

模拟库水位变化的抗滑桩加固边坡 离心模型试验研究

李邵军¹, KNAPPETT J A², 冯夏庭¹, 陈静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: 抗滑桩是边坡深层抗滑最为有效的措施之一, 以三峡库区边坡抗滑桩加固工程为背景, 利用离心模型试验手段, 模拟库区蓄水和水位循环变化条件下失稳边坡的抗滑桩加固机制。详细介绍相应的离心模型试验方法, 通过对一系列自然边坡和不同桩间距条件下的模型试验, 获得库水位变化影响下的边坡变形、破坏模式和抗滑桩受力, 探讨滑坡推力的分布以及不同桩间距条件下的抗滑桩-边坡相互作用机制。测试结果表明, 受抗滑桩加固的边坡在水位升降作用下仍发生一定程度的变形并产生裂缝, 随着抗滑桩的直接支挡和桩后土体由于不均匀位移产生土拱效应后, 边坡变形逐渐得到较好的控制。在本试验条件下, 随着桩间距的增大, 边坡变形总体上表现为增大趋势, 但抗滑桩的受力呈现出先增大后减小的抛物线型变化形态, 在某一最适桩间距情况下抗滑桩的抗滑性能得到了最充分的发挥, 而滑坡推力表现出复合三角形分布特征。该研究结果为桩土相互作用和库区边坡抗滑桩加固机制分析提供了直接的试验依据, 对丰富抗滑桩设计理论和库区边坡的防灾减灾研究具有较为重要的意义。

关键词: 边坡工程; 库区边坡; 库水位变化; 抗滑桩加固; 离心模型试验; 最适桩间距

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)05-0939-08

CENTRIFUGAL TESTS ON SLOPE REINFORCEMENT BY ANTI-SLIDING PILES MODELLING CHANGE OF RESERVOIR WATER LEVEL

LI Shaojun¹, KNAPPETT J A², FENG Xiating¹, CHEN Jing¹

(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: Anti-sliding pile is one of the most effective measures for slope reinforcement. On the basis of centrifugal tests modeling the impoundment and cyclical change of water level in the Three Gorges Reservoir, this paper pays attention to the reinforcement mechanism of unstable reservoir slope by anti-sliding piles; and the corresponding test techniques of centrifuge modelling are introduced. A series of centrifuge tests including natural slopes and reinforced slopes with different pile layouts are conducted; slope displacement, failure modes and bending moments of piles are obtained during the testing procedure; the distribution of landslide pushing force, mechanism of pile-slope interaction and arching effect are discussed as well. Results indicate that the deformation of reinforced slope will still occur during the first stage of change of reservoir water level; it will be gradually controlled during the form of arching effect due to different soil displacements behind the piles. Moreover, the bigger the pile spacing is, the weaker reinforced effects are, which leads to the larger slope deformation.

收稿日期: 2008-10-08; **修回日期:** 2009-03-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ951-A1-01); 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, 2005年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位, 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

However, the maximum pile bending moment of each test shows parabolic character, so there must exist an optimal pile spacing under which the reinforcing effect will be the best. In addition, the pushing force acted on the anti-sliding pile obeys multi-triangle configuration. This study provides not only the direct data for the investigation of interaction mechanism between pile and slope, but also the new idea of optimal pile spacing for slope reinforcement design. It will contribute a lot to the theory of slope stabilization by piles and prevention of landslide disaster in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: slope engineering; slope in reservoir area; change of reservoir water level; slope reinforced by anti-sliding piles; centrifugal test; optimum pile spacing

1 引言

中国是一个多山的国家,大规模基础设施建设(如水利水电工程、移民迁建工程、高速公路和铁路等)的快速推进为岩土边坡安全性问题带来了新的挑战^[1]。在三峡地区,由于库区蓄水和季节性水位涨落等因素的影响,边坡的原始平衡遭到破坏,进而导致边坡失稳甚至发生滑坡灾害,这在很大程度上直接威胁到库岸人民的生命财产安全^[2, 3]。如何及时可靠地对失稳边坡(滑坡)进行有效的加固治理,防止滑坡地质灾害的发生,是三峡工程运营期面临的最重要的岩土工程问题之一,在一定程度上也是衡量三峡工程建设成败的一个重要标志。抗滑桩作为一种有效的边坡支挡结构,由于深层抗滑能力强、对滑体扰动相对较小、施工方便等优点,一直是三峡库区高边坡加固和大型滑坡治理广泛采用的主要措施^[4, 5]。

几十年来,国内外针对抗滑桩加固机制及设计计算方法进行了大量的研究,从早期的单纯剪力法、静力平衡法、Blum法逐渐发展到目前通用的弹性地基梁法^[6],以及最近基于有限元和有限差分法,考虑桩土相互作用的桩-边坡系统研究^[7~9]。众所周知,三峡库区经过一期、二期和三期蓄水,大量边坡和滑坡的加固治理工程将全部或部分浸没在水中,抗滑桩和地质体的相互作用在很大程度上还受到库区蓄水和长期库水位升降作用的影响。因此,对于库区边坡而言,在进行抗滑桩加固、设计计算方法的理论和试验研究中,需要考虑库区蓄水和水位循环涨落这一重要影响因素^[10, 11]。

在岩土工程试验研究中,离心模型试验被认为迄今为止相似性最好的物理模型试验方法^[12],可较为真实地模拟现场工程条件,人工塑造具有工程地质特征、支护结构相似和复杂环境影响的边坡,再

现边坡原型和支护结构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^[13~16]。在抗滑桩加固机制的试验研究方面,A. Bouafia等^[17, 18]研究了砂土边坡的抗滑桩在水平荷载作用下的变形行为,杨明等^[19, 20]运用离心机对小比例尺被动桩做了模型试验研究,试验过程中逐步增加离心加速度,边坡土体在固结变形过程中与模型抗滑桩产生相互作用,分析了桩间土拱形成的现象及其破坏模式,并阐述了桩间土拱承载力与桩间净距的关系以及抗滑桩正截面宽度与土拱效应的非线性关系。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,目前尚未见有相关基于离心模型试验的库区边坡抗滑桩加固研究的文献报道。

本文以三峡库区实例滑坡的加固工程为原型,利用离心模型试验手段,在边坡受水位升降影响而失稳破坏离心模型试验前期研究的基础上^[21],进一步考虑了库区边坡蓄水和水位循环涨落条件,实现在离心模型试验过程中对水位升降的模拟,通过不同桩间距的抗滑桩加固失稳边坡离心模型试验,探讨该复杂水环境作用下的边坡变形破坏模式、抗滑桩受力和滑坡推力分布特征,揭示库区边坡在水位循环升降条件下的桩土相互作用机制。

2 试验设计和方法

本次试验是在英国邓迪大学土木工程系的离心模型机(Actidyn C67-2)上进行的,该离心机基本参数包括有效旋转直径6.5 m、最大离心加速度150 g、模型箱尺寸1.0 m×0.8 m×0.8 m。

2.1 试验设计

离心加速度:综合考虑离心机的容许参数和试验原型条件,确定本次试验的离心加速度为100 g。

离心模型：离心模型试验的原型选取秭归县木籽树坪滑坡，根据现场提供的地质和加固设计资料，在相似比 1：100 条件下概化后的库区边坡抗滑桩加固离心模型几何结构如图 1 所示。试验模型由基岩(混凝土)、土坡(由蒙脱石、细砂、有机质和水按一定比例混合而成)和模型抗滑桩(铝合金)组成，制作完成后的离心模型如图 2 所示。

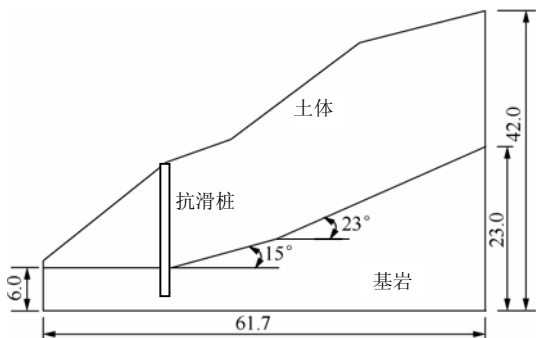


图 1 库区边坡抗滑桩加固离心模型几何结构图 (单位: cm)

Fig.1 Geometry of centrifugal slope model reinforced by anti-sliding piles in reservoir area(unit: cm)



图 2 库区边坡抗滑桩加固离心模型图

Fig.2 Picture of centrifugal model for reservoir slope reinforced by anti-sliding piles

水位升降控制系统：为模拟库区边坡前缘的蓄水和水位循环升降过程，建立了相应的水位变化控制系统^[21]。

试验方案：为探讨失稳边坡的抗滑桩加固机制，分别设计了几种条件下的离心模型试验，即自然边坡失稳试验(试验编号为 SL10)，2B，4B，6B 桩间距(B 为桩宽)条件下抗滑桩加固边坡试验(试验编号分别为 SL12，SL08，SL11)。

水位变化控制：为实现对边坡原型应力和实际变形特征的模拟，在整个试验过程中，当离心加速

度达到 100 g，并待边坡土体由于离心加速度的增大而固结稳定后，再进行相应的水位升降变化。

2.2 试验数据采集

为满足研究分析的需要，根据试验方案设计，需采集的数据有水位变化、边坡位移(水平位移和沉降)、坡体内的孔隙水压力、抗滑桩受力、边坡变形的数字图像和全过程视频。这些数据均通过相应的监测设施如水压计、微型孔隙水压力计、应变计、视频跟踪器和数码摄像机获得(模型箱两侧是由 2 块 50 cm 的透明有机玻璃)，相应的监测信息均通过固定在离心机上的信号线和数据采集卡传输到离心机的远程控制中心。边坡的位移是通过基于数字图像处理原理，面向离心模型试验过程开发的 GeoPIV (geotechnical particle image velocimetry)软件分析实现^[22]。该面向对象的分析软件可以获得边坡剖面上任意大小的单元格网的水平和沉降位移，还可以进一步获得不同时刻的位移矢量和应变云图。

2.3 试验过程

根据试验设计的几何尺寸和边坡岩土体参数，在模型箱内制作相应的自然边坡和抗滑桩加固的边坡离心试验模型，将模型箱固定在离心机上，安装并检测所有测试传感器和视频跟踪系统。试验时逐渐增大离心机的转速，待离心加速度达到 100 g 后继续运行一段时间，确保边坡土体充分完成自身的固结变形。参考三峡库区蓄水和季节性水位涨落条件，试验时通过水位控制系统在边坡前缘蓄水和循环升降水位，试验过程中反映边坡前缘水位变化的水压随时间的变化如图 3 所示。

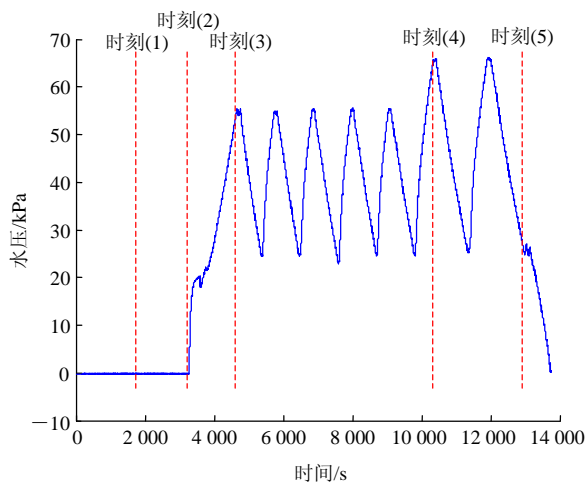


图 3 试验过程中边坡前缘水压随时间的变化

Fig.3 Change procedure of reservoir water pressure of the front of slope during the whole centrifuge test

根据图 3 所示，将本次试验过程和水位循环升降控制步骤描述如下：

第一步：试验开始到离心加速度达到 100 g，到达时刻(1)。

第二步：保持 100 g 离心加速度条件下，边坡土体完成固结变形，到达时刻(2)。

第三步：进行库区蓄水，水位自坡底上升至 55 mm，时刻(2)~(3)。

第四步：降低水位至 25 mm，并不断循环变化水位，模拟库区水位涨落情况，时刻(3)~(4)。

第五步：提高水位升降幅度，变化范围为 25~65 mm，在该幅度下进行 2 个循环后结束试验，时刻(4)~(5)。

3 试验结果及分析

3.1 蓄水和水位升降影响下抗滑桩加固边坡的位移变化特征

取边坡上典型 4 个地表位移点为研究对象，边坡典型地表位移测点布置情况如图 4 所示。

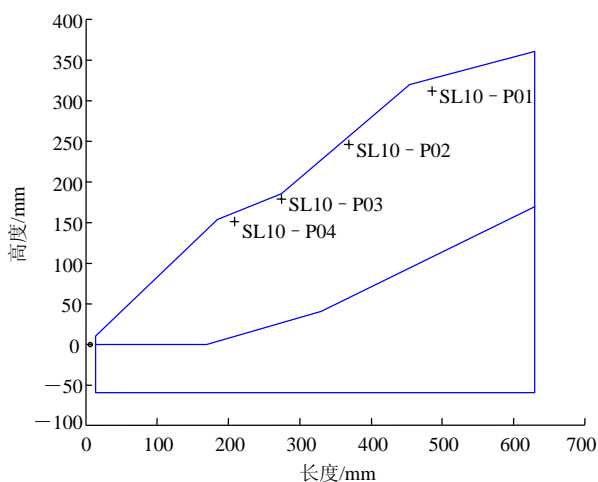


图 4 边坡典型地表位移测点布置

Fig.4 Distribution of some typical surface displacement points

根据方案设计，在前述水位变化条件下，自然边坡失稳离心模型试验典型测点的沉降变化如图 5 所示，不同桩间距加固边坡离心模型试验典型测点的沉降变化如图 6 所示。

通过图 5, 6 所示的典型测点测试结果可以看出，无论自然边坡还是抗滑桩加固的边坡，在离心加速度从 0 增大到 100 g 的过程中，时刻 0~(1)所

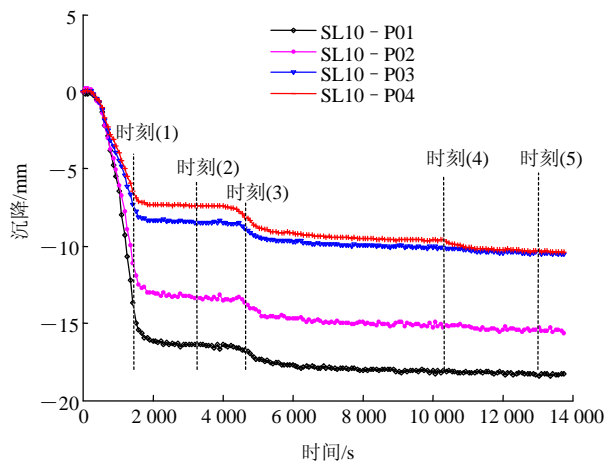
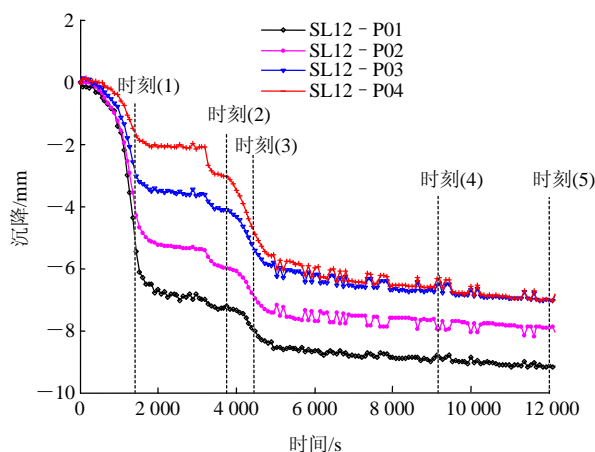
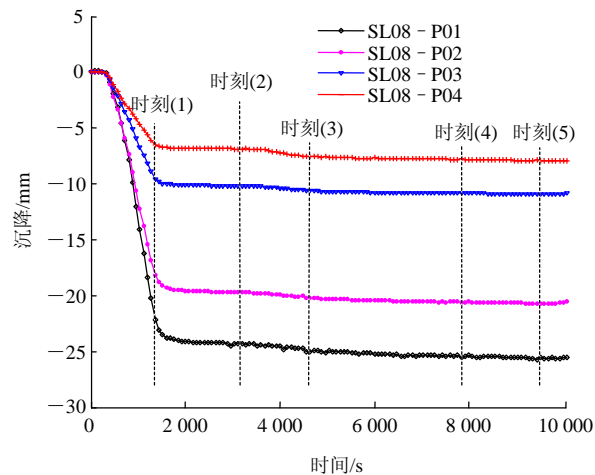


图 5 自然边坡失稳离心模型试验典型测点的沉降变化
Fig.5 Variation of settlements of typical points during the centrifugal test on natural slope

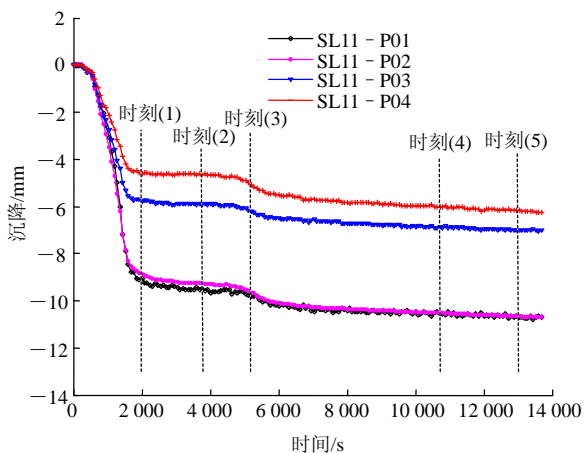
示阶段，边坡土体首先发生了近乎线性的固结变形。由于受每次试验模型制作时的误差以及边坡抗滑桩加固的影响，每个试验在该阶段的沉降相对变化量



(a) 2B 桩间距沉降 - 时间曲线



(b) 4B 桩间距沉降 - 时间曲线



(c) 6B 桩间距沉降 - 时间曲线

图 6 不同桩间距加固边坡离心模型试验典型测点的沉降变化

Fig.6 Variation of settlements of typical points during the centrifugal tests on reinforced slope with different pile spacings

有所差别, 如自然状态边坡 P01 点为 15.0 mm, 6B 桩间距试验的边坡 P01 点为 9.1 mm。其次, 边坡土体在离心加速度达到 100 g 时刻固结变形并未稳定, 在保持 100 g 离心加速度的阶段, 如时刻(1)~(2)所示, 边坡土体在初始阶段继续发生固结变形, 并很快达到稳定, 在曲线图上表现为平直线。而后, 边坡前缘开始蓄水, 如时刻(2)~(3)所示, 边坡发生了较大变形, 受抗滑桩加固的边坡变形明显小于自然状态边坡, 但不同桩间距条件下变形亦差别显著。边坡前缘的 SL10 - P04 点在该阶段的水平位移分别为 0.9, 0.8, 0.5, 0.5 mm。在时刻(3)~(5)所示阶段, 边坡经历了多次水位循环升降的影响, 其最大变形主要发生在第一水位循环条件下, 在变形大小方面, 受抗滑桩加固的边坡明显小于自然状态边坡。根据测试结果, 由于水位升降的作用, 自然边坡、2B, 4B, 6B 桩间距下的边坡 SL10 - P02 测点发生的累计沉降大小依次为 1.83, 1.27, 0.80, 1.62 mm, 而相应的累计水平位移大小依次为 1.60, 1.08, 0.40, 1.40 mm。

3.2 不同桩间距条件下的抗滑桩受力特征

在桩土相互作用过程中, 抗滑桩直接承受桩后土压力和桩间土拱传递的滑坡推力, 因此, 抗滑桩的受力是研究桩土相互作用机制的一个重要参数。为获得试验过程中的抗滑桩受力变化情况, 在模型抗滑桩长度方向的 7 个断面上设计安装有 14 个微型

应变式传感器, 模型抗滑桩的应变计布置如图 7 所示。

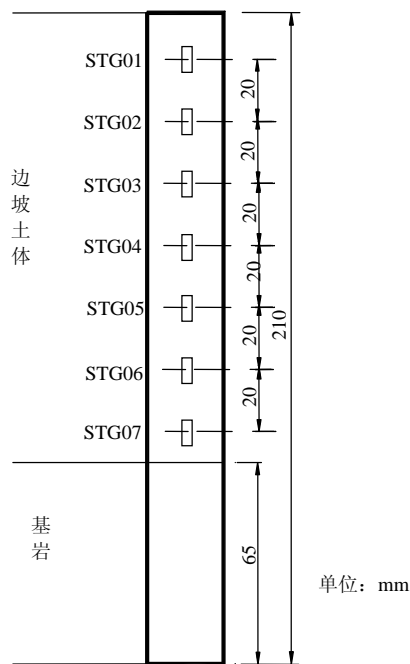


图 7 模型抗滑桩的应变计布置图

Fig.7 Configuration of strain gauges on anti-sliding pile

由于边坡加固的试验过程受到水的影响, 试验前抗滑桩上的微型传感器需进行防水处理和标定, 并通过信号线将传感器测试数据传输到远程的试验控制中心。试验 SL08(4B 桩间距)测试得到的抗滑桩受力分布如图 8 所示, 抗滑桩所受滑坡推力分布可划分为 2 个部分, 在距离抗滑桩顶部 1/4 桩长处为分界线, 上下 2 个部分均可视为三角形分布。

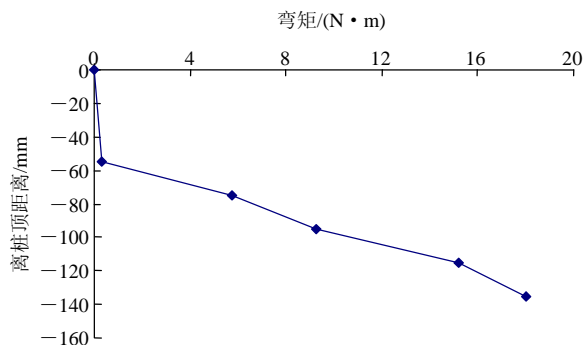
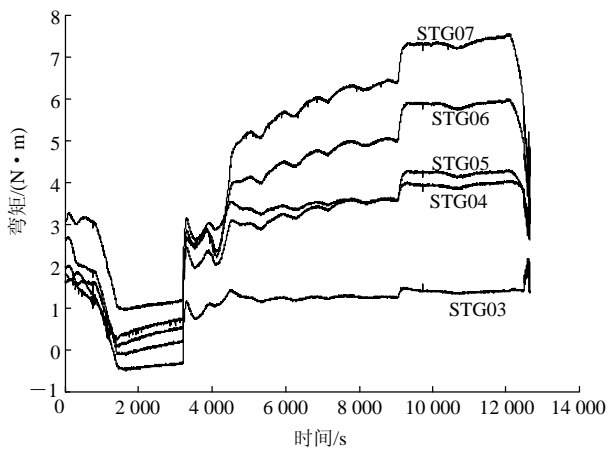


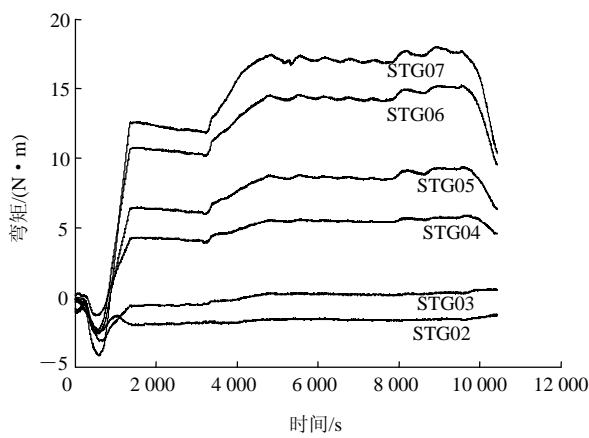
图 8 抗滑桩受力分布图

Fig.8 Distribution of bending moments in different section of anti-sliding pile

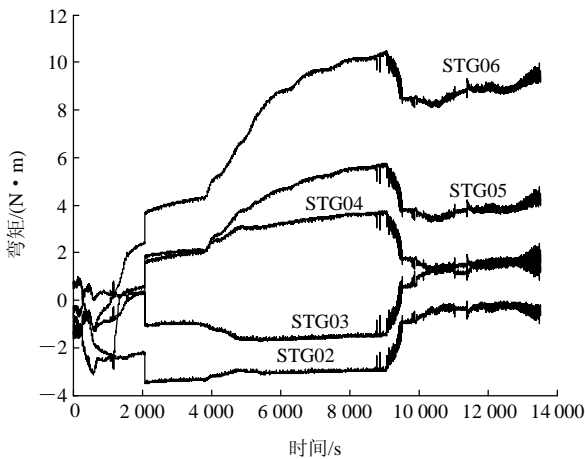
不同桩间距条件下的抗滑桩受力变化如图 9 所示。从抗滑桩的受力测试结果分析, 抗滑桩从桩顶向下至土体和基岩交界面, 所受滑坡推力逐渐增大。



(a) 2B 桩间距条件下(SL12)弯矩 - 时间变化曲线



(b) 4B 桩间距条件下(SL08)弯矩 - 时间变化曲线



(c) 6B 桩间距条件下(SL11)弯矩 - 时间变化曲线

图9 不同桩间距条件下的抗滑桩受力变化

Fig.9 Bending moments of each pair of strain gauges under the condition of different pile spacings

由于 SL11 所用的抗滑桩在防水处理方面的问题, STG07 应变计读数出现了异常, 现取位于土体和基岩交界面附近传感器 STG06 为研究对象, 对于不同

桩间距 2B, 4B, 6B 条件下, 测试得到的最大弯矩分别为 5.9, 15.2, 10.4 N·m。由此可见, 4B 桩间距条件下的抗滑桩受力是最大的。产生这一现象的原因可以从 2 个方面来分析: 首先, 在同一试验条件下, 滑坡推力是相同的, 不同桩间距使得等模型宽度下的抗滑桩数目不同, 假设滑坡推力均由抗滑桩来承担, 从力学平衡条件可以分析, 随着桩间距增大, 每根抗滑桩承受的滑坡推力的应逐渐增大(试验中 6B 桩间距的最大弯矩小于 4B 桩间距的情况, 是因为 6B 桩间距加固边坡发生了失稳, 不满足静力平衡条件)。此外, 从桩土相互作用产生土拱效应角度分析, 4B 桩间距条件下的土拱将应力充分传递到了抗滑桩上, 抗滑桩在该条件下的抗滑性能得到了最充分的发挥。对于 2B 桩间距的情况, 边坡虽然得到了有效加固, 但每根抗滑桩受力较小, 其抗滑性能未得到充分发挥, 在实际工程中造成了较大的浪费。

3.3 边坡的变形破坏模式

在水位升降影响下, 自然边坡变形呈现典型的牵引式破坏模式, 边坡前缘首先产生张拉裂缝, 并逐渐向后缘发展, 滑坡锁固段也产生一系列小裂缝, 通常在失稳过程中形成多级滑面, 基于 GeoPIV 分析得到的自然边坡破坏模式及位移矢量如图 10 所示。对于受到抗滑桩加固的边坡, 在水位升降影响下, 试验各边坡仍然发生了一定程度的变形, 并在边坡体上产生若干宽度较小的裂缝, 随着抗滑桩的直接支挡和桩后土体由于不均匀位移进一步产生土拱效应后, 边坡变形得到较好的控制。另外, 由于

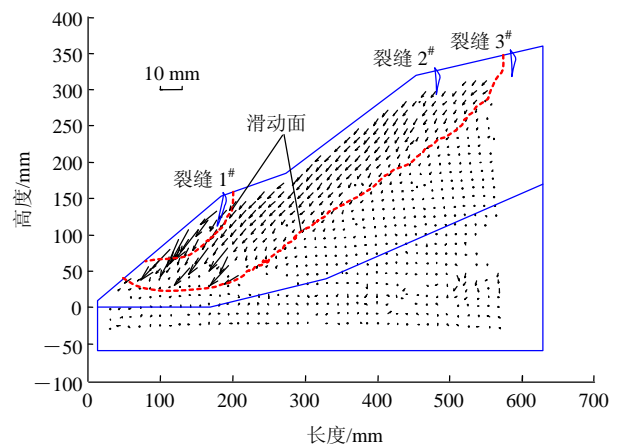


图10 基于 GeoPIV 分析得到的自然边坡破坏模式及位移矢量
Fig.10 Natural slope failure modes and displacement vectors analyzed by GeoPIV

抗滑桩施工对土体扰动的影响, 在水位变化的初始阶段, 抗滑桩周围土体也产生大小不一的裂缝, 抗滑桩加固的边坡离心模型试验后的照片如图 11 所示。

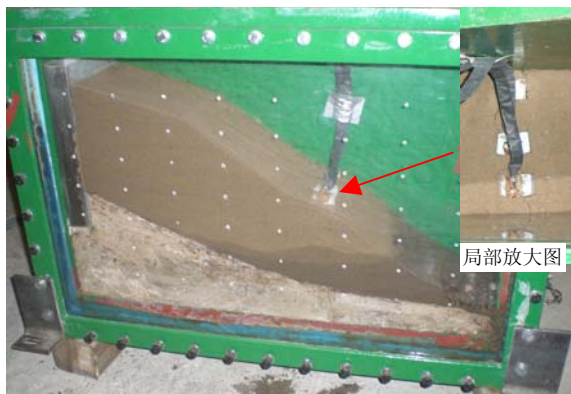


图 11 抗滑桩加固的边坡离心模型试验后的照片

Fig.11 Photography of reinforced slope after centrifugal test influenced by change of water level

4 结 论

通过一系列模拟库区蓄水和水位变化的抗滑桩加固边坡离心模型试验, 得出该试验条件下的结论如下:

(1) 针对库区边坡的水环境条件, 以三峡库区典型边坡为原型, 离心模型试验中模拟了库区蓄水和水位循环升降, 获得了不同抗滑桩加固条件下库区边坡的变形特征、抗滑桩受力和边坡破坏模式, 为桩土相互作用和抗滑桩加固机制的研究提供了试验依据。

(2) 试验结果表明: 抗滑桩受到的滑坡推力分布应划分为 2 个部分, 以距离桩顶 1/4 桩长处为分界线, 且上下 2 个部分均表现为大小不一的三角形分布特征; 受抗滑桩加固的库区边坡在水位升降影响下仍将出现一定程度的变形, 随着抗滑桩的直接支挡和由于桩后土体不均匀位移产生土拱效应作用后, 边坡变形逐渐得到控制。此外, 抗滑桩加固边坡的最大变形均发生在蓄水和初次水位升降作用时, 这一现象主要原因在于桩间土遇水软化, 并导致土拱性能大大降低。因此, 库区蓄水和干旱条件下库水位变化对边坡具有较大的威胁。

(3) 在库区蓄水和水位升降作用下, 受抗滑桩加固的库区边坡, 边坡变形随着桩间距的增大而增大, 而抗滑桩的受力则呈现出先增大后减小的抛物

线型变化形态, 在某一最适桩间距情况下抗滑桩的受力达到最大, 其抗滑性能得到了最充分的发挥, 此时桩后土拱将应力最有效地传递到了抗滑桩上。较小的桩间距虽然可以有效地加固边坡, 但每根抗滑桩分担的滑坡推力较小, 其抗滑性能未得到充分发挥, 在实际工程中将造成较大的浪费。

(4) 进一步的研究将以本文的试验成果为基础, 开展相应的数值模拟验证, 进行库区蓄水和水位循环升降作用对桩土相互作用的机制和力学模型分析以及土拱效应随桩间距变化特征和最适间距理论等研究。

致谢 本文的试验工作得到了英国邓迪大学土木工程系 R. Sonnenberg 和 P. Hudasek 博士的大力帮助, 同时也得到了 A. Brennan 和 F. Brandsby 博士的悉心指导, 特此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 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 Press, 2004: 1 - 21.(in Chinese))
- [2] 黄润秋, 许强, 戚国庆. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1 - 59.(HUANG Runqiu, XU Qiang, QI Guoqing. Evaluation and prediction of landslide induced by rainfall and reservoir fluctuation[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1 - 59.(in Chinese))
- [3] 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 landslides 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))
- [4] 胡新丽, 王亮清, 唐辉明. 三峡库区库岸滑坡抗滑桩设计的几个关键问题[J]. 地质科技情报, 2005, 24(增): 121 - 125.(HU Xinli, WANG Liangqing, TANG Huiming. Several key problems for optimum design on anti-slide pile of bank landslide in the Three Gorges Reservoir region[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(Supp.): 121 - 125.(in Chinese))
- [5] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 950 - 954.(LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Analysis of pile location on landslide control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 950 - 954.(in Chinese))
- [6] 戴自航, 沈蒲生. 抗滑桩内力计算悬臂桩法的改进[J]. 湖南大学学

- 报(自然科学版), 2003, 30(3): 81 - 85.(DAI Zihang, SHEN Pusheng. Improvements on calculation of internal forces of cantilever anti-sliding pile[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2003, 30(3): 81 - 85.(in Chinese))
- [7] JINOH W, KWANGHO Y, SANGSEOM J. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 304 - 315.
- [8] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. Computers and Structures, 2005, 83(8 - 9): 588 - 598.
- [9] 李荣建, 于玉贞, 李广信. 抗滑桩加固非饱和土边坡三维稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 968 - 972.(LI Rongjian, YU Yuzhen, LI Guangxin. 3D global stability analysis of unsaturated soil slope reinforced with piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 968 - 972.(in Chinese))
- [10] 莫伟伟, 徐平, 丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 997 - 1 002.(MO Weiwei, XU Ping, DING Xiuli. Research advances on the influences of reservoir water level fluctuation on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 997 - 1 002.(in Chinese))
- [11] 丁秀丽, 付敬, 张奇华. 三峡水库水位涨落条下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 913 - 2 919.(DING Xiuli, FU Jing, ZHANG Qihua. Stability analysis of landslide in the south end of Fengjie highway bridge with fluctuation of water level of the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 913 - 2 919.(in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 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))
- [14] 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))
- [15] 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))
- [16] 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, LAO Minci, ZHANG Jianhong, et al. Application of centrifuge modeling technique to geoenvironmental engineering[J]. Soil and Environmental Science, 2001, 10(4): 327 - 330.(in Chinese))
- [17] BOUAFIA A. Single piles under horizontal loads in sand: determination of P - Y curves from the prebored pressuremeter test[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(3): 283 - 301.
- [18] BOUAFIA A, BOUGUERRA A. Centrifuge testing of the behaviour of a horizontally loaded flexible pile near to a slope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(2): 324 - 335.
- [19] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 817 - 822.(YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guangjun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 817 - 822.(in Chinese))
- [20] 杨明, 姚令侃, 王广军. 抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1 477 - 1 482.(YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guangjun. Study on effect of width and space of anti-slide piles on soil arching between piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1 477 - 1 482.(in Chinese))
- [21] 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): 1 586 - 1 593.(LI Shaojun, KNAPPETT J A, FENG Xiating. 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): 1 586 - 1 593.(in Chinese))
- [22] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry(PIV) and photogrammetry[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 619 - 631.