

[文章编号] 1003—4684(2021)02-0066-04

降雨和库水位耦合作用下滑坡的模型试验研究

谢 鹏, 陈 昊, 朱 蕾, 卿 菁

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 降雨和库水位上升是滑坡失稳的重要因素之一,为探究滑坡变形过程和失稳条件,选取千将坪滑坡为实体对象,制作相似比为 1:190 的物理模型,在降雨和库水位耦合作用下,通过不同模型倾角角度并辅以监测手段进行试验研究。试验结果表明:滑面倾角越大,在同样诱发因素下越容易失稳;在降雨和库水位耦合作用下,位移基本存在于滑坡前缘,滑坡后缘波动较弱,表现出牵引式滑坡特征;滑坡土压力与位移变化存在一定的对应关系,土压力随着滑坡的缓慢变形逐渐增加,滑坡破坏前瞬间土压力急剧增大达到峰值,破坏失稳时土压力急剧减小,呈现出应力重分布现象。

[关键词] 滑坡; 降雨; 库水位上升; 耦合作用; 模型试验

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

随着我国经济建设的迅速发展,很多水电工程建设项目在峡谷区实施,峡谷地区地质情况复杂,本身就存在大量的欠稳定滑坡体,水电工程的建设在峡谷区产生了大量的库岸滑坡地质灾害,一定程度上限制了经济的可持续发展^[1-3]。因此,库岸边坡稳定性分析和边坡的破坏模式以及破坏机理一直是边坡研究的一个重点课题。在众多发生的边坡失稳案例中,库水位变化和突发性降雨起着举足轻重的影响作用^[4-6],成为边坡地质灾害热门研究领域之一。

何满潮等研究了地下水在边坡不同岩体介质中的力学状态,总结了地下水对边坡的作用方式;王乐等^[7-11]通过边坡渗流与坡面径流条件,得出三维有限元模型边坡渗流场;张珏等用^[12-13]DDA 方法建立了连续的裂隙渗流空间场,扩展了裂隙渗流计算空间及精度;薛阳等^[14]利用核磁共振等科学技术获取了涉水边坡坡体水的运动曲线,研究了边坡渗透系数的变化特征。陈祖煜等用^[15-19]极限平衡法、有限元法和其它的散体分析方法对库岸涉水边坡稳定进行了定量分析。然而假定条件与现场不一定相符,故物理模型试验能在单一和多个诱发因素耦合作用下,最大程度真实展现滑坡孕育、发展乃至失稳破坏的全过程^[20-25]。本文对千将坪滑坡进行物理模型试验,探讨在不同角度下降雨和库水位耦合作用下滑坡的破坏过程,在一定程度上有益于缩

小理论与实际的差异,对库岸滑坡预警有一定的借鉴价值。

1 滑坡概况

千将坪滑坡位于秭归县沙镇溪镇千将坪村,所在的青干河河段右岸(南岸)为逆向陡崖,千将坪滑坡体主滑区为舌状地形,左岸(北岸)为顺向坡,坡度 $13^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。斜坡形态呈平直坡,北西—南东向展布,北西高南东低,滑体后缘高程 400 m,前缘高程 90 m。斜坡上陡下缓,平均坡度 25° 。滑体长 1150 m,宽 600 m,平均厚度约 25 m,体积 $1725\times 104\text{ m}^3$,属于特大型滑坡。主滑方向 140° 。滑坡滑动前及三峡水库蓄水前的天然条件下,谷底宽度 50~80 m,高程 89 m 左右,枯水期水深 0.5~3.0 m。三峡水库 135 m 高程水位下,河面宽度 200~300 m,水深 45 m 左右。滑体主要由块裂岩体组成,在滑坡表面局部见有松散堆积块体及原地表崩坡积物。岩性为中厚层粉沙质泥岩、泥质粉沙岩夹厚层长石石英砂岩,岩体一般为块状~次块状结构,局部沿裂隙断开形成裂缝,岩体较为破碎。滑带物质组成主要为碳质页岩夹方解石脉及生屑灰岩透镜体,多处见 3~10 cm 厚的泥化粘土透镜体。滑床为微风化新鲜的中厚层粉沙质泥岩、泥质粉沙岩夹厚层长石石英砂岩,仅沿部分裂隙有轻微蚀变。

[收稿日期] 2020—07—30

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(41372363);三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC0005)

[第一作者] 谢 鹏(1995—),男,湖北荆州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学的理论

2 滑坡物理模型

2.1 模型制作及试验工况

选取主滑方向作为千将坪滑坡物理模型试验研究。将剖面材料分成滑床、滑带、滑体等三个分区(图 1)。根据现有滑坡模型试验系统中模型槽的尺寸,确定试验剖面模型长度和原型长度的相似比为 1:190,模型长 6000 cm,最大高度为 2100 cm。

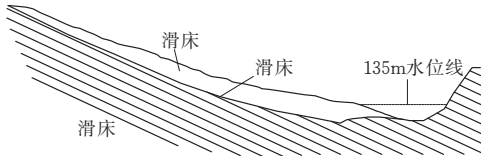


图 1 千将坪滑坡主滑方向剖面概化分区图

根据现有的较完备的量测系统,可对试验过程中滑坡体的位移场的变化进行较准确的量测,该滑坡模型试验系统由试验平台起降控制系统、室内人工降雨控制系统、水库水位控制系统、多物理量测试系统、非接触位移量测试系统组成。试验平台一端的底部为铰支,另一端可以自由抬升,其最大抬升角度为 20°。

为了分析千将坪滑坡在水库蓄水和降雨条件下位移场的变化特征,在剖面 I 到剖面 IV 各埋设一个孔隙水压力传感器、一个土压力传感器和位移传感器,如图 2 所示。

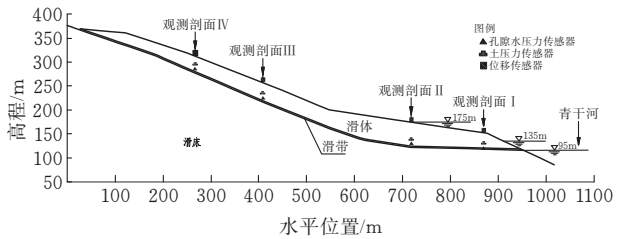


图 2 千将坪滑坡模型传感器布置图

在试验过程中,使模型的倾角分别为 0°、7°、10°,对试验整个过程的测点数据进行采集,形成滑坡模型试验监测数据。

2.2 相似材料

模型几何相似比采用 $n=190$,密度相似比为 1,根据相似原理,采用量纲分析法可以推导模型材料各参数的相似比存在如下

$$\begin{aligned} C_{\varphi} &= C_{\mu} = 1 \\ C_c &= C_E = n \\ C_k &= C_v = C_q = C_t = \sqrt{n} \end{aligned}$$

式中: C 为相似比, φ 为内摩擦角, μ 为泊松比, c 为粘聚力, E 为弹性模量, k 为渗透系数, v 为库水波动速率, q 为雨墙, t 为时间。

根据试验和工程类比得到千将坪滑坡主要物理力学参数建议值。本试验滑带相似材料选取的是大小玻璃、滑带土和水,滑体选取的是重晶砂、河砂、重晶石粉、石蜡、粘土和水。根据相似理论和试验配比进行多组材料试验,然后进行分析比较,得到目标滑体、滑带物理力学参数如表 1 所示。

采用砖石砌体构筑坡体,砂浆抹面并辅以石膏薄层构成一个坚固、光滑且透水性较弱的表面,模拟成滑床基岩面。同时确定滑坡模型模拟 1 d 时间为 $24/\sqrt{190} h$,即 $T_{1d}=1.74 h$,得到千将坪滑坡物理模型试验的降雨与蓄水过程(图 3)。

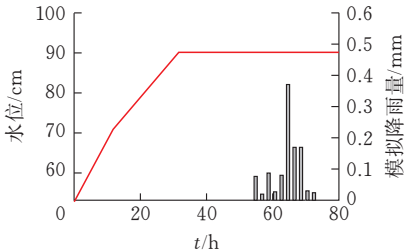


图 3 千将坪滑坡模型试验模拟水库蓄水、降雨过程

表 1 滑坡模型物理力学参数

材料名称	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)		粘聚力 C/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		弹性模量 E/MPa		泊松比 ν		渗透系 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型
滑体	25.1	24.7	31	0.4	30	27	1960	8.96	0.38	0.41	0.0013	0.000018
滑带	23.2	22.1	12	0	16.2	14.9	26	1.2	0.36	0.35	—	—

3 千将坪滑坡试验结果及分析

在模型架倾斜角度分别为 0°、7°、10°情况下,对模型模拟水库蓄水、降雨过程,以及滑坡模型试验整个过程的测点数据进行采集,形成滑坡模型试验监测数据。

从图 4 到 6 可以看出,模型倾角为 0°时,滑坡前缘剖面 I 的孔隙水压力在库水位上升一段时间后才开始增大,经过一段时间的稳定,在降雨后又上升然后下降,然后趋向平稳,说明库水入渗需要一定的时

间,孔隙水压力滞后于库水位上升,且降雨和库水位都会增加孔隙水压力;剖面 II、III、IV 几乎没有出现明显的孔隙水压力变化情况。模型倾角为 7°时剖面 I 的孔隙水压力与 0°时相似,不过孔隙水压力值更大,剖面 II、III 与剖面 I 出现同样的变化过程,剖面 IV 变化过程与 0°时相似。模型倾角为 10°时剖面 I、II 变化过程与 0°、7°相似,不过孔隙水压力在降雨后一段时间达到峰值,然后急剧下降,剖面 III、IV 没有明显的变化。

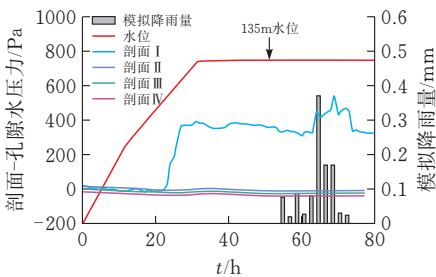


图 4 0°各剖面孔隙水压力

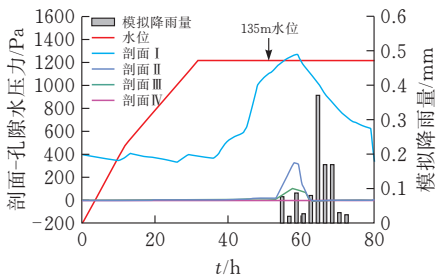


图 5 7°各剖面孔隙水压力

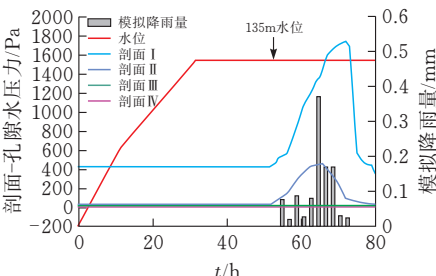


图 6 10°各剖面孔隙水压力

从图 7 到图 9 可以看出,模型架在 0°和 7°时,各剖面的土压力没有太大的变化;在 10°时,剖面 I、II 降雨前土压力与 0°和 7°工况相似,不过急降雨过后一段时间急剧上升然后下降,这时剖面 I、II 已经破坏,与图 12 各剖面位移变化线相符合。

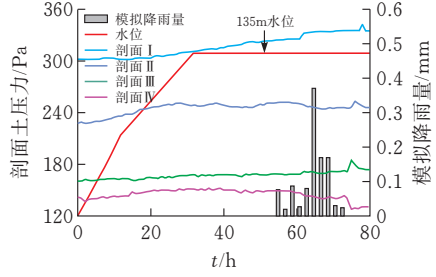


图 7 0°各剖面土压力

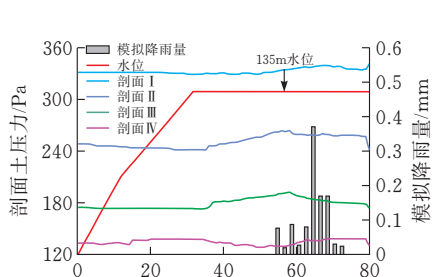


图 8 7°各剖面土压力

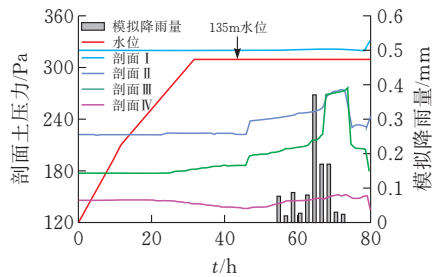


图 9 10°各剖面土压力

图 10 到图 12 显示出:0°和 7°时各剖面没有明显的位移变化情况,与相应工况土压力变化情况呈正相关。导致 0°和 7°工况位移变化出现波动的主要原因是:降雨从坡体表面入渗会引起孔隙水压力增大,孔隙水压力增大导致地表附近非饱和土的基质吸力降低,这就容易导致土体变形,但这种增大现象滞后于降雨过程,这主要是由于降雨入渗需要一定的时间。当降雨停止后,由于地表的蒸发作用,使得孔隙水压力减小,这就致使地表附近非饱和土体基质吸力升高,提高土体的抗剪强度,使得土体的变形受到制约。

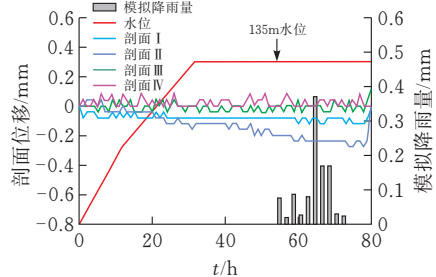


图 10 0°各剖面位移变化过程线

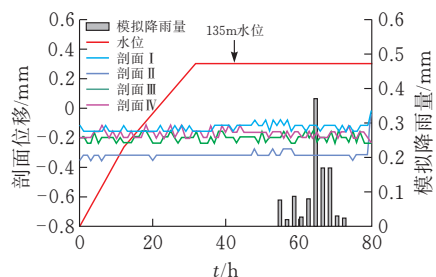


图 11 7°各剖面位移变化过程线

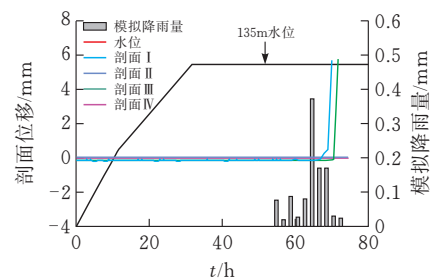


图 12 10°各剖面位移变化过程线

图 13 是模型试验结束后坡体的堆积形态,为了便于比较,将滑坡原型滑前滑后地质剖面按比例绘制在图片上。可以看到滑坡原型滑后堆积形态与模

型堆积形态基本一致,说明通过倾斜模型的方式获得的边坡破坏形态和原型一致。本次模型试验最大真实程度展现滑坡孕育、发展乃至失稳破坏的全过程,明晰了全过程中水压力、土压力及位移的变化情况,能为滑坡预警及治理设计提供一定的借鉴。

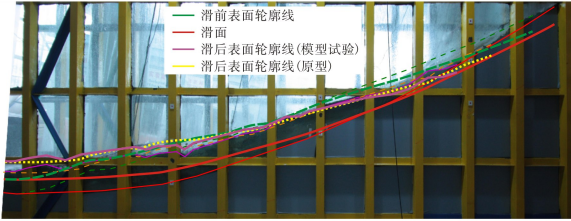


图 13 千将坪滑坡模型滑后堆积形态

4 结论

通过在不同角度工况下对滑坡模型进行实验研究,可以得出以下结论:

- 1)随着模型架角度的增大,滑面倾角也随之增大,在同样降雨和库水位耦合作用下更容易失稳。
- 2)不同监测剖面位移变化特征表明降雨和库水位耦合作用下,位移基本存在于滑坡前缘,滑坡后缘波动较弱,表现出牵引式滑坡特征。
- 3)水压力和土压力在滑坡破坏前瞬间都急剧增大达到峰值,破坏失稳时急剧减小,呈现出应力重分布现象。在滑坡达到临界破坏状态前,孔隙水压力和土压力都变得异常,可以作为滑坡即将失去稳定性的预兆之一。

[参 考 文 献]

[1] 王征亮. 三峡库区长寿区库岸塌岸预测的可拓学研究[D].吉林:吉林大学,2005.

[2] 王殿春.广东清远抽水蓄能电站工程区边坡地质灾害危险性分析及评估[J].资源环境与工程,2008(S1):141-145.

[3] Shuren Wu, Ling Shi, Reijiang Wang, et al. Zonation of the landslide hazards in the forereservoir region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. Engineering Geology, 2001, 59(1-2).

[4] 王剑,沈振中,聂琴.降雨入渗非饱和渗流对水库边坡稳定的影响[J].贵州水力发电,2006(6):32-34.

[5] 王冬青,周启友,陈剑杰,等.降雨和库水位影响下水库边坡变形的 RBF 神经网络预测[J].西部探矿工程,2013,25(4):19-22.

[6] 王冬冬.花岗岩残积土渗流剪切试验及降雨与水位变化对水库边坡稳定性影响研究[D].厦门:厦门大学,2019.

[7] 王乐,田东方.边坡渗流与坡面径流联合求解三维有限

元模型[J].人民珠江,2019,40(5):24-29.

[8] 姚海林,郑少河,李文斌,等.降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J].岩石力学与工程学报,2002(7):1034-1039.

[9] 戚国庆,黄润秋,速宝玉,等.岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2003(4):625-629.

[10] 张家发.三维饱和非饱和稳定非稳定渗流场的有限元模拟[J].长江科学院院报,1997(3):36-39.

[11] 高小育,廖红建,丁春华.渗流对土质边坡稳定性的影响[J].岩土力学,2004(1):69-72.

[12] 张珏.基于 DDA 方法的岩体裂隙渗流模拟研究[D].成都:西南交通大学,2017.

[13] 李志环.基于 DDA 分析的白石水库库岸硬岩边坡倾倒变形研究[J].水利科学与寒区工程,2020,3(01):76-78.

[14] 薛阳,吴益平,苗发盛,等.库水升降条件下考虑饱和和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J].岩土力学,2020,41(5):1709-1720.

[15] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚.边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J].岩土工程学报,2001(5):525-529.

[16] 冯树仁,丰定祥,葛修润,等.边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J].岩土工程学报,1999(6):657-661.

[17] 曾亚武,田伟明.边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J].岩石力学与工程学报,2005(S2):5355-5359.

[18] 雷远见,王水林.基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J].岩土力学,2006(10):1693-1698.

[19] 贺续文,刘忠,廖彪,等.基于离散元法的节理岩体边坡稳定性分析[J].岩土力学,2011,32(7):2199-2204.

[20] 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.

[21] 詹志发,贺建先,郑博文,等.边坡模型相似材料配比试验研究[J].地球物理学进展,2019,34(3):1236-1243.

[22] 王一冰,朱宝强,周成,等.坡面降雨和坡脚浸泡对土坡影响的模型试验研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):21-26+32.

[23] 赵家成,吴剑,晏华斌.白家包滑坡变形机制的模型试验研究[J].水电能源科学,2012,30(4):70-72+82.

[24] 李旭.三峡库区四方碑滑坡预报判据研究[D].成都:成都理工大学,2010.

[25] 吴剑,张振华,王幸林,等.边坡物理模型倾斜加载方式的研究[J].岩土力学,2012,33(3):713-718.