

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221436

# 库水位涨落对石榴树包滑坡变形机理的模型试验研究

陈露军, 卢应发, 孙文庆

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 石榴树包滑坡是三峡库区结构复杂的巨型滑坡之一, 自大坝蓄水以来, 滑坡出现复活迹象, 对周边人民的生命财产造成威胁。为研究石榴树包滑坡在库水位涨落下的变形破坏模式和响应机制, 通过大型物理模型试验, 精确控制试验库水位涨落条件, 在边坡内埋设位移传感器、土压力传感器及孔隙水压力传感器来分析试验现象。结果表明, 库水位涨落影响主要集中在滑坡前缘坡脚处, 库水蓄水产生悬浮减重作用, 会削弱部分滑体重力, 从而使得滑坡稳定性下降; 坡体内力响应应具有滞后性, 库水上涨时土体有效应力增加, 滑带抗滑力增大, 且随着上涨速率增大而形成指向坡内的渗透力越大, 有利于滑坡稳定; 库水位条件下石榴树包滑坡变形破坏模式为原始边坡→坡脚侵蚀及侵蚀扩展→坡脚裂隙形成及扩展→坡面裂隙形成→局部滑塌, 为动水压力型滑坡。试验揭示了库水位条件下的变形机理, 为研究类似滑坡提供了参考。

**关键词:** 石榴树包滑坡; 库水位涨落; 模型试验; 变形机理; 破坏模式

**中图分类号:** TV698.2<sup>+</sup>32; TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0135-04

## 1 概况

石榴树包滑坡位于湖北省巴东县东壤口镇黄蜡石村, 长江西陵峡与巫峡之间, 滑坡平面形态似舌状, 坡面呈阶梯状, 平均坡角约 26°, 后缘高程为 340 m, 前缘剪出口高程为 56 m, 常年被库水淹没, 滑体纵长 550 m, 宽 320~470 m, 面积约 0.25 km<sup>2</sup>, 厚 20~50 m 不等, 体积约为 1 180 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。库水位涨落对滑坡稳定性的影响至关重要。本文拟通过模型试验方法从位移、孔隙水压力、土压力三个方面获取数据来分析影响滑坡变形的响应机制及变形机理, 以达到灾害预警防治的目的。

## 2 模型试验

### 2.1 模型概化

以主滑方向为典型的地质剖面进行模型试验, 根据试验场地结构和滑移特性, 参照滑坡原型和试验平台尺寸, 以 1/100 比例概化模型, 设计长 5.5 m, 高 3.2 m, 宽 0.6 m, 土体重度相似比  $C_\rho = 1$ , 粘聚力相似比  $C_c = 100$ , 内摩擦角相似比  $C_\varphi = 1$ , 渗透系数相似比  $C_k = 8.185$ , 弹性模量相似比  $C_k = 100$ 。根据相似理论及在所列滑坡物理力学参数的基础上, 结合石榴树包滑坡模型试验概化地质结构的特点, 综合确定石榴树包滑坡滑带原型材料与相似材料物理力学参数, 各参数取值见表 1。

表 1 滑体原型材料与相似材料物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of sliding body prototype materials and similar materials

滑坡部位	统计方法	天然重度	抗剪强度		渗透系数	弹性模量	泊松比
		$\rho/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$E/\text{MPa}$	$\mu$
滑体	原型值	20.09~21.17	13.5~17.8	12.11~26.9	0.006~0.10	12.2~18.5	0.33
	相似值	20.09~21.17	0.14~0.18	12.11~26.9	$7.33 \times 10^{-4} \sim 0.01$	0.18~2.76	0.33
	相似比	1	100	1	8.185	100	1
滑带	原型值		15.0~26.8	12.80~21.40			
	相似值		0.15~0.27	12.80~21.40			
	相似比		100	1			

收稿日期: 2022-07-13, 修回日期: 2022-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641027, 42071264); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

作者简介: 陈露军(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土力学理论及应用, E-mail: clj615615@126.com

通讯作者: 卢应发(1964-), 男, 教授、博导, 研究方向为岩土力学理论及应用, E-mail: lyf77@126.com

### 2.2 模型制作

考虑滑坡滑移特性,在试验模型玻璃上勾勒滑坡边缘线,分别用普通砖块砌成滑床,用水泥砂浆加防渗处理来模拟滑动基岩面。将滑坡分为第1、2 期次滑坡,依次堆筑滑带土和滑体土,通过对模型轮廓的切割和修正得到现场模拟试验模型,见图 1。

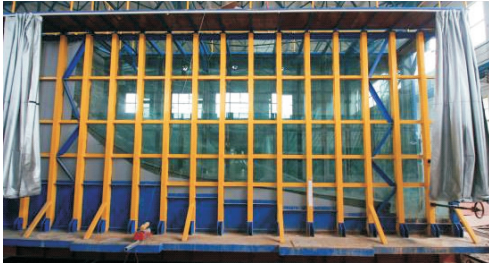


图 1 模型示意图

Fig. 1 Model diagram

### 2.3 试验监测布置

从滑坡模型前缘至后缘设置三个监测断面,实时监测坡体孔隙水压力、土压力和坡体位移变化,其中监测剖面 I、II 位于第 1 期次滑坡,监测剖面 III 位于第 2 期次滑坡,各监测剖面及所用传感器详细埋设见图 2。

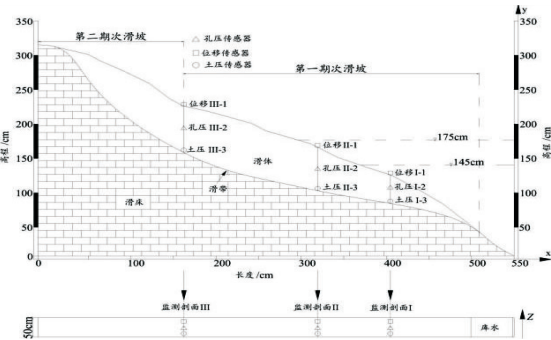


图 2 监测剖面及监测布置图

Fig. 2 Monitoring profile and monitoring layout

### 2.4 试验工况

为研究库水位涨落条件下石榴树包滑坡变形机理及破坏模式,设置 4 种试验工况:①工况 1。库水位以 1 m/d 速率(试验中 10 mm/d)从 145 cm 上涨至 175 cm,静止 2 d(试验中约 4 h)再以同一速率降至 145 cm。②工况 2。库水位以 2 m/d 速率(试验中 20 mm/d)从 145 cm 上涨至 175 cm,静止 2 d(试验中约 4 h)再以同一速率降至 145 cm。③工况 3。库水位以 3 m/d 速率(试验中 30 mm/d)从 145 cm 上涨至 175 cm,静止 2 d(试验中约 4 h)再以同一速率降至 145 cm。④工况 4。库水位以 4 m/d 速率(试验中 40 mm/d)从 145 cm 上涨至 175 cm,静止 2 d(试验中约 4 h)再以同一速率降至 145 cm。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 不同工况下坡体变形模式

随着试验水位上涨,库岸周边岩土体被浸泡软化,故研究水位以不同速率上涨及降落入渗至坡体内对库岸滑坡稳定性造成的影响<sup>[1]</sup>。

在库水位上涨阶段试验中,模型前缘逐渐被水淹没至 175 cm 水位,在不同上涨速率下观察模型表面现象,其中以 1、2 m/d 速率上涨时几乎无明显变形,但以 3、4 m/d 速率上涨时坡脚产生了微小开裂,4 m/d 开裂程度微大于 3 m/d 时开裂程度。根据试验变化可知,水位上涨时模型变形程度较小,到达最高库水位时,未见坡面前缘裂缝进一步延伸,滑坡后缘无明显变形。水位降落时,坡脚开始出现不连续性裂缝,原裂缝进一步扩展。由于库水外渗入坡体,随后静置一定时间有利于坡体的浸泡软化,尤其是水位以 4 m/d 速率降落,坡体内外产生较大水头差,产生指向坡外较大的渗透力,由此产生应力使得裂缝逐渐与旧裂缝贯通,坡脚发生局部坍塌。其中工况 1、2 条件下未见试验模型发生破坏,在工况 3 条件下库水位降落时旧裂缝产生延伸发展,未见新裂缝产生。图 3 为试验模型在工况 4 降落时坡脚发生局部崩滑破坏前后照片。



(a) 前缘发生滑移

(b) 前缘发生崩塌

图 3 工况 4 条件下试验模型前缘破坏照片

Fig. 3 Photos of leading edge failure of test model under condition 4

根据试验模型地表位移监测数据分析,在库水位上涨初期,滑坡区抗滑力增大,有利于滑坡稳定。由于水位的上涨边坡内外产生的渗透力有利于坡体稳定,亦即对边坡的稳定性弱化不明显。如图 4(a)所示,在第 4~16 h(水位从 145 m 上涨到 160 m)位移出现缓慢增长趋势,工况 1~4 坡体均发生了滑移现象且移动位移量分别约 0.033、0.065、0.16、0.23 mm,滑坡范围主要集中在滑带前缘。水位上涨使得渗透力在坡体内上升,对岩土体起到不可逆软化作用,然而库水蓄水

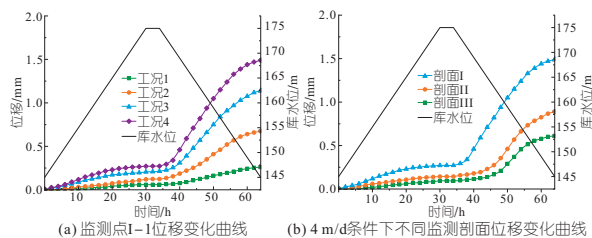


图 4 库水位涨落下监测位移曲线

Fig. 4 Monitoring displacement curve under fluctuation of reservoir water level

产生悬浮减重作用,会削弱部分滑体重力,从而降低了滑坡稳定性。第 25~35 h(库水上涨至 175 m)监测位移保持稳定,分析认为库水位对滑坡体的表面产生了较大的静力反压作用,阻止了坡体前缘下滑。第 40~58 h(水位从 175 m 降至 145 m),随着水位降落速率增加,模型中坡内水位低于坡外水位,两者间落差速率增大,导致坡内水压高于坡外,产生指向坡外较大的渗透力,渗透力愈大,滑坡位移监测值愈大,产生较大的坡体位移量,工况 1~4 坡体均发生了滑移现象且移动位移量分别约 0.201、0.551、0.926、1.218 mm,坡体的顶部出现拉裂缝(图 3(b)),说明滑坡内部已形成贯通滑带,极大恶化坡体稳定性。如图 4(b)所示,涨落速率越快,坡面位移越大;水位降落中位移变化主要发生在滑坡前缘,对滑坡后缘位移变化影响较小;同一涨落速率下,处于第 1 期次滑坡监测点位移大于第 2 期次滑坡监测点位移,揭示了石榴树包滑坡表现为从前缘向后缘变形逐渐减弱的特征,呈现牵引式滑坡变形,且滑坡稳定性受水位波动影响则属于动水压力型滑坡,其变形规律与现场监测资料分析结果一致。

### 3.2 不同工况下坡体内力响应机制

#### 3.2.1 孔隙水压力变化

随着试验水位上涨,库岸周边岩土体被浸泡软化,从而改变坡体水位,监测点的孔隙水压力随之改变。监测点 I-2 处水位上涨时孔隙水压力变化曲线见图 5(a)。结果表明,不同工况下孔隙水压力变化不同。4 种工况下在第 5~32 h(水位从 145 m 上涨到 160 m)增加幅度分别为 2.60、

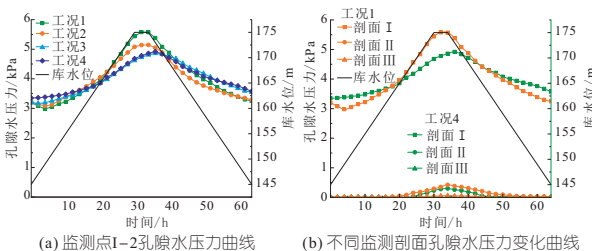


图 5 库水位涨落下孔隙水压力曲线

Fig. 5 Pore water pressure curve under reservoir water level fluctuation

2.06、1.53、1.43 kPa。工况 1、2 孔隙水压力表现为先减小后增加,分别约为 0.22、0.13 kPa,分析认为水位上涨速率较小的情况下,坡面土体被水充分浸泡软化,使得土体体积膨胀而造成孔隙水压力先降低。工况 3、4 则未出现孔隙水压力降低现象,这是因为水位快速上涨时土体未能充分浸泡而未发生微小裂缝,且因坡内外水位差形成渗透力并指向内部,从而抑制土体变形,有利于滑坡短暂性稳定<sup>[2]</sup>。

在水位即将进入静置阶段时,孔隙水压力会持续增加,再逐渐趋于稳定。坡体响应具有滞后性,是因为库水渗入至坡体监测点需要一定时间,因此孔隙水压力的变化滞后于库水位波动过程,波动速率越快,滞后性越显著。由图 5(b)可知,对比工况 1、4,水位上涨至 175 cm 时,试验模型前缘处孔隙水压力数值变化表现为逐渐弯曲、抬升、凹向坡外。对比不同涨落速率,当水位速率较慢时坡面土体被水充分浸泡软化,在剖面 I 中 2 种工况水位上涨时孔压数值增幅分别约为 2.37、1.57 kPa,水位降落时孔压数值降幅分别约为 2.32、1.34 kPa。当处于较高水位时由于前缘土体被浸泡软化,使得坡体发生局部崩滑导致后缘出现相应数值变化分别为 0.42、0.30 kPa。

在库水位降落阶段,孔隙水压力的监测数值与库水位呈相应正相关特征,且下降过程中变化速率先增大后减小。水位快速下降时,坡体内外形成较大的水头差且形成指向坡外的渗透力速度较大,因此水位快速下降时测点孔隙水压力降低较快;同时测点 I-2 的读数比 II-2 的读数达到稳定值的时间略快,这是由渗流路径增加所致,坡体内外水头差逐渐减小,孔隙水压力呈缓慢降低趋势。当水位降至初始水位时,测点孔隙水压力值大于初始值,这是坡体响应具有滞后性所致。

#### 3.2.2 土压力变化

试验水位上涨阶段,库水入渗使得滑坡土体重度增大,土压力传感器监测出的数值亦相应增大(图 6(a))。土压力与孔隙水压力变化均存在滞后现象,在工况 1、2 中,库水缓慢抬升使得滑体前缘充分浸泡发生软化且需一定时间才能入渗到监测点处,土压力也呈现出先减小后增加再趋于稳定的特征,土压力减小数值分别约为 0.13、0.10 kPa。第 5~32 h(水位从 145 m 上涨到 160 m)土压响应较快,4 种工况下变化数值分别约为 2.123、1.742、1.53、1.42 kPa。从试验数据分析,无论在何种涨落速率下,第 2 期次滑坡变形在库水位上涨下土压力几乎无变化(图 6(b)),主要是

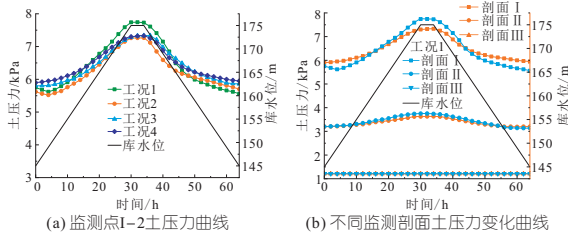


图 6 库水位涨落下土压力曲线

Fig. 6 Earth pressure curve under rise and fall of reservoir water level

因为第 1 期次滑坡变形改变了第 2 期次前缘滑坡阻滑条件,从而产生了微小变形。分析认为测点 I-3 区域是滑坡发生下滑的压力集中区,随着水位降落,滑坡表面原上覆厚层土因坡体内产生向外渗透力使其推动向下滑动,产生裂缝导致土压应力积累释放,从而使得上层土体重度减少,土压力的监测数值降低。

### 3.3 不同工况下坡体破坏机理分析

根据试验过程中,试验滑坡模型出现的一系列变形特征<sup>[3]</sup>,总结出了在库水位涨落条件下该类大型边坡的变形破坏机理模式(图 7),具体为:

①坡脚侵蚀及侵蚀扩展阶段。库水涨落一段时间后,滑坡前缘及其坡面浅层土体达到饱和,当水位降落时,坡体后缘存留的库水形成表面径流往坡脚流动,而坡脚本身在库水涨落条件下与坡内外形成的水头差指向坡外渗透力,产生微小裂隙,随之径流经过坡脚,坡脚的侵蚀程度不断增大,侵蚀深度及长度也随之增大。②坡脚裂隙形成及扩展阶段。在试验中库水位涨落具有规律性,斜坡物质为结构松散—较松散的碎石土,渗透性良好,消

落带地段地下水与库水水力联系良好,地下水受库水和降雨入渗补给;斜坡中后部较平缓,有利于雨水汇集、泥质含量较高,库水易于向坡体充分渗透,加之库水降落后,边坡浅层表面土体间歇性失水过多,致使坡面土体处于干湿交替状态,导致土体涨缩不均,从而沿着坡面倾斜方向及垂直于倾斜方向上出现裂缝,随着试验的持续及表层土体干湿交替,坡脚裂隙不断延伸及发展。③坡面裂隙形成。沿着坡面倾斜方向及垂直于倾斜方向上出现裂缝后,使得裂缝上部坡面土体有向下移动空间,并伴随着库水位涨落条件下,斜坡土体重度增大,加之土体遇水浸泡软化后强度变小,坡肩残留库水因重力作用发生流动从而形成径流,进入拉裂隙后产生孔隙水压力,使得第 1 期次滑坡后缘产生拉裂隙,最终导致裂缝逐步延伸和贯通。④局部滑塌阶段。滑坡前缘裂隙不断扩展和贯通,同时滑坡后缘因土体重度而形成裂缝沿着边坡倾斜方向逐步形成,当裂隙内的孔隙水压力达到一定极限后,坡体滑动面已贯通,坡体前缘发生局部滑塌。

## 4 结论

a. 在工况 4 条件下,库水位降落时监测地表变形位移约 1.218 mm,且坡体顶部出现拉裂缝,坡脚发生局部崩滑,表明坡体产生新裂缝与旧裂缝延伸贯通,形成局部贯通滑带,极大降低了滑坡稳定性,故可将滑坡变形加剧作为边坡失稳征兆。

b. 试验表明测点 I-3 区域是滑坡发生下滑的压力集中区,随着水位降落,滑坡表面原上覆厚层土因坡体内产生向外渗透力使其推动向下滑动,产生裂缝导致土压应力积累释放,从而使得上层土体重度减少,监测土压力数值降低。

c. 库水位条件下大型滑坡变形破坏机理模式经历四个阶段,具体表现为原始边坡→坡脚侵蚀及侵蚀扩展→坡脚裂隙形成及扩展→坡面裂隙形成→局部滑塌。

### 参考文献:

[1] 岳红艳,吕庆标,朱勇辉,等.河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J].人民长江,2021,52(S2):15-20.  
 [2] 魏学勇,欧阳祖熙,董东林,等.库水位涨落条件下滑坡渗流场特征及稳定性分析[J].地质科技情报,2011,30(6):128-132.  
 [3] 谷举,刘刚,师宏强,等.采用模拟试验研究水位涨落影响下的坡面波浪侵蚀过程[J].中国水土保持科学,2020,18(1):49-56.

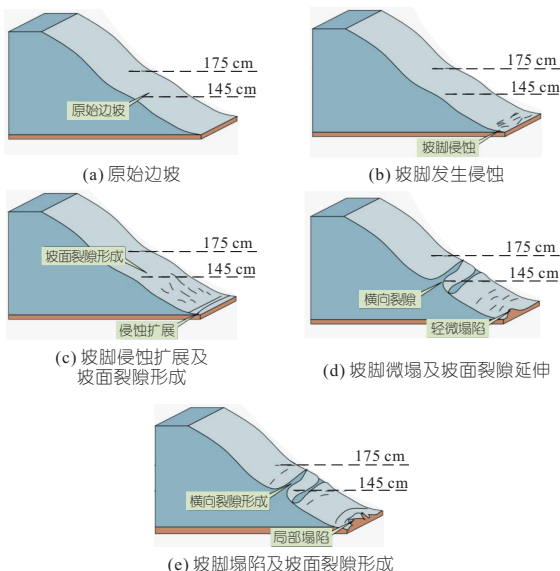


图 7 库水位涨落条件下边坡破坏模式

Fig. 7 Slope failure mode under reservoir water level fluctuation

