

库岸古滑坡离心模型试验研究

陈晓平¹, 黄井武^{1,2}, 吴宏伟³, 马少坤⁴

(1. 暨南大学理工学院, 广东 广州 510632; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510170;
3. 香港科技大学土木及环境工程系, 香港 中国; 4. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对一库岸古滑坡进行了水位骤降条件下失稳机制的离心模型试验。离心模型的制作考虑了原型边坡的大尺寸和非均质特征, 离心试验过程中进行了上下游水位的实时控制, 试验后进行了边坡土体物理特性和强度特性的对比试验。离心试验结果表明: 水库蓄水导致坡脚抗滑阻力降低, 坡体前缘出现裂缝并随着水位上升出现坡脚坍塌; 水位骤降坡体内产生向外的动水压力, 加剧坡脚滑动并形成牵引式滑坡趋势; 坡脚被加固后边坡变形情况得到明显改善, 滑动被阻止, 边坡整体稳定性提高。离心试验前后边坡土体的物理力学试验结果揭示: 坡脚滑动会造成坡体土密度和含水率重新分布, 并导致近滑动区土体强度特性改变、强度指标下降。另外, 水下土体随浸没时间增长黏聚力会降低直至消失。

关键词: 离心试验; 库岸古滑坡; 水库蓄水; 水位骤降

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)10-1496-08

作者简介: 陈晓平(1957-), 女, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 从事土力学及基础工程教学与研究。E-mail: chenxp@jnu.edu.cn.

Centrifugal model tests on ancient bank landslide

CHEN Xiao-ping¹, HUANG Jing-wu^{1,2}, NG C W W³, MA Shao-kun⁴

(1. College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510170, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: With regard to an ancient bank landslide near a dam, centrifugal model tests on instability mechanism under reservoir impoundment and rapid drawdown are carried out. The slope models are constructed with the consideration of large-size and heterogeneous characters of the prototype. The centrifuge tests are accompanied with real-time control of water levels, and followed by laboratorial test for physical status and strength of model slope soil. The results of centrifugal tests show that the rising water level in the reservoir leads to decreasing slope foot sliding resistance, as well as leads to edge cracks and slump. Also, the results reveal that the rapid drawdown causes slope body to produce outward hydrodynamic pressure, aggravates slope foot sliding and creates pull-typed landslide trends. When the slope foot is reinforced, the deformation is controlled and stability is improved. The soil tests of model slopes, before and after centrifuge tests, indicate that the slope foot sliding will lead to the redistribution of soil density and moisture, at the same time lead to the strength reduction near slide zone. Moreover, the cohesion of immersed soils will reduce until it vanishes finally.

Key words: centrifuge test; ancient bank landslide; reservoir impoundment; rapid drawdown

0 引言

库岸古滑坡失稳是大型蓄水工程可能诱发的灾害之一, 对此问题的研究伴随着工程的兴建与管理一直被高度重视, 物理模拟作为一种重要的研究手段具有独特的作用, 但也存在诸方面的不足。对于土(岩)这类非线性材料来说, 受力性状与应力水平有关, 物理模拟的前提是要保证应力水平与原型相同。

土工离心模型试验技术通过在模型上施加离心惯性力使模型材料的重度增大, 以此弥补模型缩尺带来的自重损失。根据牛顿重力与惯性力等效、材料的固有性质主要与电磁力有关的物理原理, 将 $1/n$ 倍原型

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072088); 广东省水利科技创新项目(YSK2009-01)

收稿日期: 2010-08-17

尺寸的实验模型置于 ng 离心重力场中时, 试验模型的自重将增大 n 倍, 如果模型采用与原型相同的材料, 模型中各点的应力水平将与原型中对应点的应力水平相同。所以, 离心模型试验是各类物理模型试验中相似性最好的模型试验, 特别是对于与自重有关的稳定性问题。

自 Bucky(1931)关于矿山工程的离心模型试验的论文发表以来, 土工离心模型试验在国内外获得了极大的发展和广泛的应用。针对边坡稳定性问题的研究可分为两大类: 一是实际边坡工程在某些条件下的稳定性^[1-3], 二是滑坡的机理分析和理论验证^[4-6]。毫无疑问, 国内近年来依托实际工程所进行的各类相关试验及取得的成果构成了离心模型试验从理论到实践的最有效支撑。

相对于其他边坡稳定性问题, 库岸古滑坡在水库蓄水及水位骤降条件下的稳定性试验需要在高速旋转的离心模型机上直接进行水位升降控制, 同时具有原型边坡尺寸大、剖面呈成层性并含软弱滑动面等特点, 试验难度大于一般边坡开挖、降雨入渗等常见模型。虽然已有学者对此进行了相应的研究, 如研制可以在离心机上使用的供排水装置系统^[7-8]、制作可以描述坡体内地下水位改变的边坡模型^[9]、以及针对具体工程进行的水位变动下的失稳试验等^[10-11], 但研究成果距离理论的完善和实际的应用来说还有一些未能很好解决的问题。

本文针对广东省某在建水利枢纽大坝上游一古滑坡的稳定性进行了离心模型试验研究, 该古滑坡具有下述3方面特征: ①尺寸大, 滑动体总高度200多米、底宽400多米; ②坡体地质钻孔揭示有明显的古滑动带; ③水库蓄水后坡体前缘将被淹没50多米深, 形成典型的涉水边坡。由于古滑坡距离大坝较近, 因而对于边坡滑动与否的判别及有效可行的控制直接影响大坝的兴建与运营。

1 离心模型设计

1.1 小比尺相似原理

根据相似性定律和量纲分析可知试验模型与原型除了材料的粒径不相似外, 其他描述试验的物理量都能与原型建立起对应关系, Fuglsang 总结出适用于一般离心模型试验的常用比尺关系如表 1 所示^[12]。其中重力比尺 $n = a/g$, a 为离心机加速度, g 为重力加速度。

当针对大尺寸的原型结构进行离心试验时, 离心试验会面临几何尺寸与离心机容量的矛盾, 这是目前存在于离心模型试验领域中的难题之一。虽然目前可

采用局部模型^[13]、小比尺模型外延和不等应力比尺^[14]、以及小比尺模拟(几何比尺 $n_s >$ 重力比尺 n)^[15]等方法来模拟, 但由于土体材料和实际边坡破坏中的非线性特征, 这些模拟方法并不具普适性。所以, 要针对大尺寸试验原型进行离心模型试验首先需进行离心模型的比尺相似验证, 以在满足离心机容量限制的前提下制作最能代表原型的模型, 使模型与原型有较好的相似率。

表 1 离心模型试验主要物理量相似比(模型/原型)

Table 1 Physical similarity ratios of centrifuge tests (model/prototype)

物理量	相似比	物理量	相似比	物理量	相似比
长度 L	$1/n$	饱和度 S_r	1	力 F	$1/n^2$
面积 A	$1/n^2$	渗透性 k	n	位移 s	n
土体密度 ρ	1	压缩性 E	1	应力 σ	1
加速度 a	n	层流时间 t_1	$1/n^2$	应变 ϵ	1
强度指标	1	惯性时间 t_2	$1/n$	孔隙比 e	1

文献[16]曾针对高坝采用理论推导和非线性有限元技术对小比尺离心模型 ($n_s/n=1, 2, 4$) 的相似理论进行了研究, 结果表明: 当 $n_s/n=2$ 时仍可采用线弹性相似理论, 此时模型与原型中物理量的比尺关系如表 2 所示; 当 $n_s/n=4$ 时位移的相似性仍基本服从线弹性律、应力的相似性除特殊区域(如心墙上下游反滤部分)外还可用线弹性律描述, 但此时屈服和破坏特性如果还按线弹性律考虑对高坝偏于危险。

表 2 小比尺离心模型试验主要物理量相似比(模型/原型)

Table 2 Physical similarity ratios of small-scaled centrifuge tests (model/prototype)

物理量	相似比	物理量	相似比	物理量	相似比
长度 L	$1/n_s$	渗透性 k	n/n_s	力 F	n/n_s^3
面积 A	$1/n_s^2$	强度指标	1	位移 s	n/n_s^2
加速度 a	n_s	层流时间 t_1	$1/n_s^2$	应力 σ	n/n_s
渗流速度 v	n/n_s	惯性时间 t_2	$1/n_s$	应变 ϵ	n/n_s

根据上述小比尺相似原理, 本文针对试验原型应用数值模拟技术分别验证了局部模型法和小比尺模拟法对本工程的适应性, 前者截取坡体前缘底宽 140 m 范围作为试验对象(约为整体边坡的 1/3 底宽), 后者采用 $n_s/n=m$ 进行对比分析。结果表明, 局部模型法所获得的等效塑性应变及变形场与原型边坡的差异比较大, 小比尺模拟法在 m 不大于 3 时所获得的结果与原型有较好的一致性。

根据上述分析, 确定原型与模型的重力比尺

$n=120$, 原型边坡几何比尺 $n_s=3n$ 。

1.2 离心模型的制作

根据原型边坡的现场钻孔揭示古滑坡典型剖面如图1所示,图中所注尺寸 L_m 为通过比尺模拟相似验证后确定的离心模型断面尺寸,对应的原型尺寸 $L_p=n_sL_m$ 。

通过现场土体的土工试验确定图1中坡体土和滑带土的密度、含水率及抗剪强度,然后综合考虑现场土体的非均质特征、环刀测试密度与击实密度的差异以及填筑土体结构强度丧失等因素,通过反复比较,确定离心模型的填筑控制密度和含水率如表3所示。实际填筑时取用现场扰动土经过筛、配水、分层击实重塑而成。

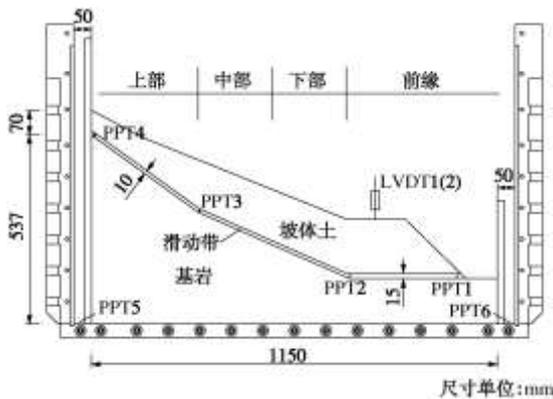


图1 离心模型断面

Fig.1 Centrifugal model section

表3 天然边坡模型的控制参数

Table 3 Physical parameters used in natural slope model

土类及所处坡体位置*	w/%	$\rho_d / (g \text{ cm}^{-3})$
滑带土	斜坡部分	16.0
	边坡前缘	20.0
坡体土	斜坡部分	15.4
	边坡前缘	15.4

*斜坡部分统指边坡上部、中部和下部。

在 $1g$ 下按天然坡型制成图2所示的边坡模型。



图2 离心模型试验的边坡模型

Fig.2 Slope model used in centrifuge tests

1.3 上下游水位控制及模型监测布置

(1) 上下游水位控制

上下游水位控制是库岸边坡试验的关键内容之一。水位控制装置包括储水罐、气动阀门、储水槽、水位量测装置等。储水槽安装在模型两端,面向坡体的侧壁设有透水孔,以保证槽内水自由流出或流进(为防止颗粒堵塞,在侧壁设置一层土工膜)。储水槽的排水和进水通过储水罐由气动阀门控制,此装置还可通过控制压力获得不同的流量,以达到控制水位升降速度的目的。另外,置于储水槽底部的孔隙水压力监测仪器(PPT)和标尺可对水位进行同时监控。

(2) 模型监测布置

离心模型试验中设置的监测项目包括沉降变形、孔隙水压力及试验全过程中边坡变形特征,所布置的监测仪器有位移传感器(LVDT)、孔压传感器(PPT)及图像分析系统(PIV),监测仪器布置点见图1。

2 试验方案及试验工况

2.1 试验方案

根据本工程的设计方案和试验目的,设计的离心模型试验方案为:

方案A为研究天然边坡在各种水位变动条件下的响应。

方案B为研究坡脚加固边坡在各种水位变动条件下的响应。

根据实际工程设计中坡脚采用回填石渣的加固处理方案,试验时将坡体前缘部位的填土密度适当提高来进行模拟。

2.2 试验工况

水库蓄水及水位骤降试验在模拟库水位实际运行方案的前提下,同时考虑到试验目的之一是希望通过试验结果反分析得到库岸边坡的失稳特征和水库的控制运行条件,即将试验中出现的不利工况列入实际水库运行的规避工况,所以试验中控制的水位调度方案在某些条件下较实际运行方案更为极端。

试验工况如表4所示。

表4 离心试验控制的水位条件

Table 4 Water conditions in centrifuge tests

工况	水库运行	备注
I	当前水位 $\xrightarrow{\text{经180 d上升}}$ 正常水位,持续 60 d $\xrightarrow{\text{经1 d骤降}}$ 汛限水位	各特征水位高程: 当前水位 $\nabla 95.6 \text{ m}$ 正常水位 $\nabla 154.6 \text{ m}$ 校核水位 $\nabla 164.4 \text{ m}$ 汛限水位 $\nabla 144.5 \text{ m}$
	汛限水位 $\xrightarrow{\text{经2 d上升}}$ 校核水位,持续 15 d $\xrightarrow{\text{经2 d骤降}}$ 汛限水位,持续 15 d	

汛限水位 $\xrightarrow{\text{经2d上升}}$ 校核
 III 水位, 持续 15 d $\xrightarrow{\text{经1d骤降}}$
 汛限水位, 持续 30 d

试验时离心机的目标加速度 (120g) 分 7 步控制上升, 逐步观测沉降和孔隙水压力读数, 至基本稳定后再进行下一步, 以保证边坡土体的正常固结。

3 边坡离心试验结果

3.1 水库蓄水对边坡稳定的影响

随着水位的上升, 浸没于水下的土体自重降低、强度下降以及浮托力的作用等, 使得坡脚抗滑力逐渐下降, 边坡前缘出现裂缝、并逐渐发展为局部滑动。水库蓄水过程中坡体前缘变形特征如图 3 所示。



(a) $\nabla 146.9\text{ m}$



(b) $\nabla 154.6\text{ m}$ (正常蓄水位)



(c) $\nabla 164.4\text{ m}$ (校核水位)

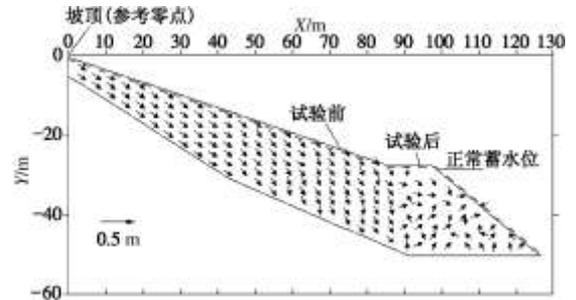
图 3 水库蓄水过程中坡体前缘滑动情况

Fig. 3 Slope sliding in reservoir impounding

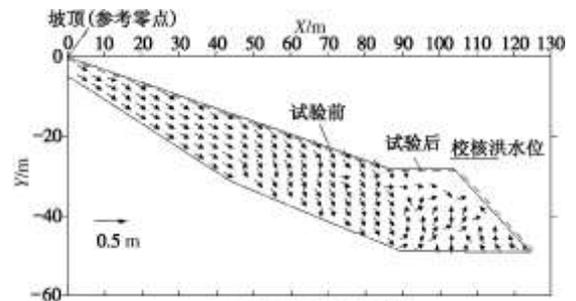
将坡体下部基岩视作不动体时, 可通过采集的数据绘制出坡体土的变形矢量场如图 4 所示。由图可见, 坡体前缘产生了隆起, 表明坡脚产生了局部滑动, 另外, 当水下土体产生变形和局部滑动时, 水上边坡各部分也产生了相应的剪切位移。

3.2 水位骤降对边坡稳定的影响

库水位上升到指定高度后通过水位控制系统按表 4 方案骤降, 坡体前缘滑动加剧, 滑动范围也向上扩大。图 5, 6 分别为降水过程中坡脚滑动情况录像截图和坡体变形矢量图。



(a) 水库蓄水至正常水位



(b) 水位上升至校核水位

图 4 水库蓄水过程中坡体变形情况

Fig. 4 Slope displacement vectors in reservoir impounding



(a) 从正常水位降至汛限水位



(b) 从校核水位降至汛限水位



(c) 从汛限水位进一步降至初始水位

图5 水位骤降过程中坡体前缘滑动情况

Fig. 5 Slope sliding in rapid drawdown of reservoir water

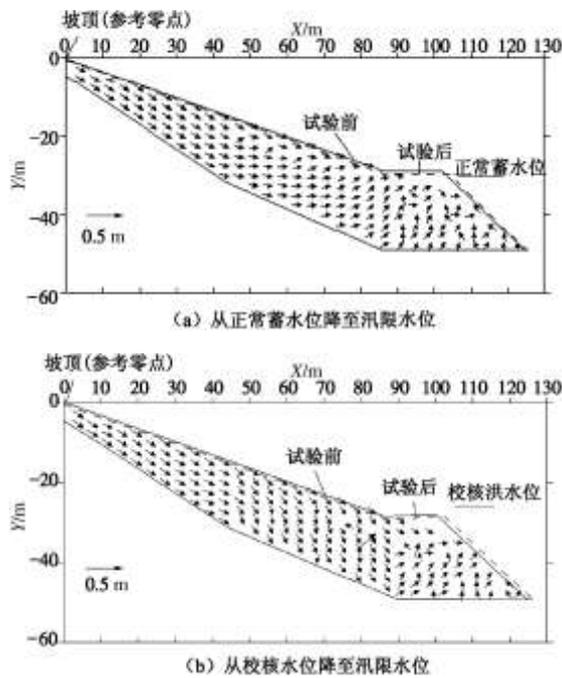


图6 水位骤降过程中坡体变形特征

Fig. 6 Slope displacement vectors in rapid drawdown of reservoir water

根据渗流原理，当土体渗透性较低时坡外水位骤降会在坡体内产生向外的动水压力，对于库岸边坡稳定来说是极为不利的运行工况。上述试验结果表明，在水位上升导致坡脚变形和局部滑动的基础上如果再遭遇库水位骤降，边坡整体滑动趋势明显较蓄水时加大：坡体前缘滑动加剧、滑动范围加大；坡体中部水平位移加大、并有上抬趋势；坡体上部水平位移加大。

根据试验结束后观察到的滑动面型式，发现坡体前缘的滑动面呈上部铅直面+下部弧面、顶部有裂缝贯穿，同时在滑坡体中上部也出现裂缝，表明有明显的水平位移。这一拉应力破坏特征揭示了此古滑坡在水位变动条件下具有牵引式滑坡趋势，坡体前缘的滑动虽然没有造成边坡整体失稳，但降低了边坡的整体稳定性。当坡体中下部长期浸没水下时，整体滑动的危险将进一步加大。

3.3 坡脚加固对边坡稳定的作用

(1) 坡脚加固的模拟

根据上述试验结果，可知提高坡体前缘的稳定性对于边坡的整体稳定具有重要作用：如果水库蓄水后浸没于水下的坡体能保持足够的稳定、水位骤降时承受水位变化的坡体不产生较大的位移，则边坡的整体稳定性就有较好的保证。

实际工程根据多方案比较采用了坡脚回填石渣、压坡的处理方案，离心模型试验针对这一加固方案采

用了提高坡体前缘填土密度及降低前缘滑带土含水率的措施进行模拟，根据室内土工试验对所用的土体的密度、含水率与强度间的关系进行了研究，最终确定的模拟坡脚加固后边坡状态的填土控制指标如表5所示。

表5 模拟坡脚加固的离心模型填筑控制指标

Table 5 Physical parameters used in reinforced slope model

土类及所处坡体位置		w/%	$\rho_d / (g \text{ cm}^{-3})$
滑带土	斜坡部分	16.0	1.86
	边坡前缘	16.0	1.86
坡体土	斜坡部分	15.4	1.99
	边坡前缘	15.4	1.99

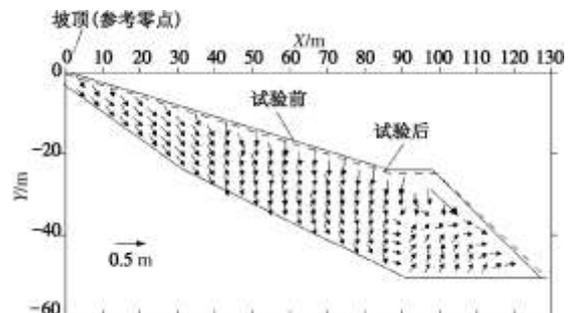
(2) 试验结果

根据坡脚加固方案进行表4所示全部工况的试验，试验结束后边坡状态如图7所示。

试验结果表明，坡脚加强后边坡在同样的运行工况下一直处于稳定状态，延长试验时间后坡体仍然处于稳定状态，试验全过程滑坡体表面无裂缝、坡脚无坍塌，如图7(a)所示。将采集到的坡体变形数据经过整理后得到图7(b)所示的坡体位移场，可以看出，虽然坡脚没有产生滑动，但坡体从下向上还是在水位变动下产生了一定的位移：上部水平位移为主、中部竖向位移为主、前缘有隆起趋势。



(a) 水位回到初始条件



(b) 边坡变形矢量

图7 加固边坡试验结束后状态

Fig. 7 Reinforced slope state after centrifuge tests

所以，实际工程中采用的坡脚加固措施可以降低土体渗透性、增加土体强度、提高坡脚的抗力，对于边坡整体稳定性具有重要作用。虽然在水库蓄水及骤

降过程中坡体各部位仍然有位移响应, 但不会对整体稳定构成威胁。图 8 为监测点 (见图 1) 的竖向位移

表 6 试验后离心模型的物理指标和强度指标

Table 6 Physical and strength indexes of slope model after centrifuge tests

试验方案	取样位置(参见图 1)	$\rho /(\text{g cm}^{-3})$	w/%	c_{cq} / kPa	$\varphi_{cq} /(^{\circ})$	注	
天然边坡	坡体土	中部 表层	2.02	10.68	0	23.23	未滑动区
		中部 内部	2.08	11.29			
		下部 表层	2.02	11.64			
		下部 内部	2.06	12.65			
		前缘 表层	2.02	13.59			
		前缘 内部	2.05	14.17			
	滑带土	坡脚滑动区域	—	17.70	—	—	
		中部	—	17.81	—	—	
		前缘	—	20.72	—	—	
		—	—	—	—	—	
加固边坡	坡体土	表层平均值	2.18	12.35	16.8	28.23	强度指标取样点同于方案 A
		内部平均值	2.20	12.21			
	滑带土	中上部	—	19.20	—	—	
		前缘	—	20.70	—	—	

过程, 可知水库蓄水至正常水位时变形已基本趋于稳定。

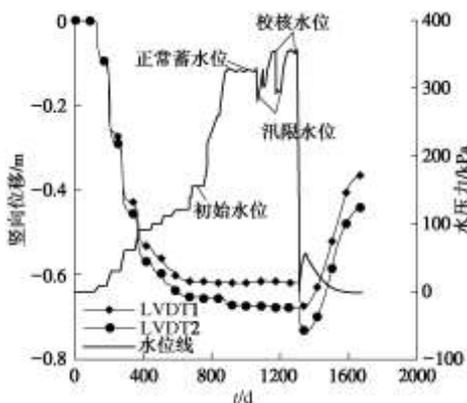


图 8 水位变动时监测点竖向位移

Fig. 8 Vertical displacements of surveying points during change of water levels

4 试验后坡体土物理状态及强度特性

4.1 物理指标与强度指标

为研究坡脚产生滑移对边坡其他部位土体状态的影响以及这些影响对边坡稳定的不良作用, 离心试验中在每一组离心试验完成后都立即对试验边坡进行了取样和相应的土工试验, 试验结果列入表 6, 图 9 为固结快剪的剪应力 - 剪切位移关系。

土工试验结果表明: ①坡脚涉水后产生的滑动(位移)使坡体密度有所降低, 表层降低幅值高于坡体内部; ②从边坡上部至前缘, 土体密度呈现由高到低、含水率呈现由低到高的变化趋势, 说明坡体土产生了向坡脚方向的移动, 土中水产生了向坡脚处的渗流, 当坡脚产生滑动时(方案 A), 这种密度降低和含水率

重分布现象更加明显; ③边坡下部在坡脚产生滑动后剪应力 - 剪切位移呈现屈服特征(图 9 (a)), 坡脚稳定时为硬化特征(图 9 (b)); ④坡脚滑动后边坡下部未滑动区域的抗剪强度降低, 说明坡脚滑动会牵引临近土体产生相应的滑移, 导致抗剪强度指标衰减, 坡脚加固后虽然边坡也会随着水位变动产生水库方向的位移, 但位移量很小, 土体的强度指标基本保持模型填筑时的强度。

上述土工试验结果及图 6、图 7 所示的边坡变形场对于边坡坡脚滑动对整体稳定降低的影响作用和库岸边坡渐进性滑动的机理有很好的揭示。

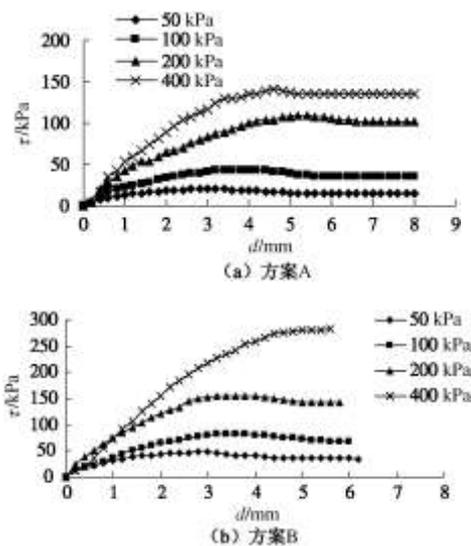


图 9 离心试验后坡体土剪应力 - 剪切位移关系(固结快剪)

Fig. 9 Shearing stress-displacement relationship of slope soils after centrifuge tests (cq)

4.2 关于土体黏聚力的进一步探讨

据试验前针对坡体土的土工试验可知离心模型试

验所采用的现场土体为低液限含砂黏土, 试验结果表明土体的黏聚力随着土体含水条件的变化会产生较大的波动, 为进一步探讨此类含砂黏性土的黏聚力性质, 采用离心模型试验后坡体前缘土样进行了下述观察试验。

如图 10 所示, 将切好的试样浸于土样高度 80% 的水中, 19 h 后近 50% 的方块已经崩塌, 手感崩塌土体如细砂, 随时间延长方块进一步崩塌, 直至完全融入水中。所以, 此类土体的黏聚力具有假黏聚力特征: 当含水率较低时会随着含水率增加而增加, 但这种增加随着浸水时间延长而明显降低直至黏聚力完全消失。黏聚力的这一特征对于水下边坡的强度指标的选取引起足够重视。

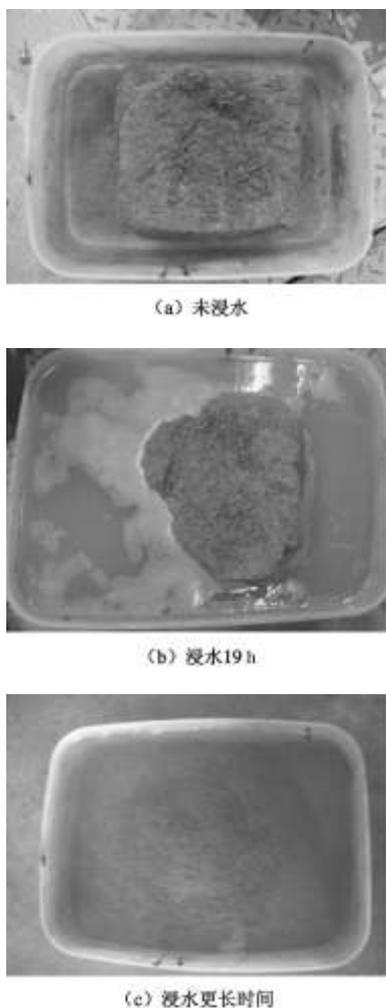


图 10 黏聚力观察试验

Fig. 10 Observation test on cohesion

5 结 论

本文针对库岸古滑坡可能在水库蓄水及库水位骤降条件下产生失稳或局部失稳的问题进行了离心模型试验研究, 试验中综合考虑了几何比尺大于重力比尺、

非均质边坡填筑、上下游水位实时控制等库岸边坡的常见问题, 并针对坡脚滑动对坡体其他部位土体的影响进行了试验, 以更好揭示库岸古滑坡的失稳机理。根据试验结果可以得出:

(1) 水库蓄水时, 随着水位上升坡脚抗滑力下降, 坡体前缘产生裂缝, 并逐渐发展为坡脚的滑动, 边坡整体产生下滑位移, 此时水上土体的抗剪强度可能随着剪切位移的产生而发生改变。水位骤降时, 动水压力的不利作用使得边坡在蓄水过程中所形成的不利状态进一步加剧, 坡体前缘滑动范围扩大, 水位以上边坡的剪切位移也进一步加大。

(2) 水库蓄水及水位骤降条件下坡脚滑裂面呈浅层贯穿拉裂缝、下部近似圆弧的型式, 同时在坡体上部也出现裂缝, 这一破坏特征表明此古滑坡具有牵引式滑坡的潜在危险。

(3) 采用提高涉水坡脚填土密度的方法模拟实际工程中坡脚加固的工程措施试验可行, 试验结果证明对坡脚进行加固确能提高边坡的稳定性。虽然在各种水位变动条件下坡体各部位还是会产生相应的剪切变形, 但变形量较小, 对于边坡整体稳定不构成威胁。

(4) 离心试验后对于边坡土体进行的物理状态试验和剪切强度试验对于揭示边坡失稳机理具有重要意义, 因为实际涉水边坡在运行中时出现坡脚坍塌或坡脚位移增大很难获得这样具有对比性的资料。试验结果表明, 当坡脚产生滑动时, 临近的未滑动区域的土体强度会因剪切位移而降低, 如果坡脚没有进行有效加固, 随着浸没时间增长可能演化为边坡的渐进性破坏。在进行边坡稳定数值模拟时应考虑这一渐进性破坏因素, 通过建立剪切位移和剪切强度的关系提高边坡稳定性评价的可靠性。此外, 应重视土体浸水后黏聚力降低乃至完全消失对坡体稳定性的不利影响。

应说明的是, 由于受离心模型箱尺寸的限制, 方案 A 试验时下游坡脚坍塌后的土体对边坡在水位变动条件下的进一步滑动有阻滑作用, 可能造成滑动范围减小。消除模型箱的边界效应是目前离心模型试验中尚未很好解决的难题, 本研究将通过数值模拟技术对试验成果进行补充, 以便将试验中存在的不足减小到最小, 并将有限试验方案的结果上升到一般规律, 限于篇幅, 这部分内容另文介绍。

致 谢: 离心试验在香港科技大学岩土工程离心机实验所完成, 参与本试验研究的还有周正兵、周秋娟、尹赛华等, 在此一并致谢。

参考文献:

[1] LYNDON A, SCHOFIELD A N. Centrifugal model test of a

- short term failure in London clay[J]. *Géotechnique*, 1970, **20**(4): 440 - 442.
- [2] MIKASA M, MOCHIZUKI A, SUMIO Y. A study on stability of clay slopes by centrifuge[C]// *Proc 9th int conf Soil Mech*, 1977(2): 121 - 124.
- [3] LYNDON A, SCHOFIELD A N. Centrifugal model tests of the lodalen landslide[J]. *Can Geotech J*, 1978, **15**: 14 - 31.
- [4] SCHOFIELD A N. Cambridge geotechnical centrifuge operation[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(3): 227 - 268.
- [5] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, **18**(3): 80 - 86. (XU Gang-ming, ZHANG Wei-ming. Study on effect of dimension and boundary of the centrifuge model test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **18**(3): 80 - 86. (in Chinese))
- [6] CHARLES Harris, JAMES S Smith, MICHAEL C R Davies, et al. An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge[J]. *Geomorphology*, 2008(93): 437 - 459.
- [7] 张利民, 胡定. 瀑布沟高土石坝离心模型试验研究[J]. *水利学报*, 1990, **9**: 60 - 65. (ZHANG Li-min, HU Ding. Centrifugal modeling tests on Pubugou high earth-rock dam[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, **9**: 60 - 65. (in Chinese))
- [8] 张利民, 胡定. 高重力场中离心模型的水流控制设备[J]. *成都科技大学学报*, 1989(3): 93 - 97. (ZHANG Li-min, HU Ding. Development of a water control facility for centrifugal model testing in high gravitation fields[J]. *Journal of Chengdu University of science and technology*, 1989(3): 93 - 97. (in Chinese))
- [9] TIMPONG S, ITOH K, TOYOSAWA Y. Geotechnical centrifuge modeling of slope failure induced by ground water table change[C]// *Landslides and Climate Change*. London: Taylor and Francis Group, 2007: 107 - 112.
- [10] 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 Shao-jun, KNAPPETT J A, FENG Xia-ting. 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. (in Chinese))
- [11] 徐光明, 章为民, 蔡飞, 等. 岸坡稳定的离心模型试验和有限元计算分析[J]. *水利水运科学研究*, 1995(4): 394 - 404. (XU Guang-ming, ZHANG Wei-min, CAI Fei, et al. Centrifugal model test and finite element analysis of stability for bank slopes[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1995(4): 394 - 404. (in Chinese))
- [12] FUGLSANG L D, OVESEN N K. The application of the theory of modeling to centrifuge studies[C]// *Centrifuge in Soil Mechanics*, 1988: 119 - 138.
- [13] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. *岩土工程学报*, 1991, **13**(6): 92 - 97. (BAO Cheng-gang. The state and prospect of centrifugal model test in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, **13**(6): 92 - 97. (in Chinese))
- [14] 张延亿, 徐泽平, 温彦锋, 等. 糯扎渡高心墙堆石坝离心模拟试验研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2008, **6**(2): 86 - 92. (ZHANG Yan-yi, XU Ze-ping, WEN Yan-feng, et al. Centrifugal modeling test on the nuozhadu high central core earth-rockfill dam[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2008, **6**(2): 86 - 92. (in Chinese))
- [15] 张利民, 胡定. 小比尺离心模型的屈服和破坏特性[J]. *成都科技大学学报*, 1990(2): 7 - 12. (ZHANG Li-min, HU Ding. Yielding and failure behavior of small scaled centrifuge models[J]. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 1990(2): 7 - 12. (in Chinese))
- [16] ZHANG Li-min, HU Ding. Numerical evaluation of the similitudes for large-scaled centrifuge models[C]// *Proc of int. Sym. Landslide and Geotechnics*, 1991: 65 - 69.