

水位变动条件下土坡变形累积致损特性

林 蓓¹, 罗方悦², 张 嘎²

(1.清华大学 基建规划处,北京 100084;2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘 要:水位变动易引起边坡破坏,造成巨大损失。合理评价水位变动条件下边坡安全性需要阐明其破坏机理,为此进行了水位变动条件下土坡离心模型试验。试验结果表明,水位变动首先在坡体中下部引起局部破坏,该局部滑裂面向上发展至坡顶形成了完整滑裂面。土坡破坏不是瞬时发生的,水位变动过程引起的变形局部化累积是土坡发生破坏的本质原因。水位变动导致土坡变形局部化程度单调增加,此外局部破坏在其附近引起新的变形局部化并在坡体内扩展。水位变动条件下土坡表现出变形局部化累积与破坏过程的显著耦合特性,这是土坡破坏分析方法需要合理反映的。

关键词:土坡;局部变形;水位变动;离心模型试验;破坏机理

中图分类号:TU411.93

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2019)06-0073-04

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Slope Failure Due to Local Deformation Accumulation under Water Level Fluctuation

LIN Lü¹, LUO Fang-yue², ZHANG Ga²

(1.Construction and Campus Planning Office, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Water level fluctuation has induced a large number of slope failures, resulting in huge losses of life and property. Clarifying the failure mechanism is a requisite for a reasonable evaluation on slope safety under water level fluctuation condition. Such mechanism was investigated using centrifuge model tests in the present research. Test results demonstrate that water level fluctuation gave rise to local failure in the mid-lower part of the slope which developed upwards until the final slip surface was formed. The accumulation of local deformation, instead of instantaneous destruction, is the fundamental cause of slope failure under water level fluctuation. The local deformation developed monotonically and further triggered new local deformations around and extended in the slope. In summary, the extinct coupling of local deformation accumulation and failure process under water level fluctuation should be well considered in the analysis of slope failure.

Key words: soil slope; local deformation; water level variation; centrifuge model test; failure mechanism

1 研究背景

高坝大库的水位变动导致边坡安全性下降^[1-3],造成严重的生命财产损失,因此,需要发展有效的水位变动条件下的边坡稳定性分析方法。实际工程中常采用极限平衡等方法计算水位变动条件

下的边坡稳定性。这类方法不能考虑边坡的受载历史和渐进破坏过程机理,存在着本质上的缺陷。近年来,研究人员将有限元等数值方法用于边坡稳定性问题,并开展了较深入的研究^[3-5]。不过由于模型、算法等问题,仍难以直接用于工程设计,其核心问题在于尚未阐明水位变动条件下边坡的破坏机理。

收稿日期:2017-11-07;修回日期:2018-01-14

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2018YFC1508503);国家自然科学基金项目(51479096)

作者简介:林 蓓(1984-),女,福建厦门人,工程师,硕士,主要从事工程安全性研究。E-mail: linlv@tsinghua.edu.cn

土工离心模型试验已经成为边坡破坏机理研究的主要手段^[6-8],并用于研究降雨入渗、水位变动等条件下边坡变形破坏特性^[9-10]。不过,水位变动条件下边坡变形破坏机理复杂、影响因素多,尚有待进行系统深入的研究。

本文进行了水位变动条件下土坡变形破坏的离心模型试验,观测了土坡的变形破坏过程,从变形发展和变形局部化累积的角度分析土坡破坏的内在原因,探讨了水位变动条件下的土坡破坏机理。

2 试验设备与方案

离心模型试验中,对原型材料按比尺 $1:n$ 制成模型,利用离心力模拟重力使重力加速度增大 n 倍,从而使模型的应力状态与原型的应力状态相同,且两者的变形与破坏过程保持相似。因此,可以利用离心模型试验在原型应力状态下研究和观察水位变动条件下土坡的变形与破坏过程。表 1 给出了离心加速度为 ng 时试验中原型与模型主要物理量的相似比。

表 1 离心模型试验相似比

Table 1 Similarity ratio of centrifuge model test

物理量	相似比	物理量	相似比
加速度	$1/n$	应变	1
位移	n	时间	n^2
应力	1		

本文离心模型试验在清华大学 50 g -t 土工离心机上进行,该土工离心机的有效半径为 2 m。试验采用自主研发的离心机上模拟设备来模拟离心模型试验中的水位变动。模型置于长、宽、高分别为 60,20,50 cm 的铝合金模型箱内。

土坡模型采用颗粒相对密度为 2.7 的粉质黏土制备。该土的液限和塑限分别为 25% 和 18.5%,试验用土的含水量为 18%。制样时先按照每 5 cm 的厚度分层击实至预定干密度 1.55 g/cm^3 。填筑完成后,再削坡至 1:1。土坡模型高为 25 cm,如图 1 所示。为了减小模型箱对土坡的影响,在土坡底部预留 5 cm 的地基,并在模型箱与土坡接触的地方涂抹硅油。在土坡侧面随机嵌入白色水磨石,以形成显著的灰度分布差异,满足图像位移测量要求(图 1)。根据试验确定土的强度参数为:黏聚力 33 kPa、内摩擦角 27° 、土的渗透系数约为 $3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

进行离心模型试验时,首先在不蓄水条件下对土坡模型逐级增加离心加速度到 5 g 的倍数,直至 50 g 。每级荷载施加完成后需待土坡变形稳定后再

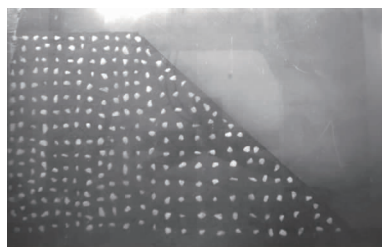


图 1 土坡模型照片

Fig.1 Photograph of slope model

施加下一级荷载。当离心加速度达到 50 g 、待土坡变形稳定后,再开始蓄水至高于坡脚 200 mm。蓄水完成且待土坡变形稳定后,再逐级降水至土坡发生完全破坏。

采用置于模型箱底部的孔压传感器测量土坡的水位。在模型箱长度方向的一侧安装厚 4 cm 的有机玻璃,采用离心场图像采集与位移测量系统观测土坡的变形破坏情况并记录为图像系列^[11]。采用相关分析算法分析图像系列可以测定土坡上任意一点(不限于坡表)的位移,其精度为 0.03 mm。

需要说明的是,在离心模型试验中,坡体的应力场很难测量,测量精度也不高。而且,埋设应力计等传感器会干扰坡体的变形破坏。针对这一问题,本文采用“变形与破坏过程集成分析”的研究新思路,以可测的变形定量地追踪和描述土坡的变形和破坏过程,分析土坡的渐进破坏机理。

3 土坡变形破坏特性分析

图 2 给出了离心模型试验水位变动过程中土坡坡肩沉降的时程曲线。从图 2 可以看出,坡肩沉降在蓄水初期增长缓慢,在水位达到一定高度后增长变快。坡肩沉降在蓄水完成后逐渐趋于稳定,在水位下降过程中则增长较快。在第 3 次降水过程中坡肩沉降增长很快,意味着此时土坡发生了滑动破坏。上述分析表明,水位变动导致土坡发生了显著变形。

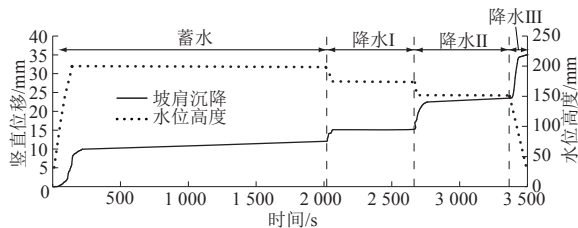
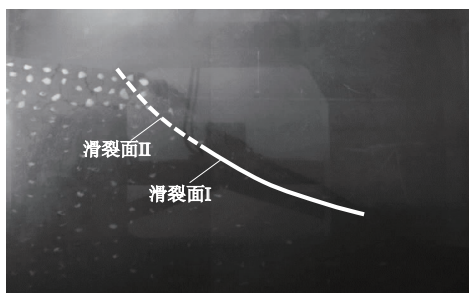


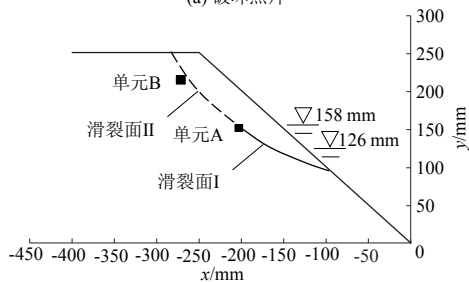
图 2 试验中水位变动过程及坡肩沉降时程曲线
Fig.2 Histories of water level variation and slope shoulder settlement in centrifuge model test

试验观测结果表明,当水位下降至 126 mm 时,土坡发生了滑动破坏。图 3(a) 给出了土坡最终破坏的照片,并用实线和虚线示出了滑裂面。可以看出滑

裂面总体上较为光滑。进一步分析可以发现滑裂面并非瞬时出现,而是分阶段出现的。图3用不同线型标明了不同阶段的滑裂面。当水位下降至158 mm(降水Ⅱ阶段)时,土坡中下部出现局部破坏,形成滑裂面Ⅰ。随着降水继续,当水位下降至126 mm时(降水Ⅲ阶段),滑裂面Ⅰ向上发展,土坡中上部出现滑裂面Ⅱ,从而形成了完整的滑裂面。



(a) 破坏照片



(b) 滑裂面示意图

图3 土坡破坏形态

Fig.3 Failure state of slope

为了方便描述测量点位置,如图3(b)所示,以坡脚为原点建立直角坐标系,其中 x 轴以水平向右为正, y 轴以竖直向上为正。土坡的水平位移则分别以向右和向下为正。图4分别给出了土坡

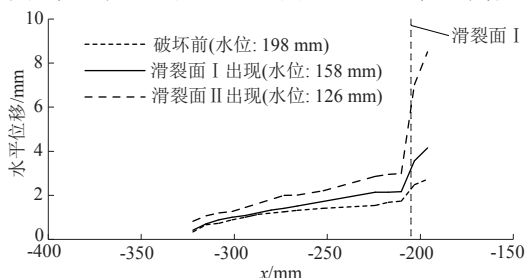
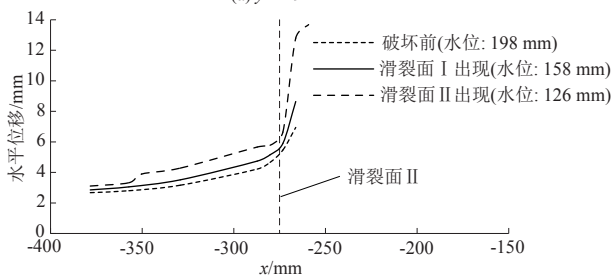
(a) $y=149$ mm(b) $y=228$ mm

图4 降水过程中土坡位移水平分布曲线

Fig.4 Horizontal distribution of displacement of slope during water level drawdown

中下部与中上部水平位移在水位下降过程中的水平分布。从图4可以看出,土坡的水平位移从坡内向坡外单调增长,且随着水位下降而逐渐增大。在土坡中下部,土坡水平位移在滑裂面Ⅰ附近区域存在着一个明显拐点,表明该区域位移梯度很大,出现显著的变形局部化。这一变形局部化出现在滑裂面Ⅰ形成之前(图4(a),水位198 mm),并在滑裂面Ⅰ形成之后显著增强(图4(a),水位126 mm)。坡体中上部的位移分布也存在着同样的规律(图4(b))。在滑裂面Ⅱ形成之前,其附近区域已经出现较其他位置更大的水平位移梯度,表明此处区域变形局部化更加显著。该变形局部化随着水位下降逐渐增强,最终导致该处发生破坏。

上述分析表明,水位变动引起坡体变形并产生显著的变形局部化。该变形局部化逐渐增强并导致了坡体发生局部破坏。局部破坏发生后进一步加剧了其附近变形局部化程度。也就是说,变形局部化和坡体破坏表现出显著的耦合特性。

4 土坡破坏机理分析

上文分析表明,土坡的最终破坏不是仅由当前荷载作用造成的,而是水位变动不断引发的土坡“损伤”逐渐累积达到极限的结果。因此,需要从土坡累积损伤的角度来分析其破坏机理。从本文试验结果来看,可以通过变形局部化发展过程来刻画损伤累积。为了定量描述变形局部化程度,引入类似于数理统计中的“方差”概念的单元位移“差异度”^[12],即

$$C = \frac{n \sum_{i=1}^n w_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n w_i \right)^2}{An(n-1)} \quad (1)$$

式中: C 是差异度; n 是测点数; A 是分析区域的面积; w 是待测单元中均匀分布的各测点的位移。本文中取单元的边长为10 mm。已有研究表明,位移差异度越大,则该处的变形局部化程度越高^[12]。

图5(a)给出了坡体中下部滑裂面Ⅰ附近某单元A(单元位置见图3(b))的竖向位移差异度时程。可以看出,在水位上升和下降过程中,该单元位移差异度单调增长。这意味着水位变动导致变形局部化不断累积,特别是第Ⅱ次降水初期的迅速增加导致了滑裂面Ⅰ发生。坡体中上部滑裂面Ⅱ附近单元B的差异度变化也可以得出类似的规律(图5(b))。该单元的竖向位移差异度在水位变动过程中单调增长,达到一定阈值后滑裂面Ⅱ出现。因此可以推

断,水位变动引起变形局部化累积是土坡发生破坏的根本原因。也就是说,土坡破坏不是瞬时发生的,而是水位变动持续作用下损伤累积的结果。土坡破坏分析需要刻画和追踪变形局部化累积过程特性。

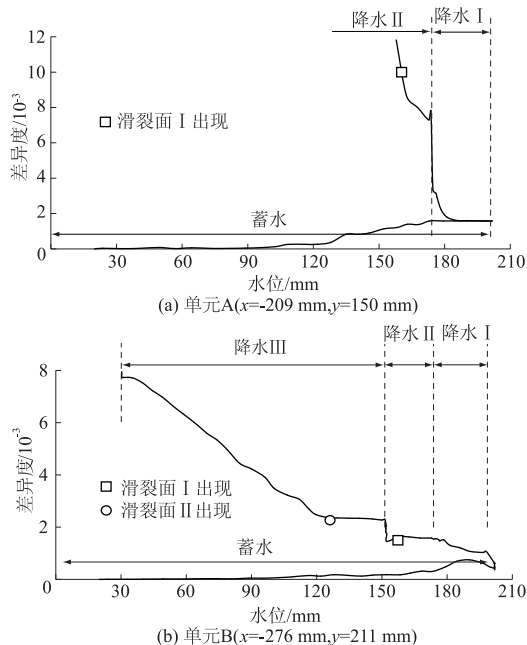


图5 土坡典型单元竖向位移差异度时程

Fig.5 Histories of diversity degree of vertical displacement of typical elements of the slope

进一步观察图 5(b) 可以看到,在滑裂面 I 出现后,在水位不变条件下单元 B 的差异度仍明显增加,这意味着该处变形局部化程度增强。可以推断,这一变形局部化增强主要是由于坡体中下部发生局部破坏导致的。也就是说,滑裂面 I 引起了新的变形局部化,并扩展到坡体中上部。这一结果再次表明图 4 得出的结论,即:水位变动条件下土坡破坏过程与变形局部化是耦合的。局部破坏引起变形局部化发生和扩展,变形局部化增强导致新的局部破坏。

5 结 论

进行了水位变动条件下土坡离心模型试验,观测了土坡的破坏过程和位移时程,分析了土坡变形破坏特性及破坏机理。得到以下主要结论:

(1) 水位变动导致土坡发生显著变形及滑动破坏。破坏是在水位下降过程中分阶段发生的,首先在坡体中下部出现局部滑裂面;水位继续下降导致该局部滑裂面向上发展至坡顶形成了完全破坏。

(2) 土坡破坏不是瞬时发生的,而是变形局部化累积到一定程度的结果。水位变动过程引起的变形局部化累积是土坡发生破坏的本质原因。

(3) 水位变动过程中,土坡的变形局部化程度单调增加。此外,局部破坏在其附近引起新的变形局部化并在坡体内扩展。

(4) 水位变动条件下土坡的破坏机理可以表征为变形局部化累积与破坏过程的显著耦合特性。土坡破坏分析方法需要刻画和追踪这一耦合特性。

参考文献:

- [1] 唐志政, 汪 洋, 吴 晔. 库水位波动条件下万州瓦窑坪滑坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 129-133.
- [2] 罗方悦, 张 嘎. 水库区均质边坡安全可靠度简化实用分析方法[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(7): 106-110.
- [3] 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.
- [4] 汪 斌, 唐辉明, 朱杰兵, 等. 考虑流固耦合作用的库岸滑坡变形失稳机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4484-4489.
- [5] 唐晓松, 郑颖人, 唐辉明, 等. 水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 940-947.
- [6] TAKASHI H, SHINICHIRO T, ATSUSHI Y, *et al.* Independent Reinforced Soil Structure with Pile Foundation-Piled Geo-wall: An Experimental Study on the Application to Seismic Measure for Embankment[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5): 565-571.
- [7] VISWANADHAM B V S, RAJESH S. Centrifuge Model Tests on Clay Based Engineered Barriers Subjected to Differential Settlements[J]. Applied Clay Science, 2009, 42(3/4): 460-472.
- [8] ZORNBERG J G, SITAR N, MITCHELL J K. Performance of Geosynthetic Reinforced Slopes at Failure[J]. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(8): 670-683.
- [9] WANG Rui, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge Modelling of Clay Slope with Montmorillonite Weak Layer under Rainfall Condition[J]. Applied Clay Science, 2010, 50(3): 386-394.
- [10] 杨春宝, 朱 斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261-1271.
- [11] ZHANG Ga, HU Yun, ZHANG Jian-min. New Image Analysis-based Displacement-measurement System for Geotechnical Centrifuge Modeling Tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87-96.
- [12] ZHANG Ga, WANG Li-ping. Integrated Analysis of a Coupled Mechanism for the Failure Processes of Pile-reinforced Slopes[J]. Acta Geotechnica, DOI: 10.1007/s11440-015-0410-z.