

DOI: 10.11779/CJGE201703008

# 降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型 试验研究

李卓<sup>1, 2, 3</sup>, 何勇军<sup>1, 2</sup>, 盛金保<sup>1, 2, 3</sup>, 李宏恩<sup>1, 2</sup>, 李铮<sup>1, 2</sup>, 杨阳<sup>1, 2</sup>

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029;  
3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 根据云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡特点, 为了对降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡有深入的了解, 进行了降雨与库水位共同作用下边坡滑坡大型模型试验研究。试验结果表明: 降雨是引起近坝库岸边坡滑坡的重要因素, 降雨与库水位共同作用下近坝库岸滑坡有效应力减小, 研究库水位以下边坡土体的抗剪强度减小; 库水位作用使得边坡产生沉降和裂缝, 边坡的滑坡是由降雨和库水位共同作用引起, 库水位以下边坡土体水分入渗充分, 边坡内部孔隙水压力较大, 边坡易产生滑坡且滑坡规模较大, 近坝库岸边坡滑坡属于浅层牵引式滑坡。

**关键词:** 库岸; 边坡; 滑坡; 降雨与库水位共同作用

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0452-08

**作者简介:** 李卓(1979-), 男, 宁夏隆德人, 博士, 高级工程师, 从事土石坝工程和水工建筑物防冻胀等方面的研究工作。E-mail: zhuoli@nhri.cn。

## Landslide model for slope of reservoir bank under combined effects of rainfall and reservoir water level

LI Zhuo<sup>1, 2, 3</sup>, HE Yong-jun<sup>1, 2</sup>, SHENG Jin-bao<sup>1, 2, 3</sup>, LI Hong-en<sup>1, 2</sup>, LI Zheng<sup>1, 2</sup>, YANG Yang<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Dam Safety Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** According to the landslide characteristics of the slope of the reservoir bank of Longjiang Hydropower Station in Yunnan Province, laboratory tests are conducted to investigate the characteristics of the landslide under the combined effects of rainfall and reservoir water level. The results show that the rainfall is an important factor for causing landslides of the reservoir bank near the dam, and the effective stress of the slope is reduced by the combined effects of rainfall and reservoir water level. Therefore, the shear strength of the slope decreases, and the subsidence and cracks of the slope are induced by the action of reservoir water level. The landslide of the slope is caused by the interaction of rainfall and reservoir water level. For the soil of the slope under the reservoir water level, the moisture infiltration is sufficient, and the pore water pressure inside the slope is large. Landslides are easily induced near the reservoir bank, and such kind of landslide belongs to the drawing landslide in shallow surface.

**Key words:** reservoir bank; slope; landslide; combined effect of rainfall and reservoir water level

## 0 引言

水库蓄水及库水位周期性的循环涨落, 经常会诱发库岸新老滑坡的产生或复活, 在丘陵和山区水库中, 因蓄水运行而造成的库岸滑坡产生和复活现象十分普遍。强降雨引起的地表径流从河道汇入水库, 河水的侧向冲刷, 冲刷掏空坡脚岩土体, 对近坝库岸边坡坡脚产生冲刷作用, 使得近坝库岸边坡失稳下滑。

近年来, 水库近坝库岸滑坡的危害主要包括: ①大量岩土体滑入水库, 减少了水库的有效库容, 甚至

把水库变成石(库)而使水库废弃, 如瓦依昂水库; ②滑坡直接摧毁水库及周边建筑物; ③滑坡体高速滑入水库中, 造成巨大的涌浪, 直接危及大坝安全及库区下游人民财产安全。因此, 研究水库库岸滑坡的机理和库岸的稳定性, 对库区滑坡治理提供科学依据。关

基金项目: 南京水利科学研究院院基金项目(Y716009); 国家自然科学基金项目(51309164, 51579154, 51509164, 51609149); 水利部公益性行业科研专项项目(201301033); 水利部“948”项目(201501)  
收稿日期: 2015-11-23

于水库诱发滑坡的机理,国内外学者进行了大量的研究,研究表明,水库库岸滑坡除了具有一般山地滑坡的基本特征外,其特征在于水库蓄水及水库运营使滑坡所赋予的地质环境不断发生变化<sup>[1-8]</sup>。

中村浩之对水库滑坡的分析及实测研究认为,浸水和库水位急剧降低和降雨是水库滑坡形成的主要因素<sup>[9]</sup>。罗先启等<sup>[10]</sup>和李卓等<sup>[11]</sup>建立了室内人工降雨控制系统、水库水位控制系统、大型滑坡试验平台起降控制系统等和多物理量测试系统,以石榴树包滑坡为例,研究了水库型滑坡变形破坏规律。胡修文等<sup>[12]</sup>用3个小比例尺二维物理模型试验,对三峡库区赵树岭滑坡在库区蓄水、水位波动、地面荷载和可能的地震荷载作用下的整体稳定性及其可能的变形、破坏机理进行了研究。赵代鹏等<sup>[13]</sup>针对浮托减重型滑坡,运行自主研制的滑坡模型试验系统,建立浮托减重型滑坡模型进行库水升降作用试验,试验结果表明,库水升高,滑坡模型体内有效应力减小,库水位降低,有效应力增加。贾官伟等<sup>[14]</sup>通过大型模型试验研究了水位骤降引起致临水边坡滑坡的原因及失稳模式,试验结果表明,坡外水位骤降时,坡内水位的下降速度显著滞后于坡外,产生指向坡外的渗流,是滑坡产生的重要原因。刘新喜等<sup>[15]</sup>根据三峡水位调控方案考虑库区极端暴雨情况,利用有限元模拟库水位在175~145 m波动和降雨时红石包滑坡暂态渗流场,并考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响。郑颖人等<sup>[16]</sup>重点研究了水位下降时坡体内浸润面位置解析解与数值解的对比分析以及根据经验概化确定浸润面位置进行稳定性分析存在的误差。卢书强等<sup>[17]</sup>为了对三峡库区树坪滑坡稳定性及变形发展趋势进行评价,采用现场地质调查和勘察的方法确定了滑坡的形态和性质,挖掘了变形监测数据,对滑坡的稳定性进行了计算和预测。

综上所述,近坝库岸滑坡研究主要包括蓄水初期水位上升引起的滑坡和水位骤降引起的滑坡,有关降雨与库水位共同作用下近坝库岸滑坡的研究尚未报道。以云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡为例,由于滑坡监测资料少,有必要进一步认识降雨与库水位共同作用下云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡特性,为此,有必要根据地勘资料和降雨情况,通过降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡的模型试验研究,进行了边坡滑坡模型试验,有助于进一步认识云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡特性,为近坝库岸边坡稳定性分析和研究提供了科学依据。

## 1 云南省龙江水电站边坡滑坡概况

云南省龙江水电站滑坡位于云南省德宏州遮放镇

附近,距离芒市约70 km,滑坡区属南亚热带季风气候,每年5月~10月是雨季,降雨量占全年降雨量82%,年平均降雨量1709.4 mm,年平均气温18.9℃,终年无雪,滑坡区域海拔1000.00~2000.00 m。滑坡体位于龙江水电站左岸,滑坡体所处地河谷呈基本对称“V”字型,谷底宽50~70 m,地形坡度为45°,由于前期连续降雨和库水位作用,该部位已产生部分滑坡,滑坡体平面呈长方形,中前部大致等宽,滑坡体纵长120 m,横宽63 m,滑坡体厚度约5~10 m,面积7560 m<sup>2</sup>。根据地质勘探揭露上层为黏土:棕红、灰黄色,硬塑状态,土层结构较松散,厚度6~15 m。下层为全风化片麻岩:灰白、灰深,矿物成份主要为长石、石英、黑云母,斑状变晶结构、片麻构造,全风化,多为土状,厚度约15~20 m。最下层为强风化片麻岩:灰、深灰、灰黄色,矿物成份主要为长石、石英、黑云母,斑状变晶结构、糜棱结构,片麻构造,强风化,多为碎石及角砾状,少部呈砂状、土状。

## 2 试验内容及方法

### 2.1 模型试验研制

降雨模型试验箱为自行研制,降雨模型试验箱由主体模型箱、降雨系统、供水系统、多物理量测试系统(包括孔隙水压力、土压力、张力)、数据采集系统和高速摄像采集等组成。为了便于观察边坡体的变形和滑坡过程,在模型箱的两侧侧面设置高透明有机钢化玻璃可视窗口,可以实时观测试验过程中边坡内部和侧向的变形、位移情况。模型箱尺寸为700 cm×200 cm×200 cm(长×宽×高),模型箱分为3部分,I用于排水,II为制作边坡,III为模拟地下水位。

### 2.2 试验仪器布置及埋设

模型试验仪器主要仪器有渗压计、张力计、土压力计、高速摄像机、取土器。土压力计埋设于模型箱II底部,土压力计共5支,分别埋设在模型箱II底部四边形的4个点和对角线处,土压力计分别与采集系统连接,采集系统时间间隔10 min收集一次数据,土压力计埋深为170 cm;本次试验仪器埋深0,170 cm对应的边坡高度分别为170,0 cm。在模型试验箱底部埋设了9支渗压计,9支渗压计埋深为170 cm,另外2支埋深为120 cm,渗压计共11支,渗压计分别与采集系统连接,采集系统时间间隔10 min收集一次数据;张力计共5支,在边坡顶部埋设2支,边坡表面埋设3支张力计,3支张力计沿着边坡表面排列在一条线上,5支张力计Z1、Z2、Z3、Z4、Z5埋深分别为150,120,20,20,60 cm,张力计Z5埋深为60 cm(60 cm对应为边坡模型坡顶位置);试验中根

据模型试验情况对边坡进行土体含水率数据采集；高速摄像机布置在模型试验箱的一侧的正前方，进行实时图像采集。图 1 为土压力计布置示意图，其中，T1、T2、T3、T4、T5 为土压力计埋设位置，Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 为张力计埋设位置，张力计布置见图 2。S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8、S9、S10、S11 为渗压计埋设位置，见图 3，模型箱顶部为高速摄像机位置。埋设的各类仪器及其有关细节汇总见表 2。

表 1 滑坡材料模型物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of property indexes of soils			
名称	初始含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
滑体	19.5	1.70	1.686×10 <sup>-5</sup>

表 2 试验仪器汇总表

Table 2 Summary of instruments					
序号	项目	仪器类型	数量	精度	测量范围
1	张力计	电阻式	7	±0.1%	<90 kPa
2	渗压计	振弦式	11	±0.1%	0~350 kPa
3	土压力计	振弦式	5	±0.1%	0~350 kPa
4	含水率	SK-100 水分仪探头、烘干法	1	±0.1%	0%~50%
5	降雨量	自动记录雨量计	1	±3%	0.01~4 mm/m

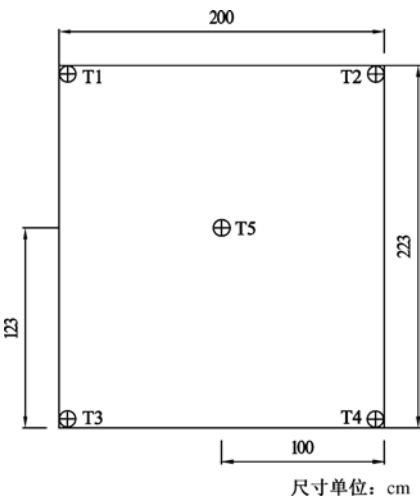


图 1 土压力计布置示意图

Fig. 1 Layout of sensors for earth pressure

2.3 试验方案

本次模型试验方案见表 3，模型试验边坡为均质边坡，边坡坡角为 50°，降雨强度为 70 mm/h。试验用土采用云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡土体。

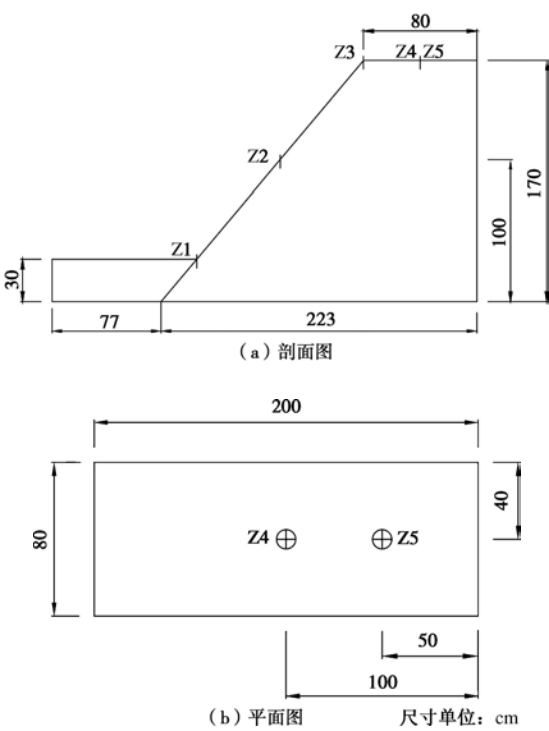


图 2 张力计布置示意图

Fig. 2 Layout of tensiometers

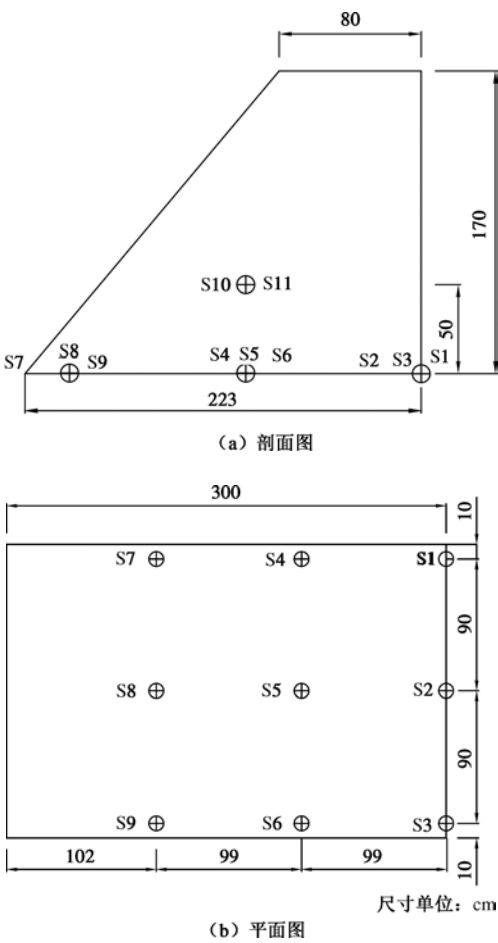


图 3 孔隙水压力布置图

Fig. 3 Layout of sensors for pore water pressure

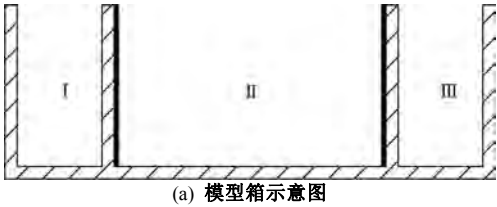
表3 室内模型试验方案				
Table 3 Schemes of experiments				
试验 编号	边坡地质 结构	坡度 /(°)	降雨强度 /(mm·h <sup>-1</sup> )	模型试验
1	均质边坡	50	70	降雨与地下水共同作用下 边坡模型试验

2.4 试验方法

试验黏土取自云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡土样，黏土含水率为19.5%，密度为1.70 g/cm<sup>3</sup>，滑坡体物理材料试验参数见表1。

首先在模型箱Ⅱ内壁和底部涂上一定厚度的凡士林，以减小模型试验过程中与模型箱内壁摩擦，然后将模型箱Ⅱ中装入密度为1.70 g/cm<sup>3</sup>、含水率19.5%黏土装入其中，边坡倾角50°，边坡模型高170 cm，坡顶长为80 cm，试验模型根据云南龙江水电站近坝库岸边坡滑坡模型按照一定的比例设计而成<sup>[9-17]</sup>。根据云南省龙江水电站实际降雨资料分析，确定了本次模型试验的降雨量。

将黏土按照密度为1.70 g/cm<sup>3</sup>装入模型箱后，分层碾压装土，分层厚度为40 cm，为研究降雨与库水位作用下边坡滑坡情况，在模型箱中补水40 cm深度作为库水位，保持上述水头的库水位7 d使其水分充分入渗边坡中，模型试验装置见图4。边坡滑坡物理模型试验见图5，边坡滑坡物理模型尺寸见图6。



(a) 模型箱示意图



(b) 模型试验装置图



(c) 数据采集系统图



(d) 降雨系统图

图4 降雨与库水位共同作用边坡滑坡模型试验装置图



(a)



(b)

图5 滑坡物理模型试验图

Fig. 5 Physical model for landslide

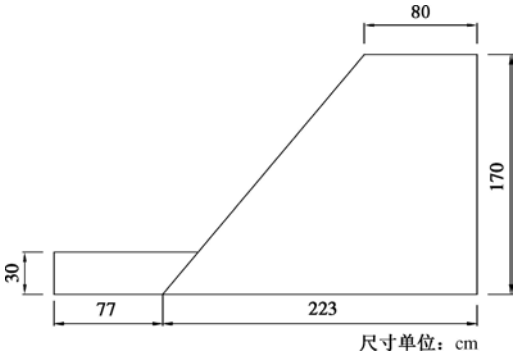


图6 滑坡物理模型尺寸图

Fig. 6 Sizes of physical model for landslide

3 降雨与库水位共同作用下边坡滑坡模型试验

降雨诱发滑坡的主要因素之一，研究表明，天然



边坡、水电、铁路、公路等开挖边坡产生的滑坡以及岩体中地下洞室的塌方多发生在雨季。降雨过程对滑坡造成的影响宏观上在坡体内产生一定的水力作用，微观上则会改变坡体内物质的物理化学性质，是一个非常复杂的随机过程。降雨过程中，滑坡体内的物质经历由干到湿，再由湿到干这样一个从非饱和到饱和的过程。

3.1 边坡土压力变化

降雨与库水位共同作用下引起边坡的滑坡见图 7，降雨与库水位共同作用下边坡土压力变化见图 8。

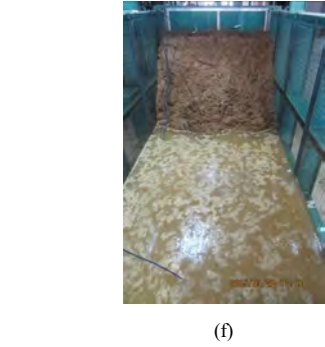
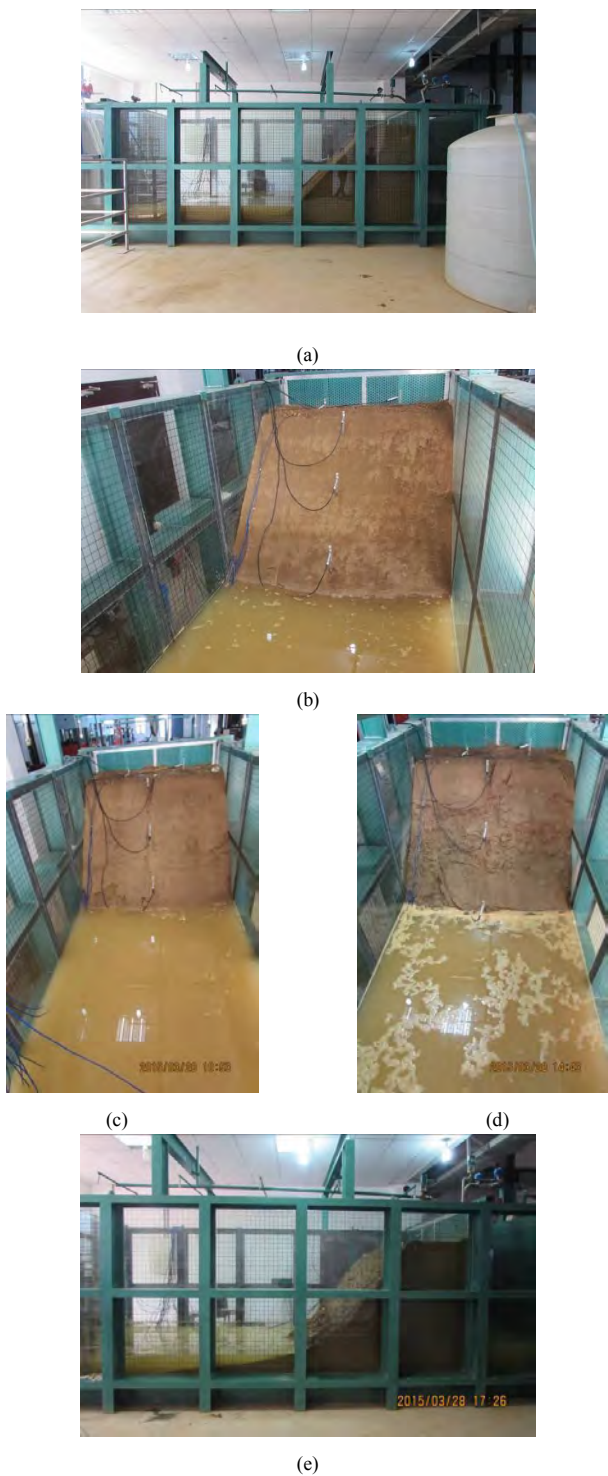


图 7 降雨与库水位共同作用下边坡滑坡图  
Fig. 7 Sizes of physical model for landslide

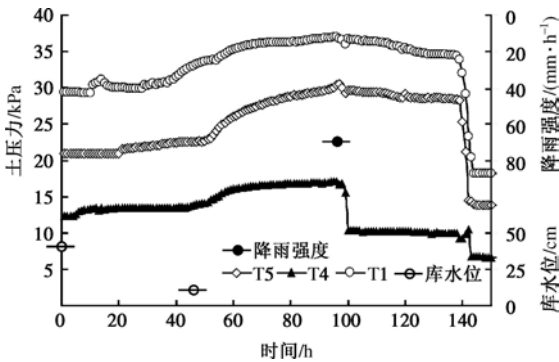


图 8 降雨与库水位共同作用下边坡土压力变化图  
Fig. 8 Change of measured values of total earth pressures

土压力布置见图 1，本次模型试验共布置 5 支土压力计，选取土压力计 T1、T4、T5 为代表点，对降雨与库水位共同作用下边坡滑坡过程的土压力进行分析；由图 8 可知，0 h 分别先后对模型箱Ⅲ、模型箱Ⅱ进行补水，模型箱Ⅲ补水用于模拟库水位，模型箱Ⅱ用于模拟地下水作用，分别向模型箱Ⅲ、模型箱Ⅱ中加入 40，30 cm 水头；0 h 土压力计 T1、T4、T5 的土压力分别为 29.47，12.32，20.90 kPa，44 h 后分别向模型箱Ⅱ、模型箱Ⅲ中加入 10，20 cm 水头，待模型箱Ⅱ、模型箱Ⅲ中的水分充分向边坡土体入渗，通过供水箱不断向两个模型箱中加水直到两个模型箱水头保持 50 cm 不变为止；66 h 后模型箱土压力计 T1、T4、T5 的土压力基本保持不变，表明两个模型箱中的水分入渗充分，96 h 时开始降雨，降雨强度 70.0 mm/h，降雨历时 1.5 h；98 h 时土压力计 T1、T4、T5 土压力均减小，其中土压力计 T4 减小明显，表明降雨与库水位作用下边坡发生了滑坡。139 h 时 3 支土压力的土压力值减小，变化较大，由于进行了边坡滑坡后的土体清理。

3.2 边坡孔隙水压力变化

孔隙水压力计布置见图 3，共布置 10 支孔隙水压力计，其中孔隙水压力计 S1、S2、S3 布置高度为 170 cm、孔隙水压力计 S4、S5、S6 布置高度为 170 cm，

孔隙水压力计 S7、S8、S9 布置高度为 170 cm, S11 布置高度为 50 cm, 本次试验分析以孔隙水压力计 S2、S5、S8、S11 为代表点进行分析; 降雨与库水位共同作用下边坡滑坡过程的孔隙水压力变化见图 9, 由图可知, S11 孔隙水压力 0~180 h 为 0, 0 h 后 S2、S8 孔隙水压力增加, 由于 0 h 后模型箱 II、模型箱 III 开始加水, 水分向边坡模型土体中入渗所致; 66 h 后孔隙水压力计 S2、S5、S8 均达到 4 kPa, 97 h 时孔隙水压力计 S8 增大, S2、S5 先不变, S8 开始增大随后达到最大值 5.6 kPa, 由于降雨引起模型箱 II 水位抬高, 水分入渗至边坡模型土体中, 103 h 对滑坡后的模型箱 II、模型箱 III 中的水进行排水, 因此, 孔隙水压力计 S2、S5、S8 减小。

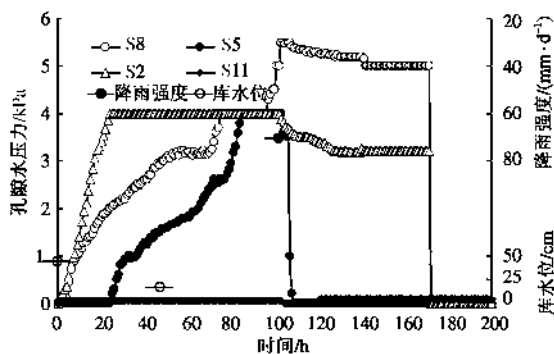


图9 降雨与库水位共同作用下边坡孔隙水压力变化图

Fig. 9 Change of measured values of pore water pressures

### 3.3 边坡吸力变化

降雨与库水位共同作用边坡滑坡模型试验张力计的布置见图 2, 张力计变化见图 10, 由图可知, 0~40 h 过程张力计 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 基质吸力不断增大, 5 支张力计最大值基本达到 -40 kPa, 42 h 时张力计 Z1 基质吸力开始减小, 由于模型箱 II 中的水分入渗至张力计 Z1 所在的位置; 97 h 时张力计 Z2、Z3、Z4 的基质吸力减小, 由于 96 h 开始降雨, 降雨过程中雨水从边坡顶部和边坡表面入渗至坡体内部, 同时降雨引起边坡滑坡; 而张力计 Z5 基质吸力没变化, 由于降雨过程中雨水未入渗至张力计 Z6 底部 60 cm 处。

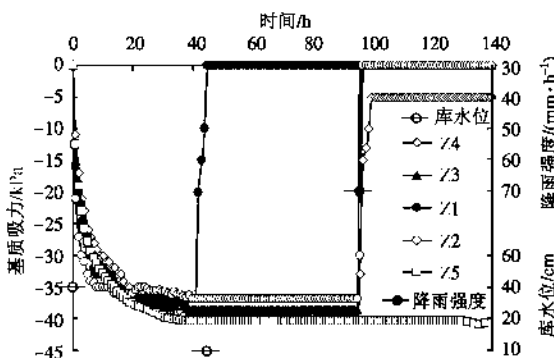


图10 降雨与库水位共同作用下边坡基质吸力变化图

Fig. 10 Change of measured values of matric suctions

降雨诱发滑坡的关键因素是湿润锋下移导致边坡坡体的基质吸力降低, 进而导致抗滑力减小, 下滑力增大, 直至失稳; 基质吸力丧失和湿润锋推移过程受坡体内入渗特征的控制, 降雨诱发滑坡的评价准确与否, 取决于对降雨入渗过程的刻画能力, 降雨后坡体含水率的分布是一个复杂的过程, 降雨和库水位作用加剧了边坡坡体内基质吸力降低。

### 3.4 边坡含水率变化

降雨与库水位共同作用下边坡滑坡前和滑坡后边坡土体含水率的变化见图 11, 由图 11 可知, 边坡顶部 0~40 cm 含水率与试验前相比发生了变化, 0, 20, 40 cm 含水率分别为 23.7%, 22.9%, 22.8%, 0~40 cm 含水率增加是由于降雨入渗引起; 边坡底部 130~170 cm 含水率与试验前相比发生了变化, 130, 150, 170 cm 含水率分别为 22.0%, 25.7%, 26.1%, 130~170 cm 含水率增加是由于库水入渗引起。降雨是边坡失稳的主要因素, 对于由降雨因素导致的边坡失稳机理, 降雨入渗和库水位入渗使得边坡坡体内的地下水位升高, 滑面土体软化, 从而降低了边坡的稳定性, 导致滑坡的发生。

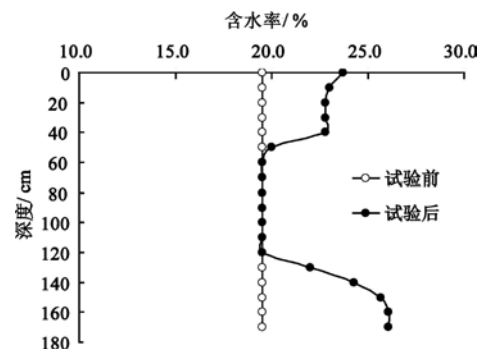


图11 降雨与库水位共同作用下边坡含水率变化图

Fig. 11 Change of measured values of water contents

### 3.5 边坡滑坡破坏

降雨与库水位共同作用下边坡滑坡过程见图 7, 图 12, 由于库水位作用使得库水位以下边坡产生软化效应, 边坡土体发生变形和局部滑动, 主要是由于软化效应使得库水位以下边坡土体在水的浸泡下其吸附水膜的厚度显著增大, 从而使得土体的抗剪强度参数值  $c$ ,  $\phi$  减小; 首先边坡在库水位作用下, 坡脚处产生较多的不连续裂缝, 随着降雨进行, 库水位与坡脚接触处出现较多裂缝且不断裂缝贯通, 库水位以上边坡开始滑动, 边坡滑动以块体滑动破坏为主, 库水位作用使得边坡产生沉降和裂缝, 裂缝位置为边坡高度的 1/3 处, 降雨与库水位共同作用下边坡滑坡与前期降雨作用下边坡滑坡相比, 其滑坡范围和深度大于库水位用下滑坡范围和深度, 模型试验裂缝与龙江水电

站近坝库岸边坡滑坡裂缝位置和发展一致。

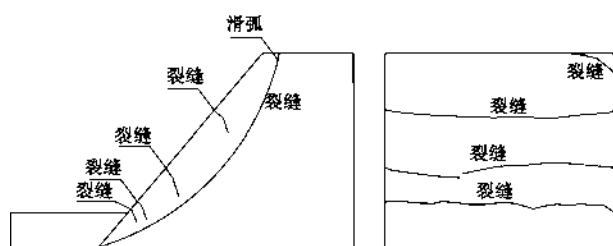


图 12 降雨与库水位共同作用下边坡裂缝及滑弧示意图

Fig. 12 Arcs of slope fracture and slip arcs

## 4 结 论

通过降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究, 研究表明:

(1) 开发研制了降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡室内模型试验装置系统, 对降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡进行了模型试验。

(2) 成功的应用于龙江水电站边坡滑坡的试验研究, 较好的揭示了滑坡在水库运行情况下滑坡土压力、孔隙水压力、基质吸力、含水率和裂缝变化特性, 模型试验结果为进一步认识此类滑坡机制和采取合理的工程措施, 提供了科学依据。

(3) 降雨作用是引起边坡的滑坡重要因素, 降雨使得雨水在边坡定边和坡面进行了充分的入渗, 从而导致了边坡土体强度减小, 再次降雨时极易引起边坡滑坡。

(4) 降雨与库水位共同作用下近坝库岸滑坡有效应力减小, 使得库水位以下边坡土体的抗剪强度减小, 同时, 库水位作用使得边坡产生沉降和裂缝, 裂缝位置为边坡高度的  $1/3$  处; 另外, 在降雨入渗作用下边坡产生了滑坡, 边坡的滑坡是由降雨和库水位共同作用引起。

(5) 库水位以下边坡土体水分入渗充分, 边坡内部孔隙水压力较大, 近坝库岸边坡易产生滑坡且滑坡规模较大, 降雨与库水位共同作用下边坡滑坡属于浅层牵引式滑坡。

## 参考文献:

[1] AU S W C. Rain-induced slope instability in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1998, **51**(1): 1 - 36.

[2] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征: 基于全国县市地质灾害调查调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, **15**(2): 29 - 34. (LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China-based on the results of geo-hazard

survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, **15**(2): 29 - 34. (in Chinese))

[3] 李焯芬, 陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 1997(4): 34 - 38. (LI Zhuo-feng, CHEN Hong. Rainwater infiltration and Hong Kong landslide disaster[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997(4): 34 - 38. (in Chinese))

[4] 常晓军, 王德伟, 唐业旗. 中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, **30**(1): 98 - 102. (CHANG Xiao-jun, WANG De-wei, TANG Ye-qi. Simulation experiments of the rainfall-induced landslides in China insights and foresights[J]. Sed in Entary Geology and Tethyan Geology, 2010, **30**(1): 98 - 102. (in Chinese))

[5] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto: Canadian Geotechnical Society, 1984: 377 - 384.

[6] BRAND E W. Slope instability in tropical areas[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides. Christchurch, New Zealand: A A Balkema, 1992: 2031 - 2051.

[7] PITTS J. An investigation of slope stability on the NTI campus, Singapore[R]. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1985.

[8] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. Engineering Geology, 2004, **73**(3): 247 - 265.

[9] 中村浩之. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, **10**(1): 53 - 64. (NAKAMURA Hiroshi. Discuss reservoir landslides [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, **10**(1): 53 - 64. (in Chinese))

[10] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(11): 2476 - 2483. (LUO Xian-qi, LIU De-fu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(11): 2476 - 2483. (in Chinese))

[11] 李卓, 何勇军, 李宏恩, 等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, **44**(5): 400 - 405. (LI Zhuo, HE Yong-jun, Li Hong-en, et al. Model test on slope landslides under antecedent rainfall[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, **44**(5): 400 -

405. (in Chinese))
- [12] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2089 - 2095. (HU Xiu-wen, TANG Hui-ming, LIU You-rong. Physical model studies on stability of Zhaoshuling Landslide in area of Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(11): 2476 - 2483. (in Chinese))
- [13] 赵代鹏, 王世梅, 谈云志, 等. 库水升降作用下浮托减重型滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 1017 - 1024. (ZHAO Dai-peng, WANG Shi-mei, TAN Yun-zhi, et al. Stability studies of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 1017 - 1024. (in Chinese))
- [14] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **28**(9): 1798 - 1803. (JIA Guan-wei, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **28**(9): 1798 - 1803. (in Chinese))
- [15] 刘新喜, 夏元友, 张显书, 等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(8): 1439 - 1444. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, ZHANG Xian-shu, et al. Effects of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(8): 1439 - 1444. (in Chinese))
- [16] 郑颖人, 唐晓松. 库水位作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1115 - 1121. (ZHENG Yin-ren, TANG Xiao-song. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1115 - 1121. (in Chinese))
- [17] 卢书强, 易庆林, 易 武, 等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(4): 1123 - 1130. (LU Shu-qiang, YI Qing-lin, YI Wu, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Mechanics, 2014, **35**(4): 1123 - 1130. (in Chinese))