

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.014

# 库水位升降作用下土质岸坡变形特征实验研究

梁学战<sup>1,2</sup>, 赵先涛<sup>2</sup>, 向杰<sup>2</sup>, 陈鑫<sup>2</sup>, 唐红梅<sup>2</sup>

(1. 湖北文理学院 建筑工程学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:**库水位升降作用下三峡库区土质岸坡坡体吸水、应力集中及滑移变形, 形成不同时段和不同空间部位的裂缝体系。通过模型试验的方法, 分析了土质岸坡在一个蓄水降水循环周期内裂缝体系的时空演化分期配套规律。试验结果表明: 蓄水初期, 裂缝主要出现在岸坡前缘水位线附近, 且出现频率高、规模逐渐增大, 岸坡出现局部坍塌破坏; 蓄水中期, 岸坡前后缘均有裂缝出现, 但出现频率低、规模减小; 蓄水后期, 前缘裂缝发育基本消失, 后缘裂缝继续发育, 岸坡以沿滑动面整体蠕滑为主; 水位上升过程中暂停蓄水时裂缝发展缓慢。降水阶段, 拉张裂缝主要出现在岸坡坡体后缘, 初期降水裂缝出现频率较低, 发展缓慢; 后期降水裂缝出现频率、规模变大, 产生下座变形及下错台坎; 水位下降阶段岸坡沿滑动面发生整体缓慢蠕滑。

**关键词:**岩土力学; 库水位升降; 模型试验; 土质岸坡; 变形特征

**中图分类号:** P642.22   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1674-4764(2014)01-0092-09

## Experimental Analysis of Deformation Characteristic for Soil Bank Slope Under Reservoir Water Level Fluctuation

Liang Xuezhan<sup>1,2</sup>, Zhao Xiantao<sup>2</sup>, Xiang Jie<sup>2</sup>, Chen Xin<sup>2</sup>, Tang Hongmei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, Hubei, P. R. China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** Under reservoir water level fluctuation, soil bank slope water sucking, stress concentration and slip deformation in Three Gorges Reservoir area form slope cracks system at different periods and different spatial parts. In this study, laws of cracks spatial evolution in different deformation periods for soil bank slope were analyzed during a water cycle of impoundment and decline by model test. The test results indicated that, in the initial impoundment period, cracks appeared near the water line at the bank slope leading edge with high appearance frequency, and scale increased gradually and partial bank slope collapsed and damaged. In the middle impoundment period, cracks appeared in the front and trailing edges of bank slope, the frequency of occurrence and the scale of which decreased. And in the late impoundment period, the leading edge of the cracks development disappeared, the trailing edge of the cracks continued to develop and the bank slope crept along the sliding surface as a whole. Cracks expanded slowly in the pause impoundment as the water level raised. In the water level decline stage, tensile cracks mainly occurred in the back edges of bank slope. In the early water level decline, cracks appeared in low frequency and it grew slowly. In the late water level decline, cracks appeared in high frequency and large scale, and where the bank slope produced lower seat deformation and dislocated berm. Moreover, in water level decline stage, bank slope crept along the sliding surface as a whole.

收稿日期: 2012-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(41071017)

作者简介: 梁学战(1978-), 男, 博士, 主要从事工程结构地质安全与岩土减灾研究, (E-mail) xuezhan605@163.com。

**Key words:** rock and soil mechanics; reservoir water level fluctuation; model test; soil bank slope; deformation characteristic

三峡水库蓄水以来,库区失稳岸坡在数量和方量都有增多的趋势,如不能对岸坡的变形做出准确的判断并采取相应的防治措施,将会造不可估量的损失。库区岸坡在库水位周期性升降作用下,要经历一个较长的变形发展演化过程,且变形在时间和空间变化有一定的规律<sup>[1]</sup>。目前,对边坡变形的研究,很多学者在现场监测数据分析和模型试验方面做了大量的工作<sup>[2-17]</sup>,胡显明等<sup>[3]</sup>通过三峡库区一复活型库岸边坡监测数据的理论分析,表明其运动轨迹具有分形特征;Greif等<sup>[5]</sup>把 ERS 和 ENVISAT 传感器获取的合成雷达数据用于斯洛伐克中部山体滑坡变形的量测,此过程精确识别滑坡滑动后坡体位移量和边界。陈洪凯等<sup>[12]</sup>以重庆库区江津艾坪山滑坡为原型,采取几何相似、物理近似相似的半定量试验模型,分析了松散土体滑坡吸水、蠕变过程、强度衰减及滑移启动的宏观趋势。罗先启等<sup>[16]</sup>针对自动网格法用于大型滑坡模型试验位移测量时所存在的问题提出了解决措施,并以三峡库区石榴树包滑坡模型试验为例,分析了库岸边坡在不同水位运行工况下的位移规律。李邵军等<sup>[18]</sup>通过离心模型试验,模拟了库岸边坡在水位升降作用下的失稳过程,得到了库岸边坡的破坏模式和裂缝的变形演化过程。现有对岸坡变形的研究大多是对观测点位移量变化的理论和试验分析,但在坡体不同部位,不同变形阶段会产生拉应力、压应力、剪应力等局部应力集中,并在相应部位产生与其力学性质对应的裂缝。同时,这些裂缝还会在时间和空间上表现出不同的分布变形特性,而岸坡变形中坡面裂缝随时间和空间的变化无法精确量测,研究较少。

本文通过模型试验的方法,对试验模型坡面新生裂缝进行现场量测,分析库区土质岸坡在库水位周期性升降作用下坡体裂缝的时间、空间演化分期配套规律,为三峡库区土质岸坡的分期分区治理提供依据。

## 1 模型试验

### 1.1 试验目的

建立三维地质试验模型,通过观测土质岸坡在水位升降过程中新生拉张裂缝随时间变化出现的频率与规模大小,以及在库水位升降作用下坡面新生裂缝纵向和横向的空间发展过程,揭示土质岸坡在库水位周期性升降作用下表面拉张裂缝的时间、空

间演化分期配套规律。

### 1.2 模型相似比

试验模型根据相似原理,结合土质岸坡的工程地质条件和地质作用因素,模型采用的主要参数相似条件有模型几何尺寸相似、物理力学性质相似、渗透性相似以及蓄水时间相似。

1)根据岸坡原型尺寸和实验条件取几何相似系数  $\lambda_l = 25$ 。

2)物理力学性质相似系数:为得到与岸坡原型较一致的结果,在进行 2 次小型模型试验的基础上,坡体容重相似系数、坡体内摩擦角和粘聚力相似系数分别为  $\lambda_\gamma = 1$ 、 $\lambda_\varphi = 1$  和  $\lambda_c = 1$ ;为缩短试验时间,渗透系数相似系数  $\lambda_k = 0.1$ 。

3)蓄水时间相似,根据几何相似和渗透系数相似:  

$$\lambda_{vs} = \lambda_k \cdot \lambda_g = \lambda_k (\lambda_h / \lambda_l) = 0.1(25/25) = 0.1$$
 (1)

$$\lambda_t = \lambda_l / \lambda_{vs} = 25 / 0.1 = 250$$
 (2)

式中,  $\lambda_{vs}$  为渗透流速相似系数;  $\lambda_g$  为水力梯度相似系数;  $\lambda_h$  为水头相似系数;  $\lambda_t$  为时间相似系数。

### 1.3 模型设计

以库区某土质岸坡为原型,根据其原始尺寸,模型槽尺寸确定为 4.39 m(长)×2.86 m(宽)×2.22 m(高)。设计模型几何相似比为  $\lambda_l = 1:25$ ,则模型尺寸为 3.03 m(长)×2.86 m(宽)×2.22 m(后缘高)。基岩平均坡角为  $31^\circ$ ,为增大土与基岩间的摩擦作用,采用块石堆砌,粗骨料砂浆抹面,防渗漏。模型坡体铺筑土层平均厚 41 cm,其中坡体前缘厚度 45 cm,后缘厚度 20 cm,坡体平均坡角为  $49^\circ$ , (见图 1)。在土层铺筑过程中,分层压密,在不同压力下经过反复配比重塑,在满足容重、渗透系数、抗剪强度等主要参数相似要求情况下,现场取土进行土工实验,得到物理力学参数(表 1)。

表 1 坡体材料物理力学参数

含水量/ %	空隙比	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	粘聚力 $C$ / kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
15.58	0.82	16.76	$2.21 \times 10^{-6}$	16.83	17.6

试验以三峡水库实际蓄水状况,水位从 145 m 蓄水至 175 m,按模型的几何相似比以及坡体材料的物理力学参数,模型正常水位变幅为  $30/\lambda_l = 30/25 = 1.2 \text{ m} = 120 \text{ cm}$ ,基本对应实际 145~175m 库水位变化(图 1)。在模型槽前部左右两侧对应位置用彩色

绘图笔标注试验水位及相应的水库实际水位。

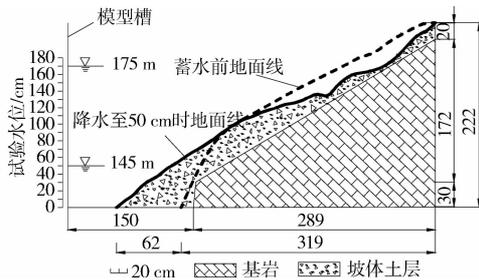


图 1 土质岸坡实验模型(图中几何尺寸单位:cm)

#### 1.4 观测方法

为探讨三峡水库正常水位变幅前蓄水对岸坡变形的影响,实验从岸坡坡脚实验水位 0 开始蓄水。

蓄水前,在模型上部顺岸坡纵向搭设水平扶梯,用一卷尺与扶梯处于同一水平位置,在卷尺上每隔 5 cm 用铅垂量测岸坡纵向中部纵断面坡面点的垂直高度,用于绘制蓄水前岸坡中部的纵剖面图。

试验中,用卷尺、直尺和铅锤现场组合量测水位升降过程中不同阶段新生裂缝的宽度、长度、深度以及裂缝出现的位置,用秒表记录新生裂缝出现的时间,并对新生裂缝出现时模型槽前部标注的试验水位和实际水位进行读数。同时,在新生裂缝产生及坡体局部坍塌时用数码相机进行实时拍照,并用数码相机进行全程拍摄,以供在室内分析时校核现场的量测结果。

降水到试验水位 50 cm 时,再量测岸坡纵向中部纵断面坡面点的垂直高度,用于绘制一个水位变幅后岸坡的纵剖面图。

#### 1.5 观测时间

根据三峡水库的蓄水降水周期为 1 a 和时间相似系数  $\lambda_t = 250$ ,本模型的一个蓄水、降水变化周期确定为 29.5 h,从 2012 年 7 月 30 日早上 6:30 至 2012 年 7 月 31 日中午 12:00。试验过程划分为 0~50 cm 前期蓄水、50~120 cm 正常蓄水、120~170 cm 正常蓄水和 175~50 cm 降水 4 个阶段。

为反映三峡水库的实际蓄水、降水过程中岸坡变形特征以及在蓄水、降水过程中不同长时的暂停蓄水和放水对裂缝产生、扩展变化产生的影响,在试验蓄水、降水过程中,多次暂停蓄水和暂停降水;其中,蓄水过程中,在试验水位 50、120、148、170 cm 分别暂停蓄水,暂停时长分别为 2.5、1.5、2、8.5 h;降水过程中,因变形以整体蠕滑为主,在试验水位 120 cm 暂停放水,暂停时长为 1 h。模型试验时间过程如表 2。

表 2 模型试验时间过程

试验水位/ cm	实际水位 变化/m	蓄水降水时间/h
0→50	90.0→145.0	4.0(2012年7月30日6:30—10:30)
50→120	145.0→162.5	5.5(2012年7月30日10:30—16:00)
120→170	162.5→175.0	15.5(2012年7月30日16:00—31日7:30)
170→50	175.0→145.0	4.5(2012年7月31日7:30—12:00)

## 2 模型岸坡表面拉张裂缝的时空变化特性

### 2.1 水位升降作用下模型岸坡表面新生裂缝时空分布

为分析岸坡表面新生拉张裂缝的时空变化特性,把水位升降过程中不同时间点出现的新生裂缝在实验模型平面图中进行标注,主要标注水位上升过程中新生裂缝出现的时间顺序和裂缝长度,如图 2 所示。

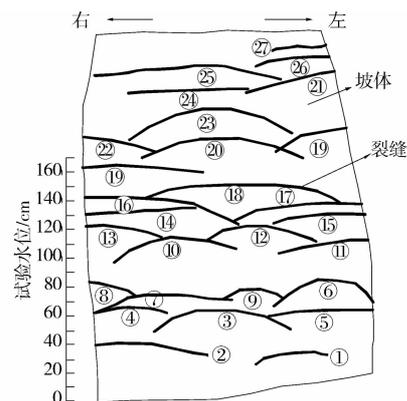


图 2 水位上升过程中新生裂缝平面简图

### 2.2 岸坡表面拉张裂缝时间分布特征

以时间为横坐标,蓄水、降水过程中坡体新生裂缝长度与水位变化为纵坐标,根据不同时间的水位变化与裂缝规模(裂缝长度、宽度、深度)的关系(表 3~6,图 2~6),分析水位升降过程中不同阶段新生裂缝随时间出现的频率与规模大小的变化规律。

1)前期蓄水(0~50 cm)坡面裂缝随蓄水时间变化特征

为说明岸坡低水位时受蓄水浸泡影响的程度,实验从实验水位 0 cm 起开始蓄水。从图 3 及表 3 看出,7 月 30 日 6:00—10:30 在 0~50 cm 的蓄水阶段及 50 cm 暂停蓄水阶段均有裂缝产生,且裂缝的时间分配在两个阶段都比较均匀,裂缝的规模(长度、宽度及深度)随库水位升高逐渐变大,暂停蓄水后规模逐渐减小。

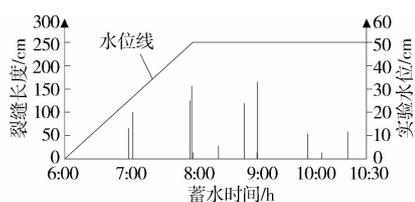


图 3 7月30日0~50 cm水位上升阶段裂缝变化规律

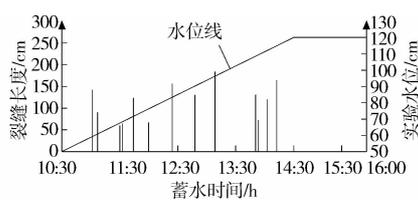


图 4 7月30日50~120 cm水位上升阶段裂缝变化规律

表 3 模型实验 7月30日0~50 cm蓄水阶段坡面裂缝发展演化记录

蓄水范围/ cm	试验水位/ cm	实际水位/ m	蓄水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	0	132	6:30		
	15	136	7:00	①岸坡底部出现裂缝,且裂缝不断扩展变深。	长度:66.0 深度:5~6
	28	140	7:10	②底部右侧出现裂缝,下部形成滑体,裂缝扩展,滑体滑动,岸坡坡脚局部滑落。	长度:100.0 深度:10~12
	45	144	7:54	③在岸坡前部出现弧形裂缝,裂缝扩展,约 2 min 后,裂缝前部滑体塌落。	长度:185.0 深度:5~6
	50	145	7:57	④弧形裂缝左侧,出现延伸到左侧边界的裂缝,在约 1.5 min 后裂缝下部滑体塌落。	长度:156.0 深度:18~30
0~50	50	145	7:57	蓄水实际水位到达 145 m,暂停蓄水。	
	50	145	8:00	随库水入渗,水位线附近坡体继续坍塌。	
	50	145	8:25	⑤中部弧形裂缝右侧出现裂缝,约 1 min 后裂缝下部坡体发生塌落。	长度:28.0 深度:15~18
	50	145	8:46	⑥岸坡左侧形成弧形裂缝。	长度:119.5 深度:33
	50	145	9:01	⑦岸坡前缘右侧出现横向裂缝,贯通到右侧边界,贯通后前部滑体发生蠕滑,约 1 h 后其前部滑体塌落。	长度:165.0 深度:34
	50	145	9:46	⑧右侧出现裂缝。	长度:54.0 深度:18
	50	145	10:22	⑨中部出现弧形裂缝,前部滑体迅速塌落。	长度:58.0 深度:22~28
	50	145		暂停蓄水 2.5 h 后,岸坡无新裂缝产生。	

2)50~120 cm 正常蓄水坡面裂缝随蓄水时间变化特征

7月30日10:30从实验水位50 cm再次蓄水,开始模拟三峡水库实际库水位145~175 m正常运营时对岸坡的影响。由图4和表4看出,实验水位

50 cm再次蓄水后,随着水位升高,岸坡新生裂缝出现的频率变快,裂缝规模(长度、深度、宽度)较前期蓄水变大,扩展变形及裂缝前缘坍塌速度加快。蓄水至120 cm暂停蓄水后,岸坡无新裂缝产生,只是蓄水阶段产生的新裂缝贯通,且贯通裂缝无明显位移。

表 4 模型试验 7月30日50~120 cm蓄水阶段坡面裂缝发展演化记录

蓄水范围/ cm	实验水位/ cm	实际水位/ m	蓄水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	50.0	145.0	10:30	开始蓄水。	
	58.0	147.0	11:04	⑩前缘中部产生裂缝,扩展较快,且与10:22水位50 cm时产生的裂缝贯通,	长度:142.0 深度:26~28
	58.1	147.1	11:08	⑪前缘左侧出现横向裂缝,裂缝扩展较快。	长度:90.0 深度:29~33
50~120	58.3	147.2	11:13	裂缝贯通,局部裂缝下部发生坍塌,左侧裂缝变宽。	
	67.3	149.3	11:30	⑫中部出现裂缝后,裂缝前部立即坍塌。	长度:60.0 深度:23~30
	67.5	149.4	11:34	⑬前缘右侧出现裂缝。	长度:64.0 深度:30~32
	70.5	150.1	11:45	⑭前缘右侧出现裂缝,规模较大,裂缝扩展变宽速度较前面出现的裂缝快。	长度:123.0 深度:24~34

续表 4

蓄水范围/ cm	实验水位/ cm	实际水位/ m	蓄水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	80.0	152.5	12:08	⑮前缘左侧出现裂缝。	长度:67.0 深度:20~24
	85.0	153.8	12:24	⑯前缘中部及右侧形成一条规模较大的裂缝,中部裂缝变宽速度较大,形成的滑体较长,滑体中部形成次生裂缝,中部滑体首先发生坍塌,而后右侧滑体坍塌。	长度:156.0 深度:28~33
	94.0	156.0	12:39	⑰前缘左侧出现一条裂缝,规模较大,岸坡中部的发展较快,左侧较慢;随着岸坡厚度的增大,出现的裂缝不断变深,变宽,前部滑体的坍塌时间变长,在裂缝张开过程中,裂缝两侧的土体塌落于张开的裂缝中。	长度:130.0 深度:26~30
	99.5	157.4	13:20	⑱前缘中部出现较长裂缝,规模相对较小,裂缝开裂变宽,速度较快。	长度:184.0 深度:20~26
	106.0	159.0	13:52	⑲前缘右侧出现裂缝,裂缝前部滑体规模较大,同一水平左侧稍右侧后也形成裂缝,滑体规模亦较大,滑体宽度约 35 cm。	右侧长度:31.0 右侧深度:25 左侧长度:72.0 左侧深度:28
	115.5	161.4	14:05	⑳前缘中部出现弧形裂缝,在 13:52 形成的左右裂缝之间,裂缝前部滑体规模较大,最大宽度约 50 cm。	长度:120.0 深度:35
	119.0	162.3	14:13	㉑在滑体中后缘出现一条细小裂缝,模型后缘约 62 cm,长度约 100 cm。	长度:100.0 深度:33
	120.0	162.5	14:30	蓄水至实际库水位 145 m,暂停蓄水。	
	120.0	162.5	14:38	中部裂缝与两侧裂缝贯通,贯通裂缝无明显位移。	

3)120~170 cm 正常蓄水坡面裂缝随蓄水时间变化特征

7月30日16:30从试验水位120cm再次蓄水后,由图5和表5看出,岸坡新生裂缝出现频率开始降低,裂缝规模逐渐减小,裂缝的扩展变形速率变慢,7月30日16:30-20:40在148cm暂停蓄水、7月30日23:00-7月31日7:30在170cm水位到达最高水位停止蓄水时,基本无新裂缝出现。说明在水位上升到试验水位120cm以后,坡体的变形逐渐减小,暂停蓄水后,变形基本消失。

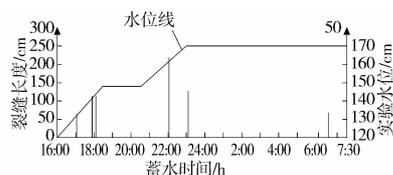


图5 7月30-31日120~170cm水位上升阶段裂缝变化规律

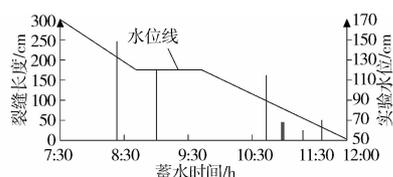


图6 7月31日170~50cm水位下降阶段裂缝变化规律

表5 模型试验7月30-31日120~170cm蓄水阶段坡面裂缝发展演化记录

蓄水范围/ cm	实验水位/ cm	实际水位/ m	蓄水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	120.0	162.5	16:00	开始蓄水。	
	122.8	163.2	16:13	蓄水后贯通裂缝宽度变大,裂缝前部滑体下滑加速。	
	126.7	164.2	16:27	水位上升造成贯通裂缝前缘滑体局部塌落(左侧)。	
	134.0	166.0	17:10	㉒前缘右侧出现裂缝,裂缝发展缓慢。	长度:65.0 深度:14~26
120~148	139.0	167.3	17:50	㉓岸坡前缘出现弧形裂缝,裂缝发展较慢,且向左扩展,与早先形成的前部裂缝贯通,而且与14:13形成后缘拉张裂缝相交贯通,三条裂缝交于一点。	长度:113.0 深度:12~16
	147.0	169.3	18:13	㉔后缘产生一条114 cm长的细小裂缝,与10:13形成的后缘裂缝贯通。	长度:114.0
	148.0	169.5	18:30	暂停蓄水。	

续表 5

蓄水范围/ cm	实验水位/ cm	实际水位/ m	蓄水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	148.0	169.5	20:30	开始蓄水。	
	151.5	170.4	21:29	后缘 114 cm 的细小裂缝张开宽度加大。	
	158.0	172.0	22:02	⑤在已经贯通的裂缝后缘形成一条约 218 cm 长的裂缝。	长度:218.0
148~170	170.0	175.0	23:00	暂停蓄水	
	170.0	175.0	23:18	⑥后缘出现一条竖向裂缝,与模型槽右侧边界相距 62~71 cm,并与后缘相交。	长度:126.5
	170.0	175.0	6:30	⑦后缘产生一条交与坐标原点长约 68 cm 的细小裂缝。在实际蓄水位停滞在最高水位 175 m 的其它时间,岸坡无明显变化。	长度:68.0

4)170~50 cm 降水阶段坡面裂缝随蓄水时间变化特征

7 月 31 日 7:30 开始降水,在试验水位 170~50 cm 下降阶段,由图 6 和表 6,岸坡新生裂缝以后缘裂缝为主,初期降水(170~120 cm)土质岸坡裂缝

的出现频率较低,后期降水(120~50 cm)裂缝出现频率增大。降水过程中模型两侧坡体与墙面有明显整体摩擦痕迹(图 7),说明土质岸坡在库水位下降过程中,坡体沿着滑面以整体蠕滑为主,且初期降水蠕滑速度较慢,后期降水整体蠕滑速度较快。

表 6 模型试验 7 月 31 日 170~50 cm 降水阶段坡面裂缝发展演化记录

降水范围/ cm	试验水位/ cm	实际水位/ m	降水时间	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度及深度/cm
	170.0	175.0	7:30	开始降水	
	134.4	166.1	8:27	⑧水位下降过程中,岸坡后缘产生较长裂缝,裂缝发展缓慢,裂缝前部不同位置出现不同长度的细小裂缝。	长度:246.0
170~120	134.4~ 120.0	166.1~ 162.5	8:27~ 8:45	裂缝前部细小裂缝增多。	
	120.0	162.5	8:45	暂停降水	
	120.0	162.5	9:00	⑨岸坡后缘继续产生较大裂缝,裂缝宽度 3~5 cm,后缘裂缝张开变宽,局部发生坍塌。	长度:174.0
	120.0	162.5	9:45	继续降水	
	96.0	156.5	10:43	⑩水位下降过程中,出现新的裂缝,并伴随分支裂缝,在岸坡中部产生 20 cm 宽的台阶。	长度:162.0
120~50	84.0	153.5	11:00	⑪在岸坡中前部产生细小的平行拉张裂缝,	长度:45.0
	80.0	152.5	11:16	⑫岸坡中部的细小裂缝贯通,形成长约 35 cm 的裂缝,此裂缝下部产生一条 25 cm 长的裂缝,两条裂缝在左侧相交。在两条裂缝的下部产生羽状裂隙。	长度:35.0
	52.0	145.5	11:40	在水位线以上边界附近产生拉张裂缝。	

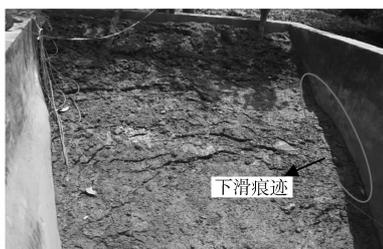


图 7 试验水位下降至 50 cm 岸坡模型

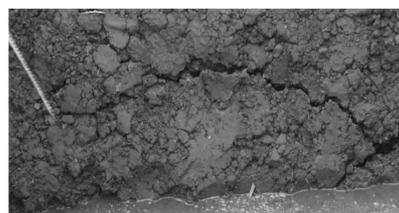


图 8 局部横向裂缝

### 2.3 岸坡坡体表面裂缝的空间分布特征

#### 1) 裂缝横向分布变化特征

试验中,随着水位从土质岸坡坡脚开始蓄水上

升,岸坡土体受到库水浸泡,部分水体入渗到坡体内,遇水坡体软化,造成土质岸坡坡脚处局部应力集中,局部应力集中区首先发生局部变形,局部新生横向裂缝孕育产生(图 8),在水位不断升高过程中,位

于同一水平带局部新生横向裂缝继续产生。随着局部横向裂缝的扩展变化,形成与局部横向裂缝同一水平带内的较长的新生弧形裂缝(图 9)。随着水位继续升高,在靠近水位线附近,以先形成局部横向裂缝、后形成同一水平带内的弧形裂缝的变形方式重复出现(弧形裂缝或者是先形成的局部横向裂缝扩展贯通形成,或者是同一水平带内局部横向裂缝错落形成)。



图 9 弧形裂缝

## 2) 裂缝纵向分布变化特征

蓄水阶段,模型设计时,坡体前缘设计坡度较陡,临空面条件较好。水位从坡脚试验水位 0 cm 附近开始蓄水上升,在坡体前缘水位线附近坡体浸水软化,拉应力集中,并产生向临空方向的拉裂-错落变形,出现横向拉张裂缝(图 8)。随着水位不断升高,前缘横向裂缝变长、加宽、加深,逐渐形成控制性弧形拉张裂缝,水位继续升高,控制性弧形裂缝前缘局部发生坍塌(图 10),坍塌部分向水下转移,其后缘土体形成新的临空条件,形成第二次土体变形→横向裂缝→控制性弧形裂缝→坍塌变形过程,此后随着水位的上升,在岸坡水位线附近坡体变形发展依此过程继续进行。但从水位上升到试验水位接近 120 cm 开始,在坡体后缘出现拉张裂缝(图 11),此时,坡体前缘水位线附近产生变形、坍塌运动形式减弱。在水位到达 148 cm 以后,水位线附近坡前裂缝基本停止发育,后缘裂缝张开位移加大,同一水平带的后缘横向裂缝逐渐贯通(图 12),此时岸坡以整体向下蠕滑为主。

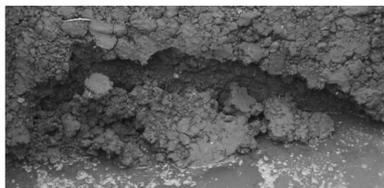


图 10 弧形裂缝前缘土体坍塌

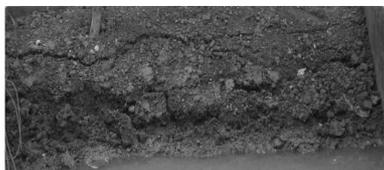


图 11 后缘裂缝



图 12 试验水位上升至 170 cm 岸坡模型

放水阶段,后缘裂缝继续发展。随着水位的逐渐下降,坡体后缘裂缝扩展,产生分支裂缝,坡体边缘形成羽状裂缝,并有新裂缝产生,但裂缝发展缓慢。在后缘拉张变形发展的同时,下座变形也同步进行,当变形达到一定程度后,在水位下降到 96 cm 时在滑坡体后缘形成弧形拉张裂缝和 20 cm 宽的下错台坎。在水位下降过程中,岸坡两侧与试验边槽墙体出现明显的滑动擦痕,在水位降到 50 cm 时,从岸坡坡面可以看到岸坡形成的多级下错台阶(图 1、图 7)。

## 3 库水位升降作用下坡面裂缝时空演化分期配套规律

### 3.1 库水位上升阶段坡面裂缝的时空分期配套规律

蓄水过程中,试验水位上升到 120 cm 以前,空间分布岸坡前缘水位线附近控制性弧形裂缝出现,时间分布产生较大频率的横向裂缝及弧形裂缝,往往预示着岸坡水位线附近局部变形速率较快,控制性弧形裂缝前缘土体滑动坍塌频率较大。在水位 120~148 cm 时,空间分布表现出岸坡前后缘均有裂缝出现,时间分布前缘新生裂缝出现的频率逐渐减小,水位线附近发生变形坍塌的时间间隔变长,后缘裂缝出现的频率逐渐增大。水位 148~170 cm 时,空间分布岸坡前缘水位线附近新生裂缝发育基本消失,后缘裂缝继续发育扩展;时间分布后缘裂缝贯通规模扩大且有新裂缝产生,此时岸坡变形以沿滑动面整体缓慢蠕滑为主。在整个水位上升阶段暂停蓄水时岸坡裂缝的时空变形均较小,不易发生局部坍塌。

### 3.2 库水位下降阶段坡面裂缝的时空分期配套规律

试验水位 170~50 cm 下降过程中,初期降水,空间分布新生拉张裂缝主要出现在岸坡坡体后缘,时间分布后缘拉张裂缝出现频率较低,发展缓慢;后期降水,空间分布拉张裂缝贯通规模扩大,产生下座变形,中后部出现下错台坎,时间分布后缘新生裂缝出现频率增大;暂停降水时后缘新生裂缝产生频率较低,裂缝扩展变形量较小。水位下降阶段岸坡沿滑动面发生整体缓慢蠕滑。

## 4 结论

1)在水位上升过程中,土质岸坡新生裂缝横向分布变化以先形成局部横向裂缝、后形成同一水平带内的控制性弧形裂缝的变形方式在水位线附近重复出现,新生裂缝纵向分布变化以土体变形→横向裂缝→控制性弧形裂缝→坍塌的变形过程随着水位上升在水位线附近重复出现。水位下降阶段,岸坡的空间变形表现为后缘出现拉张裂缝以及沿滑动面发生整体缓慢蠕滑。

2)在前期蓄水(0~50 cm)及正常蓄水阶段的蓄水初期(50~120 cm),裂缝主要出现在岸坡前缘水位线附近,且出现频率、规模逐渐增大,岸坡以前部坍塌为主;正常蓄水阶段的蓄水中期(120~148 cm)岸坡前后缘均有裂缝出现,但前缘裂缝频率、规模逐渐减小,后缘裂缝频率规模逐渐增大;正常蓄水阶段的蓄水后期(148~170 cm)前缘裂缝发育基本消失,后缘裂缝继续发育,岸坡变形以沿滑动面整体蠕滑为主;水位上升过程中暂停蓄水时裂缝发展缓慢。降水阶段拉张裂缝主要出现在岸坡坡体后缘,初期降水(170~120 cm)裂缝出现频率较低,发展缓慢;后期降水(120~50 cm)裂缝出现频率规模变大,产生下座变形及下错台坎;水位下降阶段岸坡沿滑动面发生整体缓慢蠕滑。

3)在库水位升降过程中,岸坡不同时段和不同空间部位的新生裂缝体系不同,判别岸坡局部失稳或整体滑动,应根据新生裂缝的空间和时间变化特性,以及库水位周期性变化阶段综合分析确定,并以此采取相应的岸坡分期分区治理措施。

4)进一步的研究将以试验成果为基础,对坡体的变形进行相应的数值分析和验证;一次性的模型试验结果与试验模拟的岸坡原型变形特征基本一致,也可以为其他工程岸坡提供借鉴,要将模型试验的结果推广应用到其他工程岸坡,应进行多组不同参数不同相似系数岸坡变形的模型试验,找出其对应规律。

### 参考文献:

- [1] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 27(6): 1103-1112.  
Xu Q, Tang M G, Xu K X, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 27(6): 1103-1112.
- [2] McKean J, Roering J. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry [J]. *Geomorphology*, 2004, 57(3/4): 331-351.
- [3] 胡显明,晏鄂川,周瑜,等. 滑坡监测点运动轨迹的分形特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 570-576.  
Hu X M, Yan E C, Zhou Y, et al. Fractal characteristics of landslide monitoring point movement trace and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 570-576.
- [4] 王明华,晏鄂川. 水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2722-2725.  
Wang M H, Yan E C. Study on influence of reservoir water impounding on reservoir landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(12): 2722-2725.
- [5] Greif V, Vlcko J. Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1585-1595.
- [6] 张婷婷,晏鄂川,胡显明,等. 基于因子分析法的滑坡变形分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 21-25.  
Zhang T T, Yan E C, Hu X M, et al. Landslide deformation analysis based on factor analysis [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(4): 21-25.
- [7] Strozzi T, Farina P, Corsini A. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry [J]. *Landslides*, 2005, 2(3): 193-201.
- [8] 胡新丽,唐辉明,李长冬,等. 基于参数反演的保扎滑坡变形破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 795-801.  
Hu X L, Tang H M, Li C D, et al. Deformation mechanism of baozha landslide with parametric back analysis[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(6): 795-801.
- [9] Colesanti C, Crosta G B, Ferretti A, et al. Monitoring and assessing the state of activity of slope instabilities by the permanent scatterers technique [J]. *Landslides from Massive Rock Slope Failure*, 2006, 49(3): 175-194.
- [10] 乐琪浪,王洪德,薛星桥,等. 三峡库区水位变化与花园养鸡厂滑坡变形特征关系[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 68-73.  
Le Q L, Wang H D, Xue X Q, et al. Relationship between the deformation features of the Huayuan Yangjichang landslide and water level changes in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 68-73.

- [11] Pradhan B, Lee S. Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia [J]. *Landslides*, 2010, 7(1):13-30.
- [12] 陈洪凯,唐红梅. 散体滑坡室内启动模型试验[J]. *山地学报*, 2002, 20(1):112-115.  
Chen H K, Tang H M. Research on start-up of loose landslide in lab[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1):112-115.
- [13] Lai X L, Wang S M, Qin H B, et al. Unsaturated creep tests and empirical models for sliding zone soils of Qianjiangping landslide in the Three Gorges[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(2):149-154.
- [14] 刘祖强,张正禄,杨奇儒,等. 三峡工程近坝库岸滑坡变形监测方法试验研究[J]. *工程地球物理学报*, 2008, 5(3):351-355.  
Liu Z Q, Zhang Z L, Yang Q R, et al. Study on monitoring methods of landslide deformation near the dam reservoir bank [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2008, 5(3):351-355.
- [15] 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 X W, Tang H M, Liu Y R. Physical model studies on stability of Zhaoshuling landslide in area of Three Gorges reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12):2089-2095.
- [16] 罗先启,陈海玉,沈辉,等. 自动网格法在大型滑坡模型试验位移测试中的应用[J]. *岩土力学*, 2005, 26(2):231-238.  
Luo X Q, Chen H Y, Shen H, et al. Application of automatic mesh methods to landslide model test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2):231-238.
- [17] 邓宏艳,王成华. 非线性组合模型在库岸边坡地下水预测中的应用[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(1):31-35.  
Deng H Y, Wang C H. Prediction of groundwater level for reservoir slope with nonlinear-combined model[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(1):31-35.
- [18] 李邵军, Knappett J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8):1586-1593.  
Li S J, Knappett J A, Feng X T. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8):1586-1593.

(编辑 吕建斌)

(上接第 73 页)

- [13] Venugopal V, Varyani K S, Westlake P C. Drag and inertia coefficients for horizontally submerged rectangular cylinders in waves and currents [J]. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2009, 223(1):121-136.
- [14] 张海燕,赵文斌,唐友刚. 深水 Spar 平台主体波浪载荷计算[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2008, 38(3):508-512.  
Zhang H Y, Zhao W B, Tang Y G. Calculation of wave loads acting on a Spar hull in deep water [J]. *Periodical of Ocean University of China: Natural Science Edition*, 2008, 38(3):508-512.
- [15] 姜胜超,滕斌,宁德志,等. 波浪对淹没垂直圆柱绕射解析解[J]. *海洋工程*, 2010, 28(3):68-75.  
Jiang S C, Teng B, Ning D Z, et al. An analytical solution of wave diffraction by a submerged vertical cylinder [J]. *Journal of the Ocean Engineering*, 2010, 28(3):68-75.
- [16] 赖伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [17] Zheng Y H, Liu P F, Shen Y M, et al. On the radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long rectangular structure submerged in oblique seas [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34:436-450.
- [18] 王君杰,赖伟,胡世德. 深水高桩基础桥梁地震水动力效应分析[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(5):650-655.  
Wang J J, Lai W, Hu S D. Seismic hydrodynamics effects on group-pile foundations with caps merged in water [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(5):650-655.
- [19] 李玉成,滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 2 版. 北京:海洋出版社, 2002:50-60.

(编辑 王秀玲)