

抗滑桩加固边坡变形破坏特性离心模型试验研究

高长胜, 魏汝龙, 陈生水

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 抗滑桩加固边坡的增强作用与抗滑桩设置位置、桩头条件等密切相关, 通过离心模型试验对不同桩位与桩头条件下采用抗滑桩加固边坡的变形破坏特性进行研究。试验表明, 设在边坡中部的抗滑桩在边坡破坏前桩头水平位移最大, 而在相同的破坏载荷作用下, 设在中部的抗滑桩比设在上、下部以及桩头固定比桩头自由时边坡破坏后的位移矢量要小, 这表明抗滑桩设边坡中部以及桩头固定对边坡土体的遮挡效果及边坡安全系数的提高最好。

关键词: 抗滑桩; 边坡; 变形; 离心试验

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0145-04

作者简介: 高长胜(1973-), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 高级工程师, 主要从事地基与边坡工程的设计与科研咨询工作。

E-mail: csgao@nhri.cn。

Centrifugal model tests on deformation of slopes reinforced with piles

GAO Chang-sheng, WEI Ru-long, CHEN Sheng-shui

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The improvement of the safety factor of the slopes reinforced with piles closely relates to the pile position and head conditions. A series of centrifugal model tests are employed to study the deformation of slopes reinforced with piles. Some conclusions are drawn from the tests: before the slope failure, the head horizontal displacement of the pile set in the middle of the slope is much larger than that in other positions, and under the same failure load, the displacement vectors of the slope reinforced with the piles set in the middle of the slope are larger than those in the toe and shoulder of the slope. It indicates that the reinforced piles set in the middle position and the fixed pile head are more effective to improve the safety factor of the slope.

Key words: reinforced pile; slope; deformation; centrifugal model test

0 概述

在工程建设中边坡的工作性状有两种: ①是边坡的破坏失稳状态; ②是边坡的变形失效状态。前者是指边坡土体的强度已破坏, 这就是通常说的滑坡, 后者是指边坡土体的位移变形过大, 危及上部建筑或构筑物的正常使用, 典型的是基坑的过大变形对周边建筑物的影响以及对后期工程建设的使用。要阻止边坡的变形破坏的发展与发生, 就必须设置抗滑支挡结构。目前, 抗滑桩仍然是较为有效与可靠边坡变形破坏的治理方法^[1-3]。但抗滑桩设置的位置与桩头条件对加固边坡的安全性影响较大^[1-4]。而且采用抗滑桩加固边坡的变形破坏特性与机理仍需要进一步的研究^[4]。本文进行4组离心模型试验对不同位置及桩头条件的抗滑桩对加固边坡的变形破坏特性进行研究。

1 离心模型试验设计

1.1 试验设备

试验是在南京水利科学研究院50g中型土工离心

机上进行, 该机有效半径为2.1 m, 最大离心加速度为250g, 最大模型质量为200 kg, 试验所使用的模型箱尺寸为69 cm×20 cm×42 cm, 一侧为透明有机玻璃板, 以方便观察土体的变形。

1.2 试验内容

本文主要进行了以下4组抗滑桩加固边坡离心模型试验, 见表1。其中 $L_x/L=1/2$ 时的桩头自由与桩头固定模型布置图见图1, 2, 其他模型将其中的 L_x 值进行变化即可, 模型桩间距的平面布置图见图3。(L为边坡水平投影长, L_x 为坡脚到抗滑桩位置水平投影长, D_1 为抗滑桩中心间距, d为抗滑桩直径)。

1.3 模型制作与布置

(1) 模型比尺

根据离心机配备模型箱尺寸、抗滑桩长度、测量仪器的安装等, 确定模型比尺 $n=100$ 。

(2) 模型桩及相关结构

为了测量及模型桩制作方便,并考虑桩的抗弯刚度与工程实际相似等条件,模型桩选定为外径为 14 mm,内径为 12 mm 的圆形空心铝合金管作为抗滑桩。对于桩头固定装置,则采用铝合金梁进行固定。

表 1 抗滑桩加固边坡离心模型试验内容

Table 1 Centrifugal model tests on slopes reinforced with piles				
编号	坡比	桩位	桩头条件	桩间距
M1	1 : 1	$L_x/L=1/6$	自由	$D_1/d=4$
M2	1 : 1	$L_x/L=1/2$	自由	$D_1/d=4$
M3	1 : 1	$L_x/L=5/6$	自由	$D_1/d=4$
M4	1 : 1	$L_x/L=1/2$	固定	$D_1/d=4$

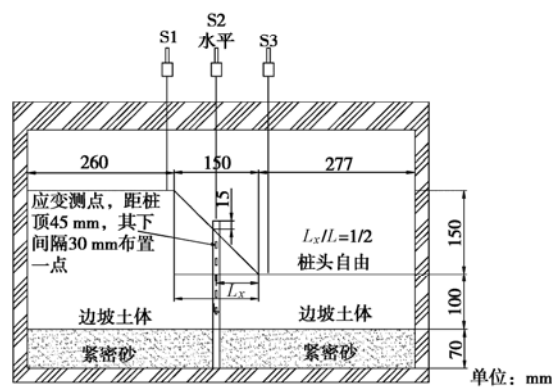


图 1 M2 模型布置图 ($L_x/L=1/2$, 桩头自由)

Fig. 1 Layout of model M2 ($L_x/L=1/2$, free head)

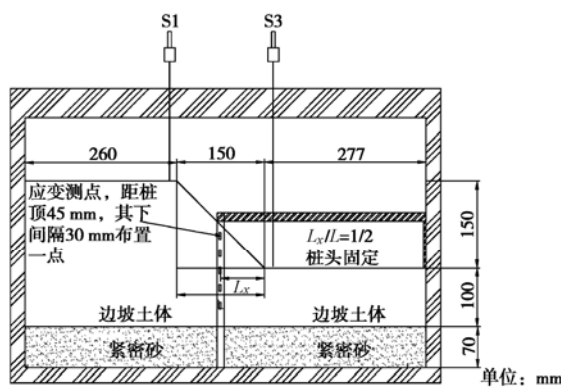


图 2 M4 模型布置图 ($L_x/L=1/2$, 桩头固定)

Fig. 2 Layout of model M4 ($L_x/L=1/2$, fixed head)

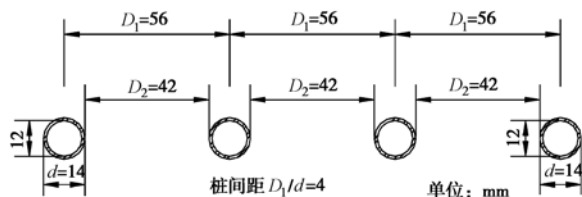


图 3 模型试验桩间距示意图

Fig. 3 Pile space in the model tests

(3) 边坡模型

边坡模型应用相同重量黏质粉土颗粒加入相同重

量的水搅拌成泥浆,然后按相同的预压荷载与预压时间先进行预压,预压完成后再施加载荷利用离心加速度按相同的施加方式与施加时间进行固结以确保不同边坡模型土体强度具有较好的重复性,运行完成后将土体切削成设定边坡,插入模型桩,并在侧面布置正方形变形测量标志。为了使预压泥浆能尽快固结以及使抗滑桩下部能有效固定,在模型制备时,下部采用 7 cm 厚的紧密砂层。模型土层物理力学特性指标见表 2。

表 2 边坡模型土体物理力学性质指标

Table 2 Properties of model slope soil			
编号	含水率 $w/\%$	重度	不排水强度均值
		$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	s_u/kPa
M1	26.1	17.3	48
M2	28.8	17.4	45
M3	27.5	17.2	47
M4	25.2	17.5	48

1.4 测量方法

(1) 位移测量

试验中在模型表面中心线上安装激光位移传感器(见图中 S1~S3),测量边坡顶、坡脚表面沉降和桩头水平位移变化过程,传感器的分辨率为 20 μm 。

(2) 土体变形测量

通过在边坡侧表面设置的变形测量网格来测量土体的变形。

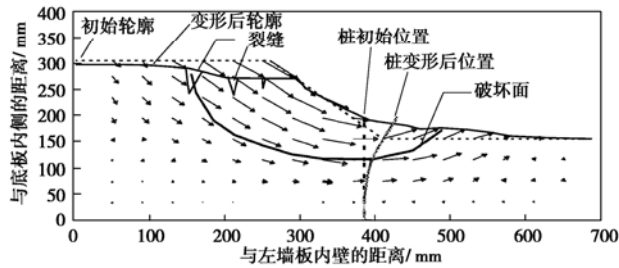
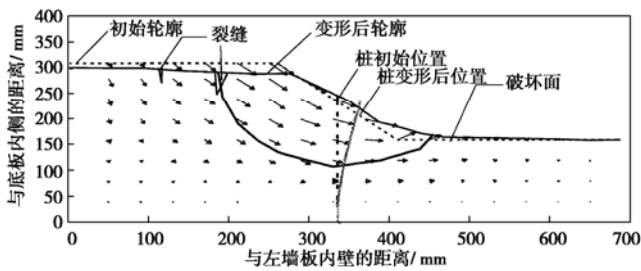
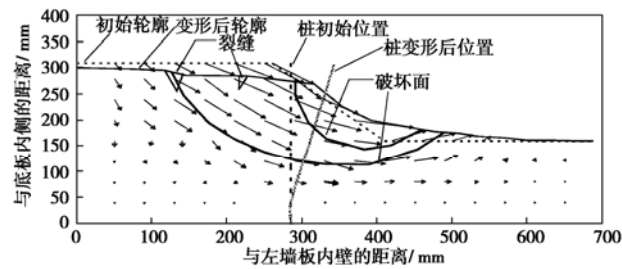
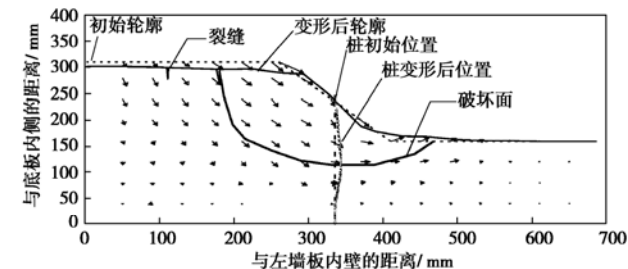
2 试验程序与过程

在模型制备完成,并将位移及应力测量仪器调试完成后即开始进行模型试验,为了对比不同工况条件下抗滑桩加固边坡的变形破坏特性,试验时所有 4 组模型均按照相同的离心加速度施加速率和施加方式进行。试验按以下过程进行:①首先按 10 g/min 的加速度施加速率将模型离心加速度施加到 100g;②保持 100g 运行 15 min;③快速均匀施加离心加速度到 160g 进行破坏性试验;④保持 160g 高速运行 15 min 后停机进行边坡侧表面的变形测量。在试验的整个过程测定相应试验数据。

3 离心模型试验结果与分析

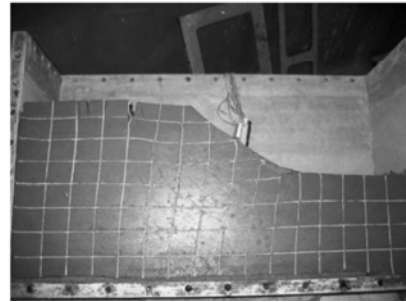
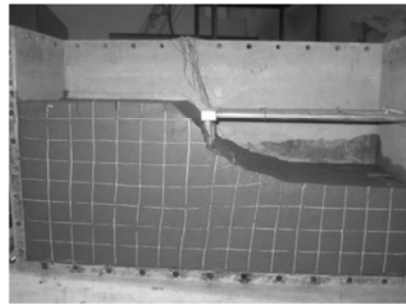
3.1 边坡变形破坏矢量特性

经过破坏性试验(160g)后,根据模型剖面位移网格结点的坐标变化所绘制的矢量图见图 4~7,图中同时标出坡顶附近出现的裂缝位置和失稳破坏时的滑弧,图 8,9 为 $L_x/L=1/2$ 时 2 种工况条件下的破坏试验变形特征图片。

图4 M1 模型边坡变形位移矢量图 ($L_x/L=1/6$, 桩头自由)Fig. 4 Vectors of model slope M1 nodal displacement ($L_x/L=1/6$, free head)图5 M2 模型边坡变形位移矢量 ($L_x/L=1/2$, 桩头自由)Fig. 5 Vectors of model slope M2 nodal displacement ($L_x/L=1/2$, free head)图6 M3 模型边坡变形位移矢量图 ($L_x/L=5/6$, 桩头自由)Fig. 6 Vectors of model slope M3 nodal displacement ($L_x/L=5/6$, free head)图7 M4 模型边坡变形位移矢量图 ($L_x/L=1/2$, 桩头固定)Fig. 7 Vectors of model slope M4 nodal displacement ($L_x/L=1/2$, fixed head)

从位移矢量图中可以发现, 在经过相同的破坏载荷作用下, 桩位在边坡下部 (M1 模型) 和上部 (M3 模型) 破坏后的位移矢量明显大于抗滑桩在中部的位移矢量, 而设在中部抗滑桩在桩头固定时的位移矢量又小于桩头自由时的位移矢量, 这说明当抗滑

桩设在边坡中部时, 它对边坡变形的整体遮挡作用要大于设置在边坡上部和下部, 而桩头固定又大于桩头自由时的情况, 也就是说抗滑桩桩位设置在边坡的中部及桩头固定比设置在边坡的上、下及桩头自由能更大地提高边坡的稳定性。

图8 M2 模型边坡变形现状图 ($L_x/L=1/2$, 桩头自由)Fig. 8 Deformation of model slope M2 ($L_x/L=1/2$, free head)图9 M4 模型边坡变形现状图 ($L_x/L=1/2$, 桩头固定)Fig. 9 Deformation of model slope M4 ($L_x/L=1/2$, fixed head)

3.2 桩头位移及坡顶、坡肩沉降特性

为便于说明将位移按模型比 $n=100$ 转化为原型位移进行分析, 同时为分析相同外部荷载条件下桩土变形特性, 本文采用对应相同离心加速度进行对比, 图 10~12 为离心模型的桩头水平位移、坡顶以及坡脚沉降随加速度施加过程线。

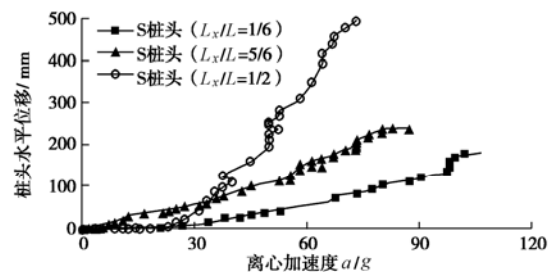


图10 抗滑桩桩头水平位移随加速度变化过程线

Fig. 10 Pile head horizontal displacement versus acceleration

坡顶、坡脚的沉降与土体水平位移有一定关联, 可反应抗滑桩对土体的遮挡作用, 图 10 表明桩头水平位移均随加速度的增加而增大, 但水平位移大小与抗滑桩位置和桩头条件紧密相关, 边坡破坏前, 在相同的加速度情况下, 位于边坡中心抗滑桩桩头水平位移

最大,而在相同外部破坏载荷作用下,加固边坡的整体位移矢量却最小,这说明设置在边坡中部的抗滑桩对整体边坡土体水平位移遮挡最有效,抗滑桩的发挥作用也最合理。

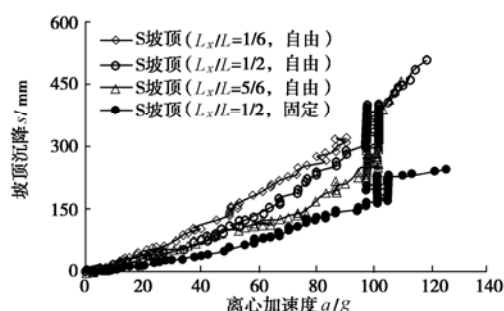


图 11 边坡坡顶沉降随加速度变化过程线

Fig. 11 Slope shoulder settlement versus acceleration

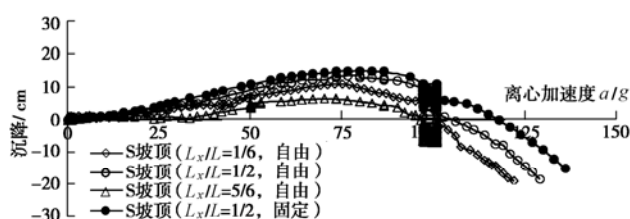


图 12 边坡坡脚沉降随加速度变化过程线

Fig. 12 Slope toe settlement versus acceleration

图 11 表明坡顶沉降均随加速度的增加而增大,边坡未破坏以前,在相同加速度条件下,桩头自由时,坡顶沉降位移随抗滑桩远离坡肩而变大,这表明抗滑桩设置在上部位置 ($L_x/L=5/6$) 能有效遮挡坡顶的土体位移,而桩头固定的情况下,坡顶位移最小,说明桩头条件对抗滑桩的发挥遮挡作用有重要影响。

图 12 给出了坡脚沉降随加速度的变化曲线,在开始时坡脚土体是向下沉降的,当位移在沉降发生到一定程度后开始反弹,表明边坡土体已经开始变形并开始向坡角进行挤压,最后出现隆起,由于激光传感器只有在一个比较小的距离段范围内才能有效地进行测量,而在进行破坏性试验时,边坡变形使坡脚隆起到一定程度后,测点就超过传感器的有效距离测量范围,因而无法获得边坡坡脚整个隆起的过程,有效测量数据中 M1 模型在 90g 时隆起有个突变点, M2 的隆起突变点发生在 106g 左右, M3 发生在 115g 左右, M4 模型没发现有明显的隆起点,根据突变点的加速度^[5],可以推断 M1 模型离心机测定的安全系数为 0.9, M2 为 1.06, M3 为 1.15,从位移过程线可以看出, M4 的安全系数要大于其他 3 个模型。另外从 M1 模型的位移过程看,坡脚首次 (90g) 位移隆起突变是抗滑桩以

下边坡土体发生了破坏 (见图 6)。

4 结 论

(1) 试验表明桩头自由时,位于边坡中部的抗滑桩最有利于提高边坡稳定性,在相同的位置,桩头固定比桩头自由更有利于提高加固边坡的稳定性。

(2) 试验中的桩头水平位移和破坏后边坡的位移矢量特性表明设置在边坡中部的抗滑桩对整体边坡土体水平位移遮挡最有效,抗滑桩对边坡稳定的增强最合理。

(3) 坡顶位移特性表明在边坡破坏前位于边坡上部的抗滑桩对坡顶位移的遮挡作用最大,而桩头固定比桩头自由情况下对坡顶位移的遮挡作用大。

(4) 试验表明随离心加速度的增加,坡顶下沉随之增加,坡脚开始下沉,下沉到一定程度后开始隆起,并有突变点的出现,这表明边坡的变形破坏为渐进变形到突然破坏的特性。

参考文献:

- [1] 陈生水, 邹广电, 徐光明. 丰都楠竹崩滑体防治方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(11). (CHEN Sheng-shui, ZOU Guang-dian, XU Guang-ming. Study on treatment scheme of Nanzhu landslide in Fengdu County[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(11). (in Chinese))
- [2] 邹广电, 陈生水. 抗滑桩工程的整体设计方法及其优化数学模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1). (ZOU Guang-dian, CHEN Sheng-shui. A design method of stabilizing piles and its optimized numerical model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1). (in Chinese))
- [3] ITO T Matsui, WON Pyo Hong T. Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 21 - 37.
- [4] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(4): 43 - 59.
- [5] 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). (GAO Chang-sheng, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, et al. Centrifugal model test on slope stability of levee project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23). (in Chinese))