

库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究

李邵军¹, KNAPPETT J A², 冯夏庭¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 邓迪大学 土木工程系, 苏格兰 邓迪, DD1 4HN)

摘要: 三峡库区频发的滑坡地质灾害已愈来愈引起学者的高度重视, 其受水位反复升降的影响是库区边坡不同于其他陆地自然边坡的一个显著特点。以离心模型试验为手段, 基于三峡库区典型滑坡的工程地质特征, 建立相应的土质边坡离心模型。在试验过程中实现对库水位循环升降的控制, 模拟库区边坡在水位升降作用下的失稳过程。通过数码摄像、数字图像处理 and 传感元件测试, 获得该试验条件下的土坡在水位升降过程中典型位置的孔隙水压力变化、全断面位移矢量演化(水平位移和沉降)、滑面形态及裂缝形成发展过程, 并详细分析边坡在这种外部水环境影响下的变形演化、失稳和破坏模式。试验结果表明, 若仅考虑水位升降作用的影响, 该试验条件下的库区土质边坡的变形呈现典型的渐进牵引破坏模式, 并具备较强的水土软化影响特征; 裂缝在变形演化过程中出现交替张开和闭合现象, 该失稳模式下的滑面呈折线形态, 并在变形破坏过程中次生多级滑面。研究结果为库区滑坡地质灾害机制的深入认识、以及滑坡预防和控制提供了重要依据。

关键词: 边坡工程; 库区边坡; 稳定性; 水位升降; 离心模型试验; 数字图像处理

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)08 - 1586 - 08

CENTRIFUGAL TEST ON SLOPE INSTABILITY INFLUENCED BY RISE AND FALL OF RESERVOIR WATER LEVEL

LI Shaojun¹, KNAPPETT J A², FENG Xiating¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Division of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, Scotland)

Abstract: Many scholars have paid more and more attention to the landslide disasters occurring in the Three Gorges Reservoir region. It is a special characteristic that the slopes along reservoir are inevitably influenced by rise and fall of water level. A method to evaluate the slope stability by centrifugal test is introduced; and soil slope models considering geological conditions of the Three Gorges are constructed. Controlling of drawdown and charging of reservoir is implemented in the test, which makes it possible to simulate the whole process of instability of the slopes. Through the technique of digital photography, image processing and transducers measurement, a series of important test data are obtained, such as pore water pressure, displacement, failure surface and crack evolution in some typical regions. Moreover, analysis of deformation progress and failure mode are given as well. Results indicate that the deformation of soil slopes will perform pull-typed behavior in such water condition. However, the factor of water rise and drawdown gradually softening soil will lead to the strength reduction and therein induce large displacement. In addition, the slope cracks propagate and close alternately

收稿日期: 2008 - 02 - 25; **修回日期:** 2008 - 04 - 07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ971 - YW - L01); 三峡库区三期地质灾害高切坡防护工程技术科研项目

作者简介: 李邵军(1974 -), 男, 博士, 2005年于中国科学院武汉岩土力学研究所获岩土工程专业博士学位, 现任副研究员, 主要从事岩土边坡安全性评估与监控方面的研究工作。E-mail: sjli@whrsm.ac.cn

during the whole test; and failure surfaces are almost like polygonal lines. The centrifugal results can provide significant data for evaluating the failure mechanism of such landslides, which will provide useful information for the prevention and reinforcement measures in reservoir landslides.

Key words: slope engineering; slope in reservoir region; stability; rise and fall of water level; centrifugal model test; digital image processing

1 引言

库区水位的升降对边坡稳定性的影响是一个非常重要且尚未解决的难题^[1]。在我国,三峡库区滑坡地质灾害已愈来愈得到各级政府和研究学者的高度重视,三峡库区灾害处治的二期和三期工程对滑坡和高切坡地质灾害防治的投入超过人民币 100 亿元。据统计,长江沿岸仅重庆库区高边坡涉及到 15 个区县,存在的地灾隐患高达 11 784 处。

库区边坡不同于其他自然边坡的一个显著特点是长期受库水位升降作用的影响,这将在一定程度上将加剧诱发边坡的失稳。针对这一特殊环境下的研究对象,从力学分析、数值模拟、现场监测及室内和现场试验等方面都已经开展了大量的卓有成效的工作^[2]。在这些研究方法中,作为迄今为止相似性最好的离心模型试验^[3],可较为真实地模拟现场条件,人工塑造具有工程地质特征和环境影响的边坡,并根据需要灵活地调整各种影响和控制参数,再现边坡原型的应力过程和变形结果,为边坡破坏机制和加固控制研究提供了一种强有力的手段,目前已在岩土工程研究领域获得了广泛的应用^[4~7]。

概况起来,基于离心模型试验开展的与边坡相关的研究工作主要集中在以下几个方面:

- (1) 模拟施工开挖对边坡稳定性的探讨^[8, 9]。
- (2) 降雨入渗及边坡体内地下水位改变对边坡的影响研究^[10~13]。
- (3) 地震作用下的边坡稳定性^[14~16]。
- (4) 其他方面的主要成果还包括:唐辉明和林彤^[17]利用离心模型试验对加筋土挡墙受力机制进行了研究;徐光明等^[18]研究了基岩面存在软弱夹层的边坡的稳定性和破坏模式;邢建营等^[19]开展了岩质边坡在改变倾斜角情况下楔形体破坏的离心模型试验;此外,高长胜等^[20]开展了堤防边坡稳定性的离心模型试验。

对于库区边坡而言,在试验研究方面,由于受到在高速旋转的离心模型机上进行水位反复升降变化

模拟较为困难的影响,目前较普遍采用的离心模型试验手段,主要针对边坡开挖、降雨入渗、地震作用等影响进行了研究,尚鲜见有系统模拟水位升降作用对边坡变形破坏机制研究的相关文献报道。本文以三峡库区滑坡为研究对象,采用离心模型试验的方法,制作模拟典型库区滑坡工程地质条件的离心试验模型,并在模型试验中的实现对边坡前缘水位反复升降的控制,揭示边坡在库水位升降条件下的破坏模式和变形失稳机制,为库区滑坡的防治提供重要的依据。

2 试验设计和方法

2.1 试验原理

物理模型试验是开展岩土工程研究的一种重要手段之一,而离心模型试验是当前公认的相似性最好的物理模型试验^[3],其基本思想是用小比尺的物理模型去揭示和分析现象的本质和机制,以验证和解决工程实际问题。离心模型试验的基本原理是采用与原型相同的材料的小比尺模型放在离心试验机形成的高加速度场中运行,从而达到与原型相同的应力水平,使模型与原型的应力应变相等,变形相似,破坏机制相同,能够再现原型特性,为理论和数值等分析方法提供真实可靠的参数^[7]。在这方面,物理模型试验^[3~9, 18~20]均有详细的介绍,为此,本文不再赘述。

对于模型比尺为 n 的离心模型,模型与原型主要物理量之间的关系见表 1,本文根据这些相似关系及库区边坡工程实际确定了离心模型的设计方案和试验方法。

2.2 试验设备

本文的试验是在英国 Dundee 大学土木工程系的离心模型机(Actidyn C67-2)上进行的,该离心机的主要性能参数如下:

- (1) 有效旋转直径: $\phi 6.5$ m。
- (2) 最大离心加速度: 150 g。
- (3) 模型箱尺寸: 1.0 m \times 0.8 m \times 0.8 m。

表1 各物理量的离心模型和原型的相似关系

Table 1 Similarity relationship between centrifugal model and prototype

相似比关系	长度	面积	体积	含水量	质量	密度	速度
模型	1	1	1	1	1	1	1
原型	n	n^2	n^3	1	n^3	1	1

相似比关系	位移	孔隙度	加速度	渗透系数	时间/惯性	时间/渗流
模型	1	1	n	1	1	1
原型	n	1	1	1	n	n^2

(4) 容量: 150 g · t。

试验系统中设计了降雨、给水和排水装置, 在此基础上针对库区边坡对水位升降的模拟要求, 本文进一步设计了水位升降控制系统。其主要组成部分包括进水管、流量电控泵、进水电磁阀、排水阀、管路、水位供给控制箱及水位和孔隙水压力微型传感器, 如图1所示。

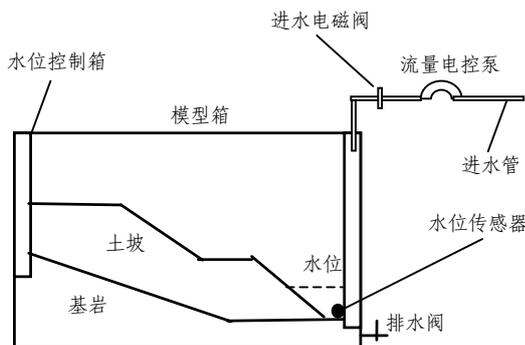


图1 离心模型试验中的水位升降控制系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of control system of water level for centrifugal test

2.3 试验模型

通过对三峡库区堆积层滑坡工程地质和水环境的综合分析, 并选取秭归县木籽树坪滑坡为原型, 概化后的试验模型剖面如图2所示。

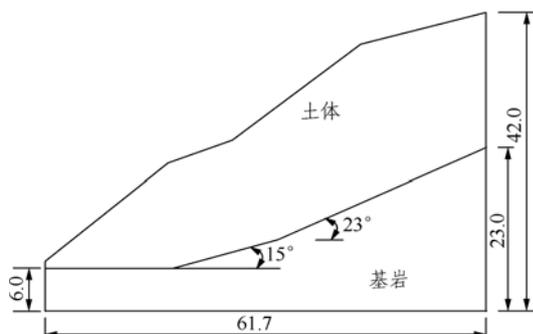


图2 库区滑坡的离心模型几何结构图(单位: cm)

Fig.2 Geometry of centrifugal landslide model in reservoir area(unit: cm)

边坡模型制作采用相似材料, 其中基岩为混凝土, 为细砂、高岭土和水泥的混合物, 基岩面为折线形状, 倾角分别为 15° 和 23°, 如图2所示。滑体土由蒙脱石、细砂、有机质和水按一定比例混合而成。土坡模型制作时采用分层击实法, 经过反复配比重塑和试验, 最后得到的模型土基本物理力学参数如表2所示。最终制作完成的库区滑坡离心模型如图3所示。

表2 滑坡模型的土体物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical properties of soils used in landslide model

密度/(g · cm ⁻³)	含水量/%	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1.6	20.1	0.64	29.92	21.5



图3 库区滑坡的离心模型图

Fig.3 Picture of centrifugal model for reservoir landslide

2.4 监测设施、图像采集和变形分析

试验过程中的监测设施有水压计、微型孔隙水压力计、视频跟踪器和数码摄像机, 用以实现水位升降控制、孔隙水压力监测、数字图像获取和边坡变形分析。模型箱两侧是由两块 30 cm 透明的有机玻璃组成(有机玻璃刻有用于变形分析定位的矩形格网, 如图3所示), 通过安装在模型箱侧面的视频跟踪器和数码相机可以实时获得边坡模型变形全过程图像。

该试验系统没有安装位移测试元件, 试验成果中的变形分析是通过一个面向对象的 GeoPIV 软件实现^[21]。该分析软件的基本原理是基于试验过程中的一系列不同时刻的图像, 通过数字图像处理的方法, 在边坡区域内划分自定义大小的格网为图像单元, 获得任意图像单元上的水平和沉降位移。在模型边坡上的格网单元划分如图4所示。

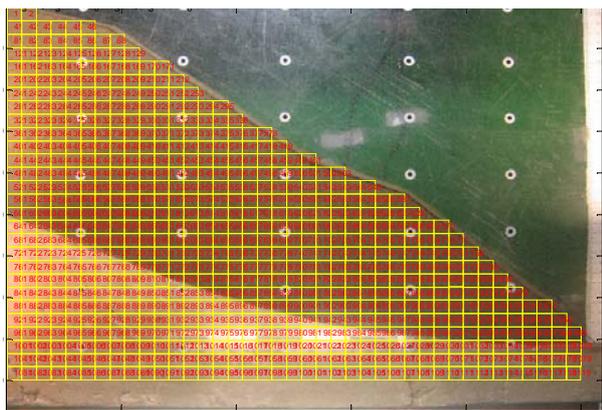


图 4 滑坡模型中的格网单元划分

Fig.4 Image meshes in the centrifuge slope model

水压力监测设施(水压力计 PPT)和变形分析测点(图像处理格网点 SL02 - P)在边坡中的布置如图 5 所示, 相应的坐标如表 3 所示。

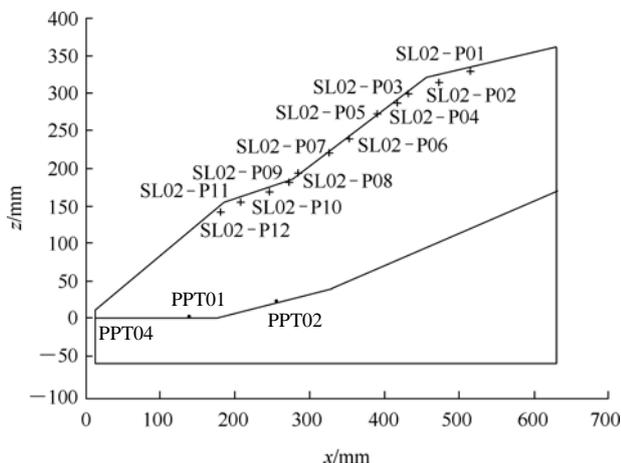


图 5 滑坡模型中的孔隙水压力计及典型位移跟踪点布置

Fig.5 Distribution of water pressure transducers and typical displacement points in centrifuge model

表 3 剖面上典型位移测点的布置坐标

Table 3 Coordinates of some typical displacement points

测点	x/mm	y/mm	测点	x/mm	y/mm
SL02 - P01	514	330	SL02 - P07	324	220
SL02 - P02	472	315	SL02 - P08	285	194
SL02 - P03	431	300	SL02 - P09	272	181
SL02 - P04	417	287	SL02 - P10	246	168
SL02 - P05	390	273	SL02 - P11	207	155
SL02 - P06	364	247	SL02 - P12	181	142

2.5 试验过程

试验时将装有边坡离心模型的模型箱放到离心机上, 逐渐增大转速, 待重力加速度达到 100 g 后,

开始通过水位控制系统在边坡前缘升降水位, 整个过程均实时地测读水压力计并记录边坡变形的视频和图像。本次试验水位升降模拟范围为 0~10 cm(原型为 0~10 m), 包括两个升降循环, 详细情况如下:

(1) 第 1 循环: 水位自坡底上升至 3.0, 8.0 cm, 再下降至 1.3 cm。

(2) 第 2 循环: 水位再次从坡底上升到 9.8 cm, 然后下降到 5.2 cm, 持续观察待边坡基本没有变形时结束试验。通过滑坡前缘水压力计(PPT04)描述的详细水位升降过程如图 6 所示。

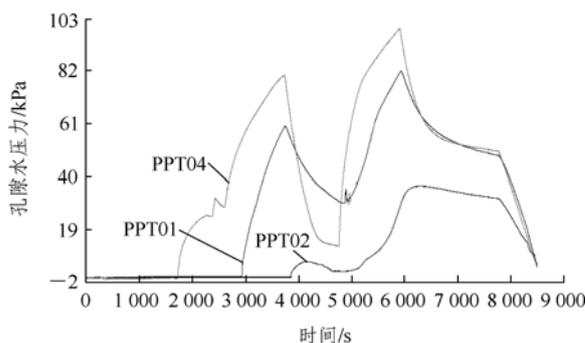


图 6 边坡前缘水位与孔隙水压力随时间的变化过程

Fig.6 Variation procedure of water level and pore pressure during the whole centrifuge test

3 试验结果分析

3.1 水位升降过程中的孔隙水压力变化特征

如图 6 所示, 水压力计 PPT01 和 PPT02 是安装在图 5 所示位置的微型孔隙水压力计。从图 6 可以看出, 受黏土介质亲水性和渗透性能的影响, 孔隙水压力的变化明显滞后于边坡前缘库水位的变化。此孔隙水压力测试结果也进一步反映了水位升降过程中浸润线的变化情况。土体中的水位自由面和库水位面的典型形态如图 7 所示, 这一测试结果也为该条件下的边坡渗流分析提供了依据。

3.2 水位升降过程中的位移变化特征

试验获得水位升降影响下的边坡典型测点的位移变化曲线如图 8 所示(图中数值为对应的阶段)。

从图 8 分析可知, 边坡的变形可以分为以下 6 个阶段:

- (1) 试验开始到离心加速度达到 100 g。
- (2) 库区水位上升到 3.0 cm。
- (3) 库区水位上升到 8.0 cm。
- (4) 库区水位下降到 1.3 cm。
- (5) 库区水位上升到 9.8 cm。

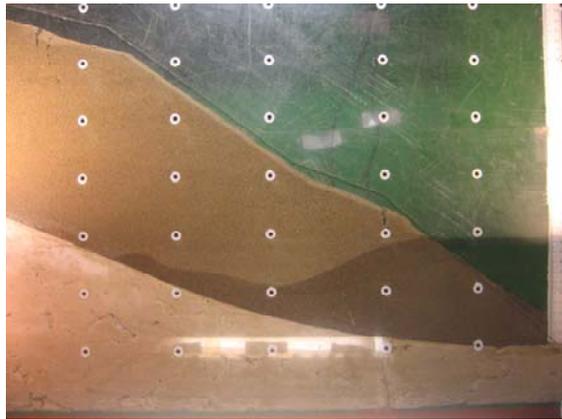
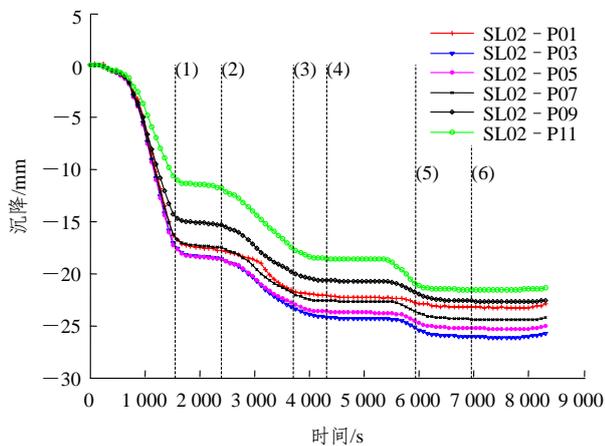
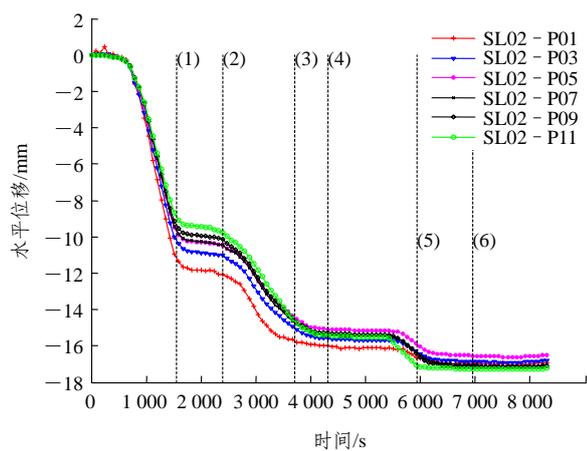


图7 试验过程中水位上升到 9.8 cm 时的边坡水位和变形图像

Fig.7 Image of deformation and water status when reservoir water level reaches 9.8 cm from the bottom of slope



(a) 沉降 - 时间曲线



(b) 水平位移 - 时间曲线

图8 离心模型试验全过程中典型测点的位移变化
Fig.8 Displacements of typical points during the whole centrifugal model test

(6) 库区水位下降到 5.2 cm 稳定一段时间后结

束试验。

各阶段的变形特征分析如下：在试验开始到重力加速度达到 100 g 阶段，边坡土体随着重力加速度的逐步增加，发生了固结变形，位移基本上呈现线性增大的趋势，边坡前后缘各测点变形基本特征一致，但后缘测点的沉降变形略大于前缘测点。该时刻的边坡位移矢量如图 9 所示。

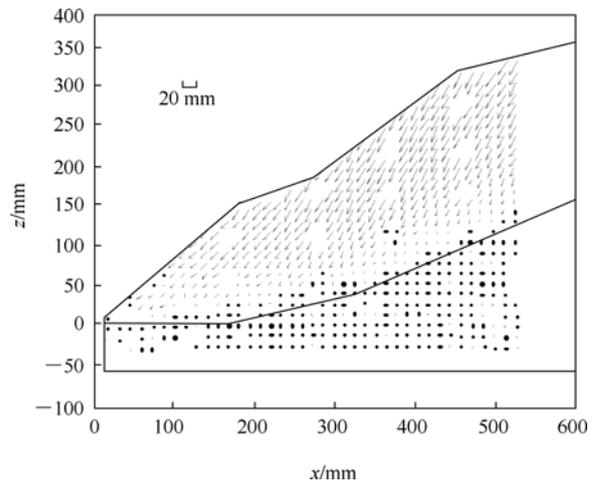


图9 重力加速度达到 100 g 时刻的边坡位移矢量

Fig.9 Slope displacement vectors when the gravity acceleration reaches 100 g

此后，在保持重力加速度 100 g 的情况下，当库区水位上升到 3.0 cm 时，各测点发生了缓慢的变形，沉降位移为 0~3 mm，水平位移为 0~2 mm。当库区水位进一步上升到 8.0 cm 时，边坡位移急剧增大，该阶段的水平位移和沉降位移增量大小均为 4~8 mm。而后，在水位下降到 1.3 cm 的阶段，边坡位移仍在增大，处于蠕滑过程，水平和沉降位移增大幅度为 1~2 mm。随后，在水位再次上升到 9.8 cm 阶段，位移在初期尚未明显变化，而后发生一个急剧增大的阶段，水平和沉降位移增幅达到 1~5 mm。而在最后水位再次下降阶段，位移有较小的变化。

由此可以看出，边坡前缘的水位循环升降对边坡的稳定性产生了较大的影响，最终试验结果表明，因水位升降产生的最大水平和沉降位移增量分别达到了 13~15 mm(滑坡原型即分别为 1.3 和 1.5 m)，并直接导致了边坡的失稳。图 7 给出了试验过程中第一次水位上升到 9.8 cm 时刻边坡的变形特征图像，可以清晰地看出试验过程中产生的裂缝和滑面形态。

3.3 水位升降过程中的裂缝演化

图 10 给出了边坡前缘的裂缝宽度随水位升降的变化情况。

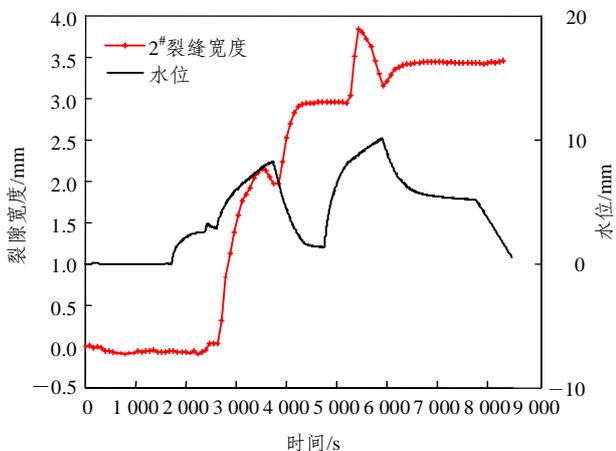


图 10 滑坡前缘 2#裂缝宽度随水位升降的变化

Fig.10 Comparison between width of crack No.2 and varying water level in front of reservoir slope

总体上看, 裂缝的发展变化在时间上要滞后于水位升降的变化。其次, 裂缝在水位初次上升和下降中变化较大, 这主要是因为土在亲水浸泡, 由非饱和态遇水转化为饱和态时发生了渗流、水软化及颗粒间结构重组效应, 使得黏聚力和内摩擦角降低, 这一阶段也是边坡变形受影响最大的时段。再次, 裂缝在发展变化过程中, 呈现出交替张开和闭合的现象, 表现在裂缝宽度反复增大和减小, 这与实际滑坡工程中观察到的现象是一致的。最终, 获得的裂缝宽度为 3.3 mm, 即原型滑坡的最大裂缝宽度达到 33 cm。

3.4 边坡的失稳破坏模式

在水位升降条件下, 边坡的破坏呈现出典型的牵引式发展模式, 即首先在前缘发生变形(鼓胀和水平推移), 而后逐渐向后缘牵引发展, 并在坡体上形成若干条大小不一的张拉裂缝。

在滑面发育模式方面, 试验获得了边坡失稳后在后缘产生的部分滑面形态, 但没有得到贯通性的滑面, 试验后的滑面形态如图 11 所示。然而, 通过边坡剖面上各测点的变形矢量演化结果, 可以分析得到潜在的贯通性滑面, 如图 12 所示。显然, 边坡失稳的潜在危险滑动面并非是单一的, 而是由多个滑面组成, 且滑面总体上呈折线形态。



图 11 离心模型试验后的滑面形态

Fig.11 Failure surfaces in landslide body after centrifugal test

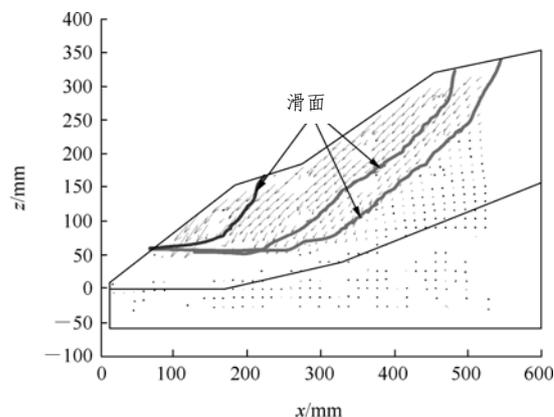


图 12 基于 GeoPIV 分析得到的位移矢量和最危险滑面

Fig.12 Slope failure surfaces and displacement vectors analyzed by GeoPIV

4 结 论

通过水位升降条件下的边坡离心模型试验, 得出该试验条件下的结论如下:

- (1) 基于离心模型试验, 建立了水位升降控制系统, 实现了对库区水位升降条件的物理模拟。
- (2) 以三峡库区典型边坡为原型, 试验获得了因库水位升降而导致边坡失稳的现象, 并定量地得到了边坡失稳过程中关键位置的孔隙水压力变化、浸润线、剖面上各变形点的位移和矢量演化、裂缝的形成与演化以及边坡失稳的滑面形态和破坏模式, 为探讨边坡变形机制提供了依据。
- (3) 试验结果表明, 若仅考虑水位升降作用的影响, 库区土质边坡的变形呈现典型的牵引破坏模式, 变形由前缘向后缘逐渐发展。且裂缝呈现出交

替张开和闭合的现象, 该破坏模式下的滑面呈折线形态, 并在试验过程中次生多级滑面。

(4) 从水位上升和下降过程中的变形大小分析, 边坡在水位初次上升阶段, 将发生比水位下降时更大的变形, 这主要是因为边坡土体在初次遇水时, 由非饱和态转向饱和态过程中受渗流、水软化作用的影响, 其黏聚力和内摩擦角等力学特性发生了较大的变化。因此, 库水位上升时也更容易诱发滑坡地质灾害, 其变形行为具有较强的水土软化影响特征。

(5) 进一步的研究将以该文的试验成果为基础, 开展相应的数值模拟分析和验证。并且在此基础上, 针对边坡加固(抗滑桩、锚索)机制和优化, 进行库水位升降条件下的桩土相互作用理论、离心模型试验和数值分析方法研究。

致谢 本文的试验工作得到了英国 Dundee 大学土木工程系 Rene Sonnenberg 和 Peter Hudascsek 博士的大力帮助, 同时也得到了 Andrew Brennan 和 Fraser Brandsby 博士的悉心指导, 特此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslide and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454.(in Chinese))
- [2] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1 - 21.(WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Centurial achievements of engineering geology in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1 - 21.(in Chinese))
- [3] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 315 - 370.(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute. Technological manuals of geotechnical test[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 315 - 370.(in Chinese))
- [4] 包承纲. 我国离心模拟试验技术发展现状和展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92 - 97.(BAO Chenggang. State and prospect of centrifugal model test in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 92 - 97.(in Chinese))
- [5] 油新华, 李 晓. 国外离心模型试验技术在边坡工程中的应用现状与展望[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 442 - 445.(YOU Xinhua, LI Xiao. Current status and prospect of application of centrifugal model test to slope engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(4): 442 - 445.(in Chinese))
- [6] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199 - 203.(HUANG Zhiquan, WANG Sijing. A study of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199 - 203.(in Chinese))
- [7] 胡黎明, 劳敏慈, 张建红, 等. 离心模型试验技术在环境岩土工程中的应用现状与展望[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 327 - 330.(HU Liming, LO IRENE M C, ZHANG Jianhong, et al. Application of centrifuge modeling technique to geoenvironmental engineering[J]. Soil and Environmental Science, 2001, 10(4): 327 - 330.(in Chinese))
- [8] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 边坡开挖迁移式影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 76 - 80.(YAO Yuchun, YAO Lingkan, YUAN Biyu. Study on centrifugal model tests of transition effect of cut slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 76 - 80.(in Chinese))
- [9] 刘 悦, 黄强兵. 黄土路堑边坡开挖变形机制的离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 59 - 62.(LIU Yue, HUANG Qiangbing. Centrifugal model test on the deformation mechanism of loess cut slope[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(3): 59 - 62.(in Chinese))
- [10] 姚裕春, 姚令侃, 王元勋, 等. 水入渗条件下边坡破坏离心模型试验研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 149 - 154.(YAO Yuchun, YAO Lingkan, WANG Yuanxun, et al. Centrifugal model test of slope failure under water penetration[J]. Chinese Journal of Nature Disasters, 2004, 13(2): 149 - 154.(in Chinese))
- [11] TIMPONG S, ITOH K, TOYOSAWA Y. Geotechnical centrifuge modelling of slope failure induced by ground water table change[C]// Landslides and Climate Change. London: Taylor and Francis Group, 2007: 107 - 112.
- [12] 刘翠容, 王化光. 降雨入渗对土质边坡稳定的影响[J]. 铁道建筑, 2006, (2): 66 - 68.(LIU Cuirong, WANG Huaguang. Effect of rainfall on the stability of soil slope[J]. Railway Engineering, 2006, (2): 66 - 68.(in Chinese))

- [13] 陈生水, 郑澄锋, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 795 - 799.(CHEN Shengshui, ZHENG Chengfeng, WANG Guoli. Researches on long-term strength and deformation characteristics and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 795 - 799.(in Chinese))
- [14] TABOADA-URTUZUASTEGUI V M, MARTINEZ-RAMIREZ G, ABDOUN T. Centrifuge modeling of seismic behavior of a slope in liquefiable soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9 - 12): 1 043 - 1 049.
- [15] STEWART D P, ADHIKARY D P, JEWELL R J. Study on the stability of model rock slope[C]// Proceedings of the International Conference on Centrifuge' 94. Singapore: [s. n.], 1994: 629 - 634.
- [16] NG CHARLES W W, LI X S. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uniaxial and bi-axial earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(4): 305 - 318.
- [17] 唐辉明, 林 彤. 三峡工程库区巫山县加筋土挡墙离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 893 - 2 901.(TANG Huiming, LIN Tong. Centrifugal modeling test on reinforced earth wall at Wushan County in reservoir area of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 893 - 2 901.(in Chinese))
- [18] 徐光明, 邹广电, 王年香. 倾斜基岩上的边坡破坏模式和稳定性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 703 - 708.(XU Guangming, ZOU Guangdian, WANG Nianxiang. Failure mode and stability analysis of soil slope on inclined bedrock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 703 - 708.(in Chinese))
- [19] 邢建营, 邢义川, 陈祖煜, 等. 岩质边坡楔形体破坏的离心模型试验方法研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 15 - 19.(XING Jianying, XING Yichuan, CHEN Zuyu, et al. Method research on centrifugal modeling of wedge failure in rocky slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(3): 15 - 19.(in Chinese))
- [20] 高长胜, 陈生水, 徐光明, 等. 堤防边坡稳定离心模型试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 308 - 4 312.(GAO Changsheng, CHEN Shengshui, XU Guangming, et al. Centrifugal model test on slope stability of levee project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 308 - 4 312.(in Chinese))
- [21] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 2001: 997 - 1 002.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》将主要发表下列内容的文章:

- (1) 岩体变形破坏过程的能量机制;
- (2) 灾害环境下岩石工程安全性的智能分析评估和时空预测系统;
- (3) 考虑地震动空间非一致性的岩体地下洞室群地震反应分析研究;
- (4) 地球内外动力耦合作用下地质灾害演化;
- (5) 关于汶川大地震的工程地质力学思考;
- (6) 脆性岩石各向异性损伤和渗透性演化规律研究;
- (7) 断续节理直剪试验与 PFC 数值模拟分析;
- (8) 岩土材料弹性力学模型与计算方法;
- (9) 白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价。