, HU Yulong^{1,2}, GUO Fei^{1,2*}, YANG Lanyao^{1,2}, DENG Maolin^{1,2}, XIAO Yuhuang³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Geological Environmental Center of Hubei Province, Wuhan 430034, China)

Abstract:

Objective The widespread occurrence of expansive soil landslides poses a significant threat to the long-term stability and safe operation of the Danjiangkou Reservoir. Expansive soil is rich in hydrophilic minerals such as montmorillonite and illite, which are highly sensitive to water. The structural characteristics, expansion and contraction behavior, and strength attenuation properties of expansive soil constitute the main factors leading to the instability and failure of expansive soil landslides and exhibit typical features of shallow depth, traction movement, gentle slope conditions, seasonality, and repeatability. At present, most related studies focus on the effects of rainfall on the shallow failure of expansive soil landslides. However, for large expansive soil landslides affected by reservoir water, the combined effects of rainfall and reservoir water on landslide deformation and failure require further clarification. Therefore, investigating the mechanisms of instability and failure of expansive soil landslides under the combined influence of rainfall and reservoir water level fluctuations is essential for implementing meteorological early warning, risk assessment, and engineering mitigation of landslides at the Danjiangkou Reservoir.

Methods Using the Jingang Village landslide in Yunyang District, Shiyan City, a typical cross-section along the main sliding direction was selected to establish a two-dimensional slope experimental model based on a comprehensive analysis of geological surveys, GNSS monitoring, and data on rainfall and reservoir water levels. The model was vertically divided into the sliding mass, sliding zone, and sliding bed, while three additional horizontal surfaces were arranged from the front edge to the rear edge. Each monitoring profile was equipped with moisture content sensors and pore water pressure sensors, and displacement sensors were installed on the surface of the landslide model. Based on the step-like deformation characteristics of the landslide corresponding to fluctuations in reservoir water levels and rainfall conditions, and incorporating meteorological and hydrological data from the area surrounding the Jingang Village landslide, it was observed that the reservoir area experienced frequent heavy rainfall during periods of high water level operation and during phases of rising water levels. Three physical simulation experiments were designed. Condition one simulated the reservoir water level rising from low to high, remaining stable for a period, and then dropping back to a low level, with the cycle repeated several times. Condition two simulated continuous heavy rainfall during periods of high reservoir water level. Condition three was developed based on condition one and simulated continuous heavy rainfall while the water level rose from low to high. Real-time monitoring of the landslide failure process, including pore water pressure, moisture content data, and slope deformation, facilitated the investigation of the instability mechanisms of expansive soil landslides under the combined influence of rainfall and reservoir water level fluctuations.

Results and Discussions The main research content and results were summarized as follows: 1) Model experiments showed that the failure process of the Jingang Village landslide manifested as tractional failure. The process began with localized deformation at the toe of the slope and then progressively developed upward, eventually leading to overall failure in the mid-front section. This process formed an open face and a steep step at the landslide fracture, followed by stepwise collapse; 2) Reservoir water fluctuations and rainfall produced different response patterns in the internal pore water pressure and moisture content of the landslide. Only during fluctuations in the reservoir water level did the pore water pressure and volumetric water content at the front edge of the slope exhibit cyclic changes, while no response occurred at the middle and rear edges.

After rainfall was applied, pore water pressure and volumetric water content outside the influence range of the reservoir water began to respond, increased with continued rainfall, and eventually stabilized. The increase in moisture content within the sliding zone was significantly higher than that at the slope surface, indicating that water ultimately accumulated near the sliding zone; 3) *In situ* monitoring and physical model experiments demonstrated that a drop in reservoir water level produced sustained deformation at the front edge of the landslide. Rainfall caused overall deformation of the landslide, which was significantly greater than the deformation induced by the drop in reservoir water level. Landslides that experienced repeated cycles of rising and falling reservoir water levels were more susceptible to significant deformation under heavy rainfall conditions and could potentially become unstable; 4) The continuous deformation of expansive soil landslides affected by the combined action of rainfall and reservoir water resulted from the dual effects of external added stress and the reduction of internal strength parameters. Persistent heavy rainfall rapidly infiltrated the slope body along fractures and raised the groundwater level, while the strength of the sliding zone soil continued to decrease due to prolonged soaking by groundwater. This process served as a key factor driving the continued deformation of large expansive soil landslides.

Conclusions Based on the analysis of the deformation mechanism of expansive soil landslides under the combined effects of rainfall and reservoir water, together with geological surveys and *in-situ* monitoring data such as rainfall, reservoir water level, and GNSS monitoring, and based on the analysis of landslide deformation characteristics, a physical model was designed and constructed. The changes in relevant landslide parameters under different heavy rainfall and reservoir water conditions were monitored in real time, reflecting the deformation and failure mechanisms of expansive soil landslides under the combined effects of rainfall and reservoir water by installing sensors such as displacement, pore water pressure, and water content sensors. The findings provide reference significance for the study of expansive soil landslide failure theory and for practical disaster prevention and mitigation efforts.

Key words: expansive soil landslide; deformation failure mechanism; physical model test; reservoir water level fluctuation; rainfall

(编辑 赵 婧)

引用格式: Huang Xiaohu, Hu Yulong, Guo Fei, et al. Study on the mechanism of landslide promotion of expansive soil under the combined action of rainfall and reservoir water[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 109–122. [黄晓虎, 胡禹龙, 郭飞, 等. 降雨及库水联合作用下膨胀土滑坡变形机理研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 109–122.]