

DOI: 10.11779/CJGE2023S10036

降水条件下抗滑桩-锚杆加固边坡的离心模型试验研究

张泽蔚, 刘素嘉, 张 嘎

(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: 锚杆抗滑桩是一种加固边坡的有效结构。本文进行了水位下降条件下素土坡与锚杆抗滑桩组合结构加固土坡的离心模型试验, 测量了边坡的位移场变化, 分析了锚杆抗滑桩的行为以及土体的变形特性。试验结果表明, 锚杆抗滑桩加固导致边坡位移显著减小、改变了滑裂面连续性, 并使得坡体破坏表现出显著渐进性。水位下降条件下锚杆抗滑桩加固土坡的破坏过程与变形局部化表现出显著的耦合特性。锚杆抗滑桩结构使得边坡变形均匀化, 阻挡了桩侧土体滑动, 从而延迟了边坡破坏。

关键词: 边坡; 抗滑桩; 锚杆; 离心模型试验; 桩土相互作用

中图分类号: TV22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0206-04

作者简介: 张泽蔚(2003—), 男, 本科, 主要从事边坡工程方面的研究。E-mail: zhang-zw21@mails.tsinghua.edu.cn。

Centrifuge modeling of anti-slide piles with anchored bolt-reinforced slopes under drawdown conditions

ZHANG Zewei, LIU Sujia, ZHANG Ga

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

Abstract: The anti-slide pile with anchored bolt is an effective structure for reinforcing side slopes. The centrifugal model tests are conducted to compare the unreinforced slope with the anchor-pile-reinforced one under drawdown conditions. The histories of displacement of slopes are measured. The behavior of the anti-slide pile with anchored bolt and the distribution of strain of soil are analyzed. The test results show that the anti-slide pile with anchored bolt significantly reduces the displacement of landslide, changes the continuity of slip surface and causes obvious progressive failure behavior. Under the drawdown conditions, the failure process of the anchor-pile-reinforced slope exhibits significant coupling with the deformation localization. The anti-slide pile with anchored bolt homogenizes slope deformation and resists the displacement of soil, therefore delaying the failure of side slopes.

Key words: side slope; anti-slide pile; anchored bolt; centrifugal model test; soil-structure interaction

0 引 言

近年来, 中国已建成多座高坝大库, 库区水位变动带的滑坡现象也大量出现, 造成了严重的人员伤亡和财产损失, 库区边坡安全面临重大挑战。

抗滑桩-锚杆组合结构是一种比传统抗滑桩受力更加合理的加固结构, 近年来已经在工程中得到广泛应用, 但其加固机理以及安全性评价研究仍落后于工程实践, 并缺乏完善的设计规范^[1]。刘英朴等^[2]提出了锚杆抗滑桩内力计算的初参数法, Dong 等^[3]基于多种破坏模式, 建立了同时考虑锚杆预应力和桩体影响的复合材料结构稳定性分析模型; Wang 等^[4]研究了锚杆抗滑桩的内力分布与组合加固机理, Huang 等^[5]研究了锚杆抗滑桩在地震响应下的破坏模式; 郑颖人等^[6]通过极限平衡法计算了水位下降时边坡的安全系数; Liu 等^[7-8]进行了水位变动条件下普通抗滑桩的离

心模型试验。现有研究大多关注于滑坡过程中桩的响应情况, 缺乏对桩土耦合规律的认识, 特别是很少涉及水位变动条件下锚杆-桩-土的相互作用机制。

本文采用离心模型试验方法, 再现了水位下降时锚杆抗滑桩组合结构加固黏性土坡的变形和破坏过程。测量了土坡的位移变化, 分析了土坡的破坏形式, 探讨了锚杆抗滑桩结构的加固机理。

1 试验设备与条件

1.1 设备

离心模型试验采用清华大学土工离心机进行。该离心机的有效半径为 2 m, 最大加载能力为 50g·t, 最

基金项目: 清华大学自主科研计划课题; 国家自然科学基金重点项目 (52039005)

收稿日期: 2023-07-05

大离心加速度为 $250g$ 。试验使用的铝合金模型箱尺寸为 $60\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高), 模型箱一侧装有有机厚玻璃, 并在该侧固定摄像头, 对试验过程中水位变化和边坡变形情况进行拍摄。模型箱连接有输水管道和排水管道, 可以在离心过程中远程控制水位升降^[9]。

1.2 非接触位移测量系统

本试验采用基于光信号的高质量图像采集与位移测量系统记录离心场中边坡与结构的位移^[10]。基于图像系列, 通过像素灰度相关系数分析捕捉标定点, 可以测量模型任意点任意时刻的位移^[10]。相较于传感器测量方法, 非接触位移测量系统可以避免仪器布设对试验模型的干扰, 同时可以得到模型侧面任意点的位移场。

需要指出, 本文测量结果均以模型尺寸表示。位移在水平方向以指向坡外为正、在竖直方向以向下为正。

1.3 试验模型

试验分别针对锚杆抗滑桩加固土坡和未加固的素土坡进行。图 1, 2 分别给出了加固土坡的模型照片和结构示意图。两种土坡除了锚杆抗滑桩加固结构外, 其他条件均相同。土坡采用黏性土制备, 土的干密度为 1.6 g/cm^3 , 初始含水率为 18% 。饱和黏性土的内摩擦角为 30° , 黏聚强度为 27 kPa 。坡高 23 cm , 坡度 $0.8:1$, 坡顶宽 18 cm 。制样时按干密度控制分 6 层击实, 其中底层为厚 7.5 cm 的水平垫层, 用以防止边坡底面与模型箱直接接触产生的摩擦力干扰试验。加固土坡底层击实后摆放抗滑桩, 第二层击实后插入锚杆末端, 之后逐层击实。在土坡紧贴有机玻璃侧嵌入随机分布的白色泡沫片 (图 1), 以形成具有随机性分布的较大像素灰度差的测量区域, 便于进行基于相关分析的位移测量。完成土坡制样后在模型箱侧壁均匀涂抹凡士林以减小摩擦, 进而减小边界效应对试验的影响。

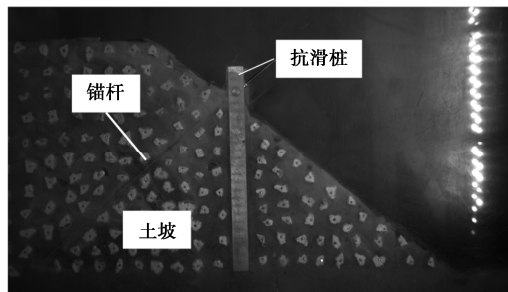


图 1 加固土坡模型照片

Fig. 1 Photo of reinforced slope model

本试验采用方形钢管作为模型桩, 桩高 200 mm , 截面正方形边长 15 mm 。材料弹性模量为 70 GPa , 泊松比为 0.3 。加固土坡中共排布 4 根桩, 间隔为 67 mm 。特别地, 为了真实反映模型剖面的情况, 与模型箱两

侧壁接触部分采用半截面桩。锚杆采用外径 3 mm 、长 320 mm 、表面刻有螺纹的铝制细杆。锚杆铰接于距桩顶 23 mm 处。

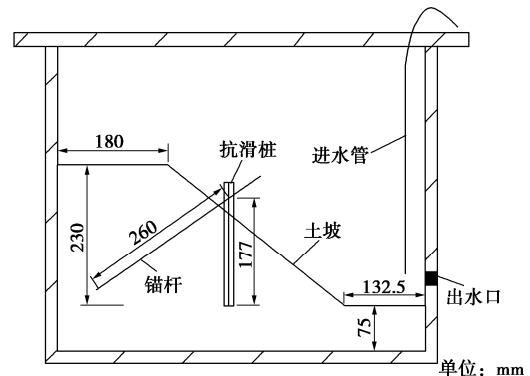


图 2 加固土坡模型示意图

Fig. 2 Schematic view of reinforced slope model

1.4 试验过程

将模型箱放入离心机后, 以 $10g$ 为梯度逐级增加离心加速度, 待每一级土坡沉降稳定后再增加下一级加速度, 直至达到 $50g$ 。土坡在 $50g$ 离心场沉降稳定后, 以 50 mm 为梯度从 0 mm 开始增加水位, 待每一级水位稳定 (即充分渗流) 后再增加下一级水位直至水位达到 200 mm 。此时等待 15 分钟确保水充分渗流进入边坡。之后打开排水口, 水位从 200 mm 降至 0 mm 。降水过程进行全程录像。

2 破坏特性

图 3 给出了素土坡与加固土坡滑裂面及其发展过程, 可以发现锚杆抗滑桩结构改变了滑裂面连续性。加固土坡的滑裂面在桩左侧从坡顶延续至桩脚; 在桩右侧从桩中下部延续至坡脚。

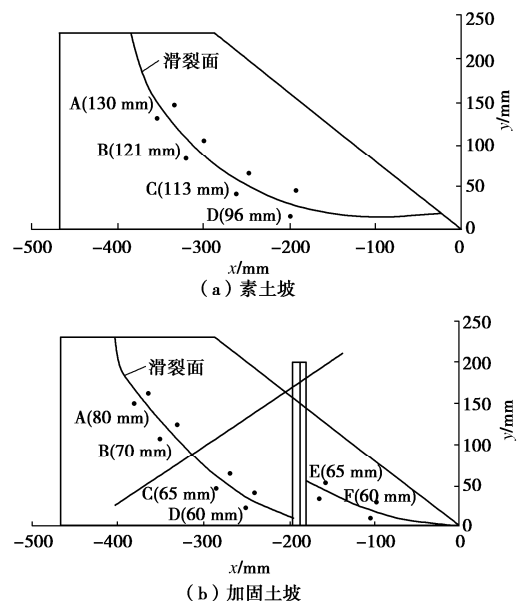


图 3 素土坡与加固土坡破坏过程

Fig. 3 Failure process of unreinforced and reinforced slopes

图4为加固土坡沿滑裂面两侧连线垂直于滑裂面切线的一组点对的切向相对位移 d_s 和法向相对位移 d_n 随水位的变化(点对的位置见图3)。可以观察到,该点对的切向相对位移在某一水位之后快速增加,该水位可认为是土坡在这一位置的破坏水位。其他点对的相对位移也有相同的规律,破坏水位在图3中点对旁的括号中标出。可以发现,素土坡的破坏过程为沿滑裂面从上至下破坏,加固土坡在桩两侧分别沿各自的滑裂面从上至下破坏。同时,加固土坡破坏水位低于素土坡,说明锚杆抗滑桩加固后边坡能够抵抗更大幅度的水位下降,边坡安全系数提高。

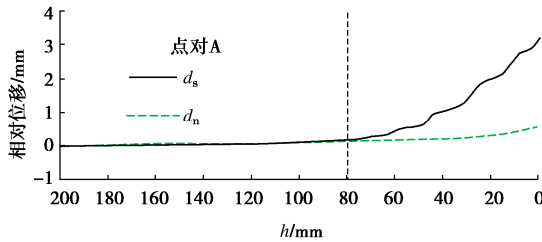


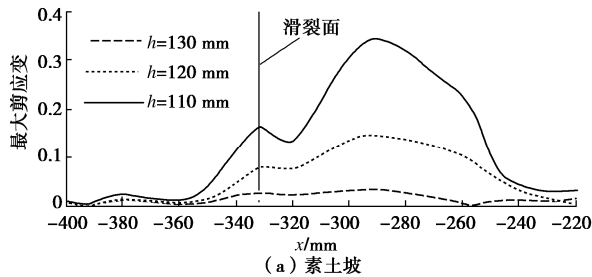
图4 加固土坡点对相对位移

Fig. 4 Relative displacements of point couples in reinforced slope

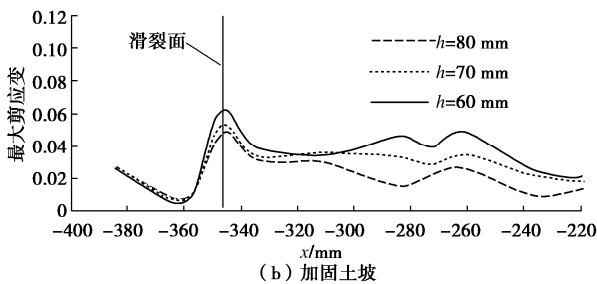
3 机理分析

3.1 破坏机理

图5给出素土坡和加固土坡的最大剪应变水平分布。两土坡最大剪应变都在滑裂面处达到极大值。并且可以发现,加固土坡在破坏前(如水位为80 mm时)滑裂面附近已经出现较大应变,说明土坡出现了变形局部化,并导致了局部破坏;而另一方面,在破坏后(如水位为60 mm时)最大剪应变继续增加,说明局部破坏进一步增强了其附近的变形局部化程度,破坏过程与变形局部化呈现相互耦合的特点。



(a) 素土坡



(b) 加固土坡

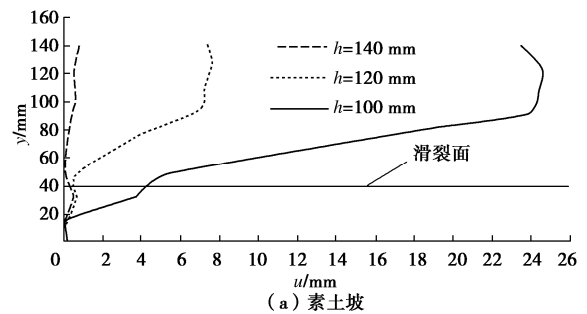
图5 $y=120$ mm 最大剪应变水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of maximum shear strain at $y=120$ mm

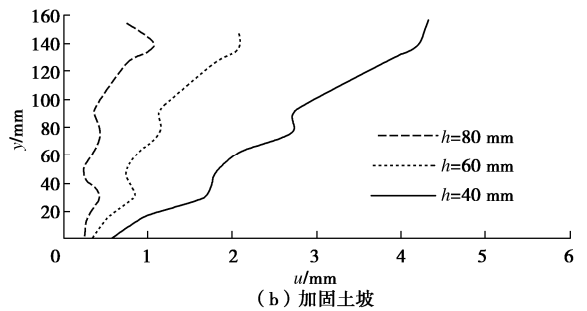
3.2 加固机理

对比图5(a), (b)可以发现,加固土坡最大剪应变的最值明显小于素土坡。同时注意到素土坡的高剪应变集中分布在一个区间内,而加固土坡的高剪应变区较为均匀。这说明锚杆抗滑桩通过减小土坡的变形局部化程度、均匀化土坡变形以增强边坡稳定性。另一方面,考虑两土坡剪应变分布随水位的变化可以发现:在素土坡中,破坏前剪应变较小,破坏时剪应变快速增大并在破坏后继续增大;而在加固土坡中,破坏前后剪应变变化幅度不大。这一现象说明素土坡破坏呈现突变性,而加固土坡在破坏前已经具有变形局部化现象,体现了渐进破坏的特点。

图6给出了素土坡与加固土坡在桩内侧附近的水平位移的竖向分布。可以发现,素土坡的位移在下部几乎为0,在滑裂面处发生陡增,在上部基本不变。同时,由于抗滑桩是刚性结构,在转动过程中位移随高程线性分布,所以加固土坡桩内侧土体的水平位移也随高程近似线性分布,且相比素土坡显著减小。该现象说明抗滑桩改变了土体的位移大小与分布,通过限制桩侧土体滑动起到加固作用。



(a) 素土坡



(b) 加固土坡

图6 $x=-210$ mm 水平位移竖向分布,

Fig. 6 Vertical distribution of horizontal displacement at $x=-210$ mm

图7给出了水位 $h=40$ mm时两土坡水平位移水平分布的对比图。可以看出,素土坡与加固土坡的水平位移在坡较深处都基本为0,在某一点后开始从零增加(由图7中虚线标出),该位置反映出坡体破坏的最深影响位置。对比两图可以发现,在较高高程处素土坡的最深影响位置显著深于加固土坡,而在较低高程处最深影响位置整体后移,且加固土坡的最深影响位

置深于素土坡。这一现象说明锚杆抗滑桩结构改变了坡体的位移分布。坡体上部经加固后受破坏影响小, 而坡体下部由于锚杆结构将力传至土体深层而加深了坡体破坏的最深影响位置, 反映出锚杆抗滑桩使整个坡体位移分布更加均匀。

综合来看, 锚杆抗滑桩结构降低了边坡的破坏水位, 推迟了破坏过程, 限制了桩侧土体滑动, 进而减小了滑动体位移, 使整个边坡抗滑力增加, 安全系数提高。

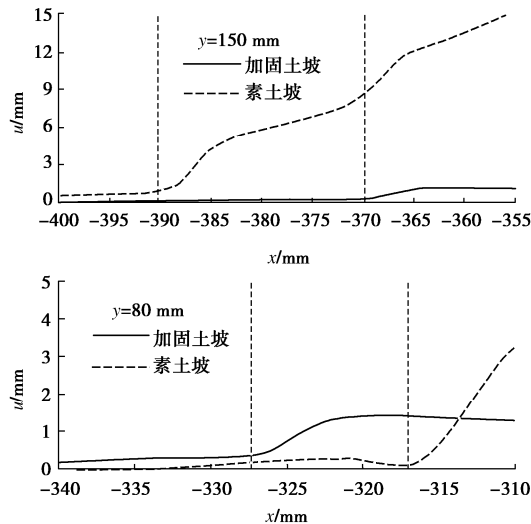


图 7 水位 $h = 40$ mm 水平位移水平分布

Fig. 7 Horizontal distribution of horizontal displacement at water level $h = 40$ mm

4 结 论

本文进行了水位下降条件下素土坡与锚杆抗滑桩组合结构加固边坡的离心模型试验, 测量了水位下降过程中边坡和加固结构的位移, 分析了土坡的变形破坏特性和组合结构加固机理, 得到了以下 4 点结论。

(1) 锚杆抗滑桩加固结构减小了滑动体的位移, 推迟了土坡的破坏过程, 提高了土坡的稳定性。

(2) 锚杆抗滑桩改变了滑裂面的位置和连续性, 增强了坡体破坏的渐进性。

(3) 水位下降条件下锚杆抗滑桩加固土坡的局部破坏与变形局部化的过程表现出显著的耦合特性。

(4) 锚杆抗滑桩使得土坡变形均匀化, 限制了桩侧土体的滑动, 提高了土坡的安全系数。

参考文献:

[1] 李寻昌, 门玉明, 王娟娟. 锚杆抗滑桩体系的群桩、群锚效应研究现状分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(增刊 2):

56-59. (LI Xunchang, MEN Yuming, WANG Juanjuan. Analysis on research reality of the effects of pile groups and anchor groups in anchor anti-slide piles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(S2): 56-59. (in Chinese))

[2] 刘英朴, 门玉明, 蔺兴淼, 等. 锚杆抗滑桩内力计算的初参数法研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 57-60. (LIU Yingpu, MEN Yuming, LIN Xingmiao, et al. The initial parameter method study on the internal force calculation of anchor anti-slide pile[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(6): 57-60. (in Chinese))

[3] DONG X G, LI Z, CUI Z Z, et al. Stability analysis of the pile-prestressed anchor composite structure based on failure mode[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: 106223.

[4] WANG C T, WANG H, QIN W M, et al. Experimental and numerical studies on the behavior and retaining mechanism of anchored stabilizing piles in landslides[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(10): 7507-7524.

[5] HUANG Y, XU X, LIU J J, et al. Centrifuge modeling of seismic response and failure mode of a slope reinforced by a pile-anchor structure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131: 106037.

[6] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1115-1121. (ZHENG Yingren, TANG Xiaosong. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115-1121. (in Chinese))

[7] LIU S J, LUO F Y, ZHANG G. Centrifuge model tests on pile-reinforced slopes subjected to drawdown[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(6): 1290-1300.

[8] LIU S J, LUO F Y, ZHANG G. Pile reinforcement behavior and mechanism in a soil slope under drawdown conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 4097-4109.

[9] LUO F Y, ZHANG G. Progressive failure behavior of cohesive soil slopes under water drawdown conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 1-12.

[10] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87-96.

(编校: 孙振远)