

# 变刚度悬臂式双排抗滑桩水平推桩模型试验研究

叶金铎<sup>1</sup> 俞 缙<sup>2</sup> 林植超<sup>3</sup> 周先齐<sup>1,2</sup> 刘士雨<sup>2</sup> 涂兵雄<sup>2</sup>

(1. 厦门理工学院, 福建厦门 361021; 2. 华侨大学岩土工程研究所, 福建厦门 361021;  
3. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建厦门 361026)

**摘要:** 双排抗滑桩常用于加固大型滑坡, 其中悬臂式双排抗滑桩由于施工便利, 受到工程界广泛重视。已有研究表明, 后排桩承受的滑坡推力大于前排桩, 是困扰设计的重要问题。文章借鉴变刚度调平设计原理, 通过改变前后排桩间距实现前后排桩刚度的调整, 设计了变刚度悬臂式双排抗滑桩支护形式, 并进行了室内水平推桩模型试验, 得到桩顶及坡顶位移、桩身弯矩以及滑体内土压力分布。结果表明: 水平推桩模式下, 桩顶位移和桩身弯矩随荷载增大而增大, 模型边坡沿着滑动面破坏, 根据桩顶的荷载-位移曲线, 双排桩在推力作用下的发展过程被划分为三个阶段; 适度增大前排桩的桩间距并不会明显降低双排抗滑桩的临界荷载; 采用变刚度调平设计悬臂式双排抗滑桩, 前排作用被充分调动, 前后排最大弯矩差值变小; 双排抗滑桩存在明显的三维土拱效应, 在推力方向上被划分为后排桩后土拱效应、桩排间土拱效应、前排桩前土拱效应, 在深度方向上, 滑体中部土拱效应与滑体下部有所不同; 适度扩大前排桩的间距, 桩排间土体保持稳定, 未见土体绕流现象, 桩排间土拱效应作用明显。

**关键词:** 悬臂式双排抗滑桩; 变刚度调平设计; 水平推桩; 土拱效应; 模型试验

**中图分类号:** U216.41<sup>+</sup>9.1 U213.1<sup>+</sup>52.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0193-09

## Model test of cantilever double-row anti-slide pile using horizontal pushing method

Ye Jinbi<sup>1</sup> Yu Jin<sup>2</sup> Lin Zhichao<sup>3</sup> Zhou Xianqi<sup>1,2</sup> Liu Shiyu<sup>2</sup> Tu Bingxiong<sup>2</sup>

(1. Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;  
2. Geotechnical Engineering Institute, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
3. Xiamen Road & Bridge Engineering Investment and Development Co., Ltd., Xiamen 361026, China)

**Abstract:** Double-row anti-slide piles are usually used to reinforce large-scale landslides, and the cantilever-type are popular by engineers for the convenience in construction. The key step of design is to determine the landslide thrust acting on the front and back row piles. However, the research showed that the landslide thrust on the back-row piles is greater than that on the front-row piles. In order to solve the problem, a model test was designed by adjusting the stiffness of front and back row piles. The testing results showed that the pile head displacement and bending moment increased with the loading. The model slope destroyed along the sliding surface under the horizontal load. The development process of double-row piles under the thrust could be divided into three stages. The ultimate resistance of double-row anti-slide piles would not be significantly reduced when the pile spacing of front-row pile increased. By adjusting the stiffness between the front and back row piles, function of the front-row piles was fully motivated, the maximum bending moment between front and rear rows was reduced. The test also showed that there was obvious soil arching effect between piles, which could be divided into three zones, the back-row one, the front-row one and the one between the pile rows. Enlarging the spacing of the front row piles enhanced the soil arching effect between the piles. The distribution of soil pressure

基金项目: 国家自然科学基金(51679093,51874144)、厦门理工学院  
高层次人才项目(YKJ15040R)、福建省教育厅 A 类项目  
(JAT160368)和厦门市科学计划项目(3502Z20183071)

作者简介: 叶金铎, 博士, 讲师

通讯作者: 俞缙, 博士, 教授

收稿日期: 2019-02-27

has spatial characteristics.

**Keywords:** cantilever double row anti-slide pile; optimum design method based on variable rigidity; horizontal pushing method; soil arching effect; model test

**E-mail:** bugyu0717@163.com

## 引 言

随着基础设施建设的快速发展,大型和巨型边坡不断涌现,抗滑桩作为重要的边坡支护手段,其截面尺寸和桩长不断被突破<sup>[1]</sup>。双排抗滑桩是一种新型支挡结构,侧向刚度大,在大型滑坡治理工程中得到广泛运用<sup>[2-4]</sup>。目前对于双排桩的支护形式并未达成共识,形成了门架式双排桩<sup>[5]</sup>、H形双排桩<sup>[6]</sup>、悬臂式双排桩<sup>[7-8]</sup>及沉埋式双排桩<sup>[2]</sup>共存的局面。其中,悬臂式双排抗滑桩支护结构由于施工便利,受到工程界的广泛欢迎,但已有文献<sup>[9-11]</sup>表明其后排桩身受比前排大,是困扰设计的重要问题。肖世国等<sup>[9]</sup>推导了双排桩滑坡推力的计算公式,在工程实例验算中发现后排桩受到的滑坡推力大于前排桩,并在大型室内模型试验中得到验证<sup>[10]</sup>,同时指出在折线形滑坡模型中,不管采用常规的全长双排桩还是后排沉埋式双排桩,后排桩承担的滑坡推力都大于前排桩。杨波等<sup>[11]</sup>通过有限元对双排抗滑桩进行模拟,研究表明双排桩的分担比与排距密切相关,在排距较小时,后排桩承担大部分推力。因此,如何对双排桩进行设计使得前后排桩充分发挥作用就显得尤为重要。

变刚度调平设计最初应用于基础工程,解决基础的不均匀沉降<sup>[12]</sup>。传统桩基设计原则是同一建筑物下布置相同直径、相同长度的桩,桩间距也应尽可能均匀布置,该布桩方式容易形成碟形的沉降盆,引起结构次应力。变刚度调平设计方法可通过调整桩基布置,使基底反力分布尽量与上部结构荷载分布一致,减少差异沉降,降低筏板内力。若能借鉴该原理,对双排抗滑桩的前后排采用不同桩间距、不同截面尺寸、不同锚固深度,就可以实现前后排桩刚度分布的调整,从而使前后排桩的受力更为均衡。而且,双排抗滑桩抵抗滑坡推力作用的涉及桩间土拱效应,桩间距过大将导致岩土体绕流破坏<sup>[13]</sup>,变量众多使变刚度调平设计问题异常复杂。相关研究目前主要通过数值分析手段完成<sup>[5,14]</sup>,模型试验成果较少见。借助模型试验可对该问题从更客观的角度进行规律性分析,具有重要的工程价值。

为解决双排抗滑桩设计中存在的前后排推力不均衡问题,基于变刚度调平设计原理,通过前后排设置不同桩间距实现前后排桩刚度比的调整,设计了变刚度悬臂式双排抗滑桩支护形式,并进行了室内水平推桩模型试验。

## 1 双排抗滑桩水平推桩模型试验

### 1.1 试验设计

本次室内模型试验按照相似理论进行设计,边坡原型为14m厚的堆积层滑体,采用两排桩长均为24m,边长2m×2m的方桩对边坡进行支护。为了测试双排抗滑桩的支挡效果,采用荷载破坏试验。

本次模型试验几何相似比为 $C_L=1:20$ ,容重相似比为 $C_\gamma=1$ 。滑床采用夯实的碎石土模拟,按照碎石与粉质黏土质量比2:1进行配比,滑体采用粉质黏土模拟,滑面采用双层塑料薄膜模拟,经室内土工试验测定土体的物理力学参数见表1。模型桩材料采用混凝土,截面为100mm×100mm,桩长为1200mm,用4根Φ6钢丝模拟原型中的钢筋。模型桩锚固深度为500mm,受荷段长度为700mm。

表1 滑体及滑床材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil mass

所在位置	土体分类	含水量 (%)	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
滑体	粉质黏土	10.3	16.8	12	22
滑床	碎石土	15.5	19.8	35	40

### 1.2 试验装置

抗滑桩主要承受水平荷载,因此采用千斤顶进行水平加载<sup>[15-16]</sup>。试验装置如图1所示,主要包括模型试验池、千斤顶、挡板。模型试验池尺寸为2650mm×1500mm×1400mm(长×宽×高),由上下两部分组成。上部采用钢板约束土体侧向变形,后侧安装千斤顶,土体在推力作用下向前滑动,模拟滑体;下部由黏土砖砌筑成底部骨架,下部土体各向变形被约束,模拟滑床。为了得到桩顶与坡顶位移、桩身弯矩以及滑体内土压力分布,设置有微型土压

力盒、应变片、位移计分别进行测量。千斤顶荷载由压力传感器进行控制。

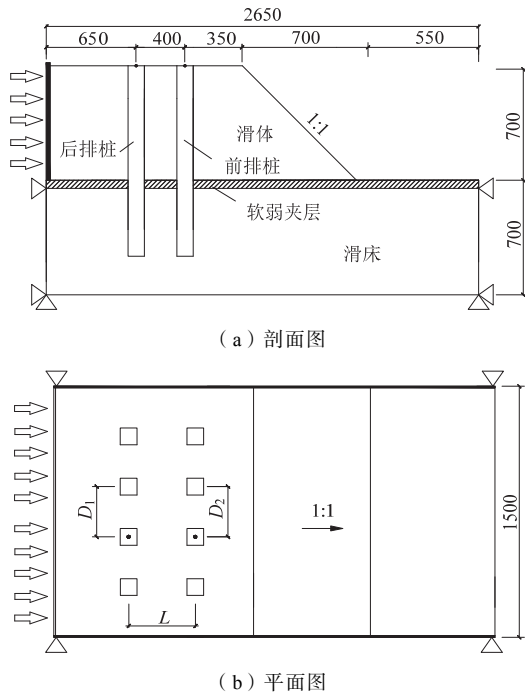


图 1 模型试验剖面图与平面图 (mm)

Fig.1 Schematic diagram of section and floor plan

### 1.3 试验方案

模型试验共分 3 种工况，分别为无桩试验、双排桩基准试验、前后排桩间距 2 : 1 试验。试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 The test scheme

编号	描述	L(mm)	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)
工况 1	无桩试验	—	—	—
工况 2	基准试验	400	300	300
工况 3	前排桩间距 扩大一倍	400	300	600

工况 1 采用无桩试验，目的是量化边坡加固效果。边坡的安全系数有多种定义方法<sup>[17]</sup>：抗滑力与滑动力比值法、强度折减系数法和超载系数法。借鉴超载系数法的定义，将加固后边坡的临界荷载除以无桩试验的临界荷载，得到边坡的安全系数：

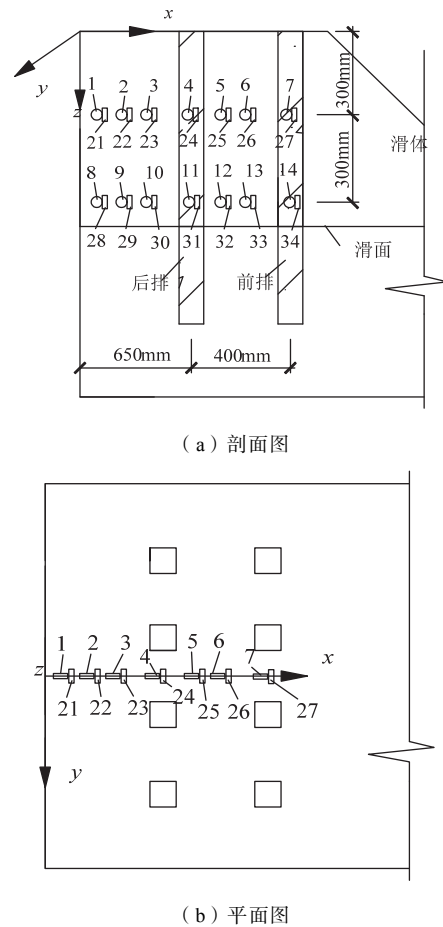
$$F_s = \frac{P_f}{P_0} \quad (1)$$

式中：P<sub>f</sub> 为加固后边坡的临界荷载；P<sub>0</sub> 为加固前边坡的临界荷载。

工况 2 为基准试验。工况 3 为对比试验。由上述分析可知，后排桩受力比前排桩要大，因此增大前排桩间距，弱化前排桩刚度，试图使前后排桩的

推力分配更趋均衡。工况 2 设 8 根桩，前后排各 4 根，工况 3 设 6 根桩，后排为 4 根，前排为 2 根。

为查明悬臂式双排抗滑桩桩间土拱效应的空间分布，在滑体内布设微型土压力盒。微型土压力盒分双层布设，上层位于滑体中部，距离填土顶面 0.3m，下层位于滑体下部，距离填土顶面 0.6m，靠近滑面。土压力盒沿推力方向和垂直推力方向双向布置。x 轴沿着推力方向，水平向右；z 轴沿着桩的布置方向，垂直向下；y 垂直 x-z 平面，垂直向外。为了方便对微型土压力盒位置进行辨认，对其进行编号。微型土压力盒布置如图 2 所示。



注：□为 x 向微型土压力盒；○为 y 向微型土压力盒

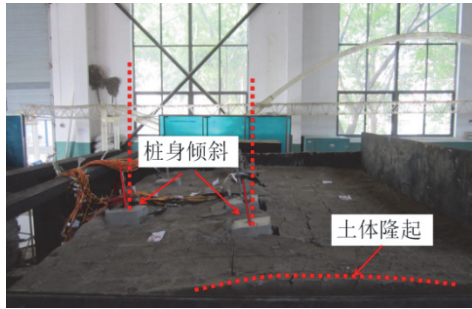
图 2 滑体内土压力盒布置图

Fig.2 The soil cells in the sliding body

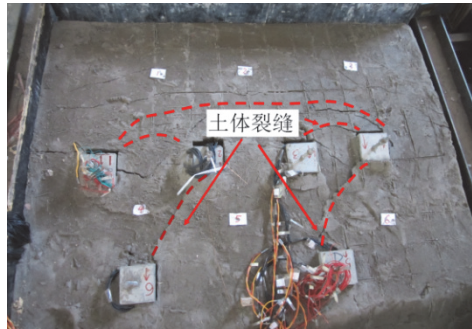
## 2 试验结果及数据分析

采用千斤顶对模型边坡进行水平加载，直至产生塑性滑动为止。记录坡顶水平位移、桩顶水平位移、桩身弯矩和滑体内土压力。模型试验现象如图 3 所示。

在试验加载初期，推土板在千斤顶作用下向前



(a) 桩后土体隆起、桩身倾斜



(b) 土体裂缝

图 3 模型试验现象

Fig.3 The phenomenon of the model test

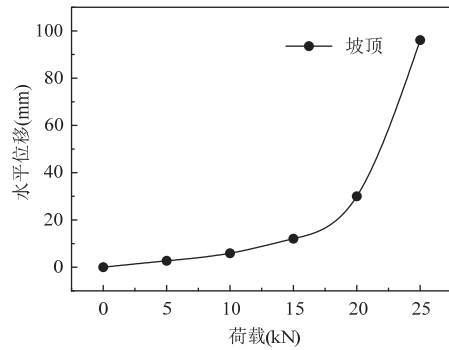
移动，前后排桩顶位移及坡顶位移接近零。当推力增大到一定程度时，前后排桩顶位移均随荷载增大而增大，后排桩顶位移稍大于前排桩，前后排桩发生一定角度的倾斜，后排桩后侧可见土体微隆起，后排桩周附近有肉眼可见裂缝产生，前排桩周附近及坡顶土体未见明显裂缝产生。当荷载较大时，推土板在水平荷载作用下不断向前滑动，压力传感器读数增幅较小，前后排桩均向前产生明显倾斜，后排桩后侧土体产生明显隆起，前侧土体隆起不明显，裂缝持续扩展且不断有新裂缝产生，桩与岩土体发生分离，模型边坡破坏。

对破坏后的模型边坡进行观察，发现土体隆起范围主要是在后排桩周边，桩后隆起范围大，约为  $3\sim 4d$  ( $d$  为桩身直径)，桩前  $1d$  范围内可见隆起，但隆起程度较小。前排桩周围土体未见明显隆起。前后排桩均可见明显倾斜。

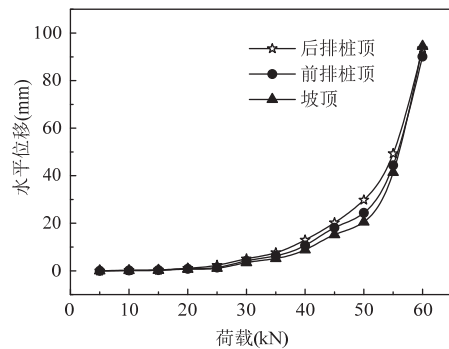
后排桩及桩排间可见明显裂缝，后排桩后侧裂缝呈拱形分布，且有双层，一层位于桩后  $0.5d$  范围，一层位于桩后  $1.5d$  范围。在增大前排桩间距后，桩排间裂缝呈斜向分布。

### 2.1 荷载-位移曲线

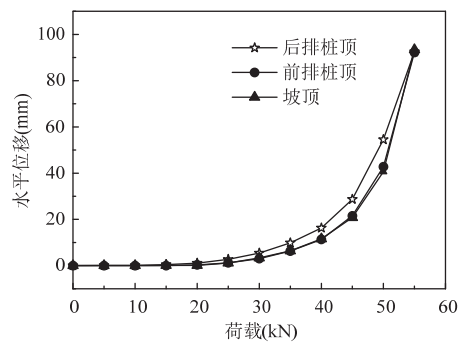
三种工况下的荷载-位移曲线如图 4 所示。根据模型边坡在推力作用下的规律，其发展过程被划分为以下三个阶段。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 4 荷载-位移曲线

Fig.4 The load-displacement curve of test schemes

第一阶段：弹性变形阶段。在水平推力作用下，填砂逐渐挤紧，坡顶和桩顶位移变化很小。工况 1 弹性变形阶段荷载为  $0\sim 10\text{kN}$ ，工况 2 和工况 3 的弹性变形阶段同荷载为  $0\sim 25\text{kN}$ ，说明双排桩有效地抑制了坡体变形，加固效果良好。在荷载达到  $25\text{kN}$  时，工况 2 坡顶位移为  $1.06\text{mm}$ ，前排桩顶位移为  $1.41\text{mm}$ ，后排桩顶位移为  $2.34\text{mm}$ ；工况 3 坡顶位移为  $1.13\text{mm}$ ，前排桩顶位移为  $1.20\text{mm}$ ，后排桩顶位移为  $2.68\text{mm}$ 。工况 2 和工况 3 中，后排桩位移均稍大于前排桩，工况 3 前后排桩顶位移比工况 2 略有增大。

第二阶段：加速变形阶段。随着荷载的增加，坡顶与前后排桩顶位移近似呈线性增长，桩身向前

产生轻微倾斜, 前后排桩周围土体出现微裂缝。对于工况 1, 该阶段荷载为 10~20kN, 在荷载为 20kN 时, 对应的坡顶位移为 30.12mm。对于工况 2, 该阶段荷载为 25~50kN, 在荷载为 50kN 时, 对应的坡顶位移为 20.55mm, 前排桩顶位移为 24.37mm, 后排桩顶位移为 29.80mm, 前后排桩顶位移相差为 5.43mm。对于工况 3, 该阶段荷载为 25~45kN, 在推力 45kN 时, 对应的坡顶位移 20.82mm, 前排桩顶位移 21.52mm, 后排桩顶位移 28.70mm, 前后排桩顶位移相差 7.20mm。将该阶段末端对应的荷载称为临界荷载。

第三阶段: 塑性破坏阶段。随着荷载继续增大, 桩顶和坡顶位移产生突变, 前后排桩身发生明显倾斜, 滑体沿着滑面向前滑动, 土体表面产生大量裂痕, 模型边坡发生破坏。对于工况 1, 该阶段荷载为 20~25kN, 对应的坡顶位移值为 96.07mm。对于工况 2, 该阶段荷载为 50~60kN, 对应的坡顶位移为 94.45mm, 前排桩顶位移为 90.11mm, 后排桩顶位移为 93.50mm。对于工况 3, 该阶段荷载为 45~55kN, 对应的坡顶位移 93.39mm, 前排桩顶位移为 92.19mm, 后排桩顶位移为 92.53mm。工况 2 前后排桩顶位移差值为 3.39mm, 工况 3 则为 0.34mm。

根据荷载-位移曲线, 工况 1 的临界荷载为 20kN, 工况 2 的临界荷载为 50kN, 工况 3 的临界荷载为 45kN, 由式 (1) 可求得工况 2 的安全系数为 2.5, 工况 3 的安全系数为 2.25。由此可见, 采用双排桩对边坡进行加固可以取得良好的效果, 工况 3 将前排桩间距扩大一倍后, 临界荷载相比工况 2 仅下降 5kN。

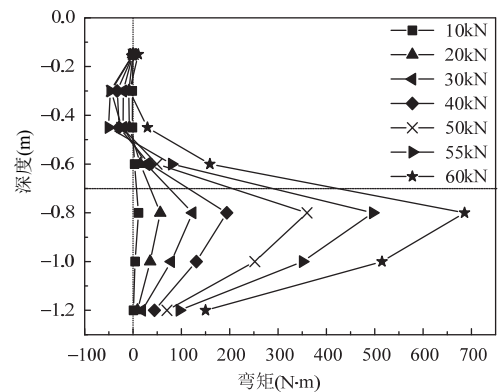
## 2.2 桩身弯矩分析

抗滑桩的破坏一般由弯矩控制, 因此在设计计算中, 弯矩是最重要的设计指标。弯矩可由粘贴在桩身前后侧应变片的应变差求得<sup>[13]</sup>。

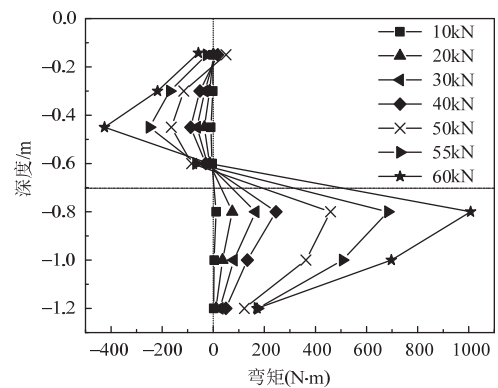
### 2.2.1 工况 2 桩身弯矩

工况 2 前后排桩的弯矩分布如图 5 所示, 虚线标注位置为滑面处, 虚线以上位置为抗滑桩受荷段, 虚线以下位置为抗滑桩锚固段。前排桩在受荷段上部的弯矩为负, 但数值均较小, 受荷段下部靠近滑面处迅速增大。前排桩锚固段弯矩呈倒三角形分布, 最大弯矩 685.73N·m。后排桩弯矩分布呈 S 形分布。受荷段最大弯矩值为 -425.67N·m, 说明由于前排桩的存在, 桩排间土体可以有效提供反力, 使得受荷段出现负弯矩。锚固段最大弯矩值为 1007.16N·m,

受荷段最大弯矩值是锚固段最大弯矩值的 42.21%, 说明在荷载作用下, 最大弯矩值位于锚固段, 受荷段弯矩与锚固段相比较小, 可酌情减少抗滑桩受荷段配筋, 而加强锚固段配筋。荷载在 50kN 时, 前排最大弯矩值为 360.00 N·m, 后排最大弯矩值为 459.00 N·m, 但在荷载达到 60kN 时, 弯矩增长迅速, 分别达到 685.73N·m 和 1007.16N·m。对比前后排桩的弯矩, 可以发现工况 2 后排桩的最大弯矩比前排桩大, 前排桩的最大弯矩值为后排桩的 68.03%, 说明工况 2 后排桩的受力较大, 前排桩身材料强度没有充分发挥。



(a) 前排桩



(b) 后排桩

图 5 工况 2 弯矩分布图

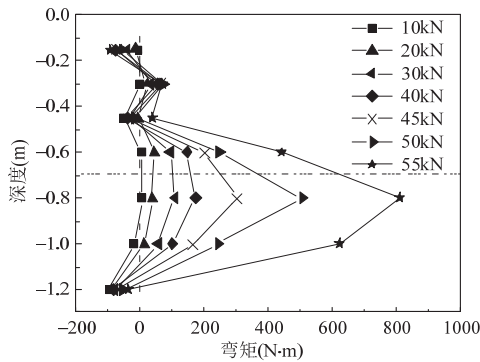
Fig.5 Bending moment of the double-row piles of Test 2

### 2.2.2 工况 3 桩身弯矩

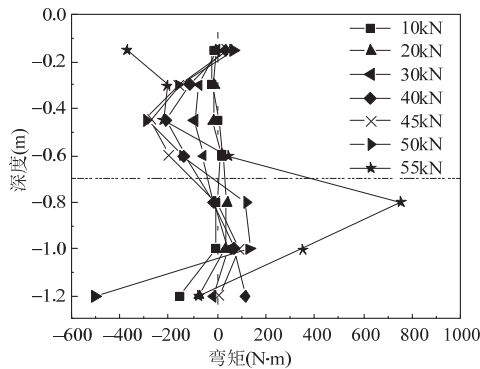
工况 3 的弯矩分布如图 6 所示。前排桩的弯矩整体呈反 W 形分布。受荷段上部弯矩值较小, 在靠近滑面处弯矩迅速增大。锚固段弯矩呈倒三角形分布, 最大弯矩值为 810.28N·m。在荷载 45kN 时, 受荷段和锚固段最大弯矩值分别为 200.20N·m 和 302.50N·m。在极限荷载 55kN 时, 分别达到 440.20N·m 和 810.28N·m, 增长幅度为 99.91%和 167.86%。桩底和桩顶弯矩值始终为负数, 但是其



值均不大，对桩的受力影响较小。



(a) 前排桩



(b) 后排桩

图 6 工况 3 弯矩分布图

Fig.6 Bending moment of the double-row piles of Test 3

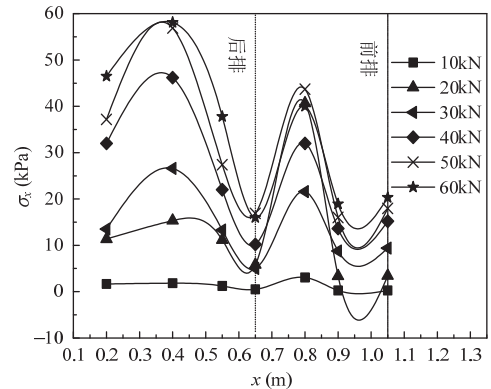
后排桩的弯矩分布呈 S 形。受荷段最大弯矩值为  $-370.10\text{N}\cdot\text{m}$ ，而锚固段最大弯矩值为  $755.20\text{N}\cdot\text{m}$ 。荷载  $50\text{kN}$  以下时，其弯矩分布形态较类似，但在荷载达到  $55\text{kN}$  时，其分布产生突变。受荷段弯矩呈抛物线形分布，弯矩值以负数为主，说明桩排间土体对后排桩具有很强的支撑作用，导致受荷段产生反弯矩。对于锚固段而言，荷载小于  $45\text{kN}$  时，其整体弯矩较小，最大值为  $87.50\text{N}\cdot\text{m}$ 。在荷载增加至  $55\text{kN}$  时，最大弯矩值增大到  $755.20\text{N}\cdot\text{m}$ 。

总体而言，工况 2 和工况 3 的前排桩负弯矩较小，锚固段弯矩呈倒三角形分布。后排桩弯矩呈 S 形分布，存在两个反弯点。后排桩受荷段弯矩比前排桩大，前排桩的存在促使桩排间提供足够的抗力，减少了后排桩的最大弯矩。前后排桩的锚固段弯矩始终大于受荷段弯矩，抗滑桩的最大弯矩靠近滑面处。

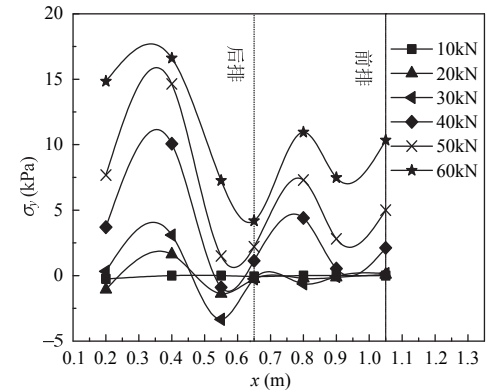
### 2.3 滑体内土压力分布

#### 2.3.1 工况 2 土压力分布

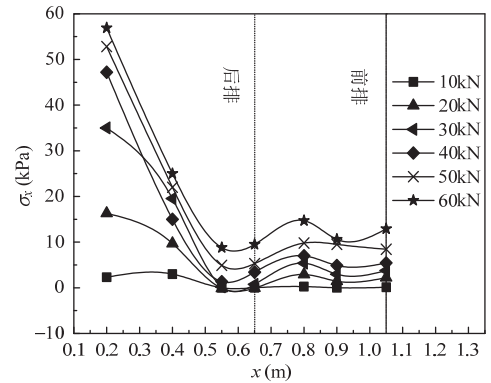
工况 2 的土压力分布如图 7 所示。 $\sigma_x$  沿推力方向， $\sigma_y$  垂直推力方向。以滑体后侧挡板所在位置为



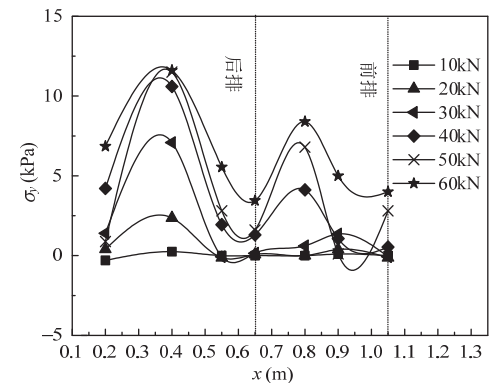
(a) 0.3m 处  $\sigma_x$



(b) 0.3m 处  $\sigma_y$



(c) 0.6m 处  $\sigma_x$



(d) 0.6m 处  $\sigma_y$

图 7 工况 2 滑体土压力分布

Fig.7 The horizontal earth pressure at the sliding body of Test 2

坐标原点, 水平向右(沿推力方向)逐步增大。后排桩中心位于  $x=0.65\text{m}$  处, 前排桩中心位于  $x=1.05\text{m}$  处, 如图中虚线所示。沿着推力方向, 滑体内土压力值呈不均匀分布, 主要原因是土拱效应。土拱的形成条件是土体的不均匀变形, 变形区受到稳定区约束, 土体抗剪强度使移动土体的土压力部分转移到非变形区域<sup>[18]</sup>。

$\sigma_x$  和  $\sigma_y$  均随着滑坡推力的增大而增大, 在推力  $10\text{kN}$  时土压力值变化较小, 土拱效应未形成。在推力达到  $30\text{kN}$  时, 土压力变化明显, 土拱效应形成。土拱拱轴线是最大主应力迹线<sup>[13]</sup>,  $x=0.4\text{m}$  处土压力最大, 据此推断后排桩土拱高度约为  $0.25\text{m}$ ,  $x=0.8\text{m}$  处土压力值达到极大值, 可见桩排间形成土拱效应。

滑体中部(深度  $0.3\text{m}$ )  $x$  向和  $y$  向土压力呈双峰分布, 前后排桩中心所在位置土压力值较小,  $x=0.4\text{m}$  处土压力值最大, 约为桩后  $2d$ ,  $x=0.8\text{m}$  处土压力值达到极大值, 但小于  $x=0.4\text{m}$  处的土压力值。

滑体下部(深度  $0.6\text{m}$ )  $x$  向最大土压力位于  $x=0.2\text{m}$  处, 随后逐渐减小, 桩排间土压力虽然有所增大, 但不明显。 $y$  向土压力值呈双峰分布, 但数值比滑体中部小。

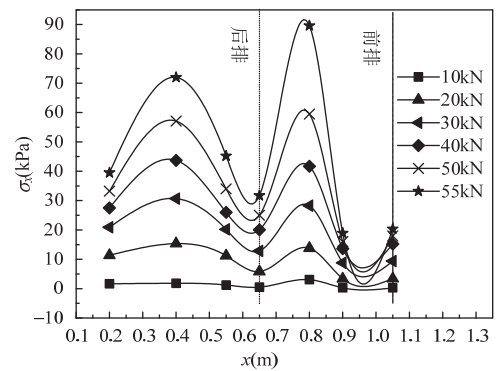
滑体中部推力方向的土压力分布与滑体下部有较大区别, 而垂直推力方向土压力分布形态具有一致性。  
2.3.2 工况 3 土压力分布

工况 3 的土压力分布如图 8 所示。滑体中部 ( $0.3\text{m}$  处)  $x$  向和  $y$  向的土压力呈双峰分布, 前后排桩中心所在位置土压力值较小,  $x=0.4\text{m}$  和  $x=0.8\text{m}$  处土压力达到峰值。桩排间土压力值在荷载较大时, 超过后排桩后侧土压力值。

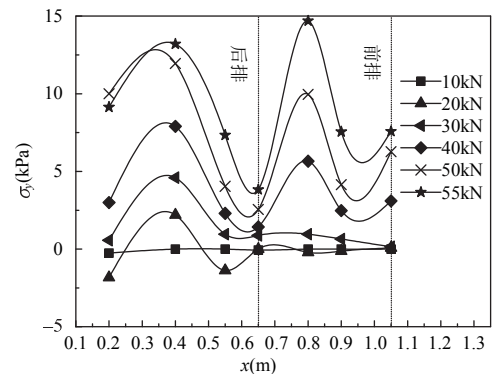
滑体下部(深度  $0.6\text{m}$ )  $x$  向最大土压力在  $x=0.2\text{m}$  处, 随后逐渐减少, 但在荷载达到  $55\text{kN}$  时, 桩排间土压力出现大幅增长。 $y$  向土压力分布呈双峰形分布, 在荷载超过  $40\text{kN}$  时, 桩排间土压力大于后排桩后侧的土压力。

对工况 2 和工况 3 土压力分布进行分析, 滑体中部(深度  $0.3\text{m}$ ) 存在明显的土拱效应, 土拱效应不仅存在于后排桩, 桩排间也很明显。而在滑体下部(深度  $0.6\text{m}$ ), 土拱效应主要存在于后排桩后侧, 主要是由于滑体下部重力作用较大且桩身位移较小, 土拱效应没有滑体中部明显。工况 3 将前排桩间距扩大一倍, 后排桩向前传递的滑坡推力全部由桩排间土体传递到前排桩, 桩排间土拱效应比工况 2 明显。试验中未见土体绕流现象, 可见土拱效应

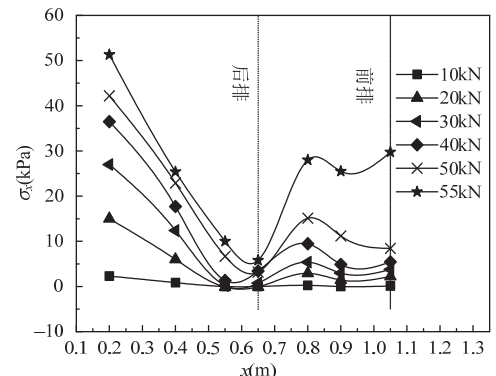
的有效性。



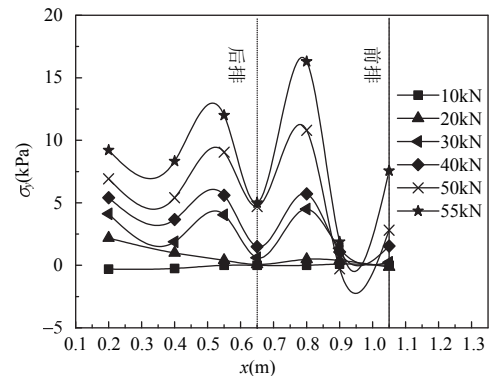
(a)  $0.3\text{m}$   $\sigma_x$



(b)  $0.3\text{m}$  处  $\sigma_y$



(c)  $0.6\text{m}$  处  $\sigma_x$



(d)  $0.6\text{m}$  处  $\sigma_y$

图 8 工况 3 滑体土压力分布

Fig.8 The horizontal earth pressure at the sliding-bosy of Test 3

### 3 结论

鉴于传统方法设计的悬臂式双排抗滑桩的前排桩受力较小不能充分发挥作用,采用变刚度调平设计方法,设计了室内水平推桩模型试验。通过试验,得到的主要结论如下。

(1) 前排桩负弯矩较小,锚固段弯矩呈倒三角形分布。后排桩弯矩呈 S 形分布,受荷段负弯矩较大,前排桩的存在促使后排桩受荷段出现负弯矩,减少了后排桩的最大弯矩。工况 3 将前排桩间距增大一倍,前后排桩最大弯矩差值减小,推力分配更为均衡,前后排桩充分发挥作用。

(2) 根据荷载-位移曲线,双排桩在推力作用下的发展过程被划分为三个阶段:弹性变形阶段、加速变形阶段以及塑性破坏阶段。定义了模型边坡安全系数,得到工况 2 和工况 3 的安全系数分别为 2.5 和 2.25,表明适当增大前排桩间距并不会明显降低模型边坡的安全系数。

(3) 悬臂式双排抗滑桩存在明显的土拱效应,且呈三维分布。按照位置可以划分为后排桩后侧土拱效应、桩排间土拱效应、前排桩前侧土拱效应。适当扩大前排桩的间距使桩排间土拱效应增强,桩间土体保持稳定。在滑体中部,后排桩向前产生较大的位移,对桩排间土体产生挤压作用,桩排间土拱效应明显。在滑体下部,重力作用较大且桩身位移较小,土拱效应主要存在于后排桩后侧,桩排间土拱效应不显著。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen Zuyu, Wang Zhen, Xi Hao, et al. Recent advances in high slope reinforcement in China: Case studies [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8: 775-788
- [2] 申永江, 项正良, 杨明. 柔性双排长短组合桩滑坡推力的计算方法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3597-3602 (Shen Yongjiang, Xiang Zhengliang, Yang Ming. Calculation method of thrust force on the flexible double rows long-short piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3597-3602 (in Chinese))
- [3] 温祥虎, 叶四桥, 毛晓光. 悬臂式双排桩与承台式双排桩的对比研究[J]. *公路工程*, 2016, 41(2): 251-255 (Wen Xianghu, Ye Siqiao, Mao Xiaoguang. Comparative study of cantilever double-row piles and cushion cap double-row piles [J]. *Highway Engineering*, 2016, 41(2): 251-255 (in Chinese))
- [4] Yu Yang, Shang Yuequan, Sun Hongyue. Bending behavior of double-row stabilizing piles with constructional time delay [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2012, 13(8): 596-609
- [5] 邱志华. 门架式抗滑桩土拱效应的数值分析研究[J]. *土工基础*, 2018, 32(3): 318-321 (Qiu Zhihua. Arching effect of the pile frames and its numerical simulations [J]. *Soil Engineering and Foundations*, 2018, 32(3): 318-321 (in Chinese))
- [6] Zhao Bo, Wang Yunsheng, Wang Yu, et al. Retaining mechanism and structural characteristics of h type anti-slide pile (hTP pile) and experience with its engineering application [J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 29-37
- [7] 吴红刚, 张乾翼, 周张博. 双排抗滑桩工作性能的模式试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(9): 49-54 (Wu Honggang, Zhang Qianyi, Zhou Zhangbo. Model test research on the working performance of double-row anti-slide pile [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(9): 49-54 (in Chinese))
- [8] 赖杰, 郑颖人, 刘云. 双排抗滑桩抗震性能振动台试验研究及数值分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2015, 46(11): 4307-4315 (Lai Jie, Zheng Yingren, Liu Yun. Shaking table test studies and numerical analysis of double-row anti-slide piles under earthquake [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2015, 46(11): 4307-4315 (in Chinese))
- [9] 肖世国, 何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 376-380 (Xiao Shiguo, He Hong. An approximate analytical method for calculating thrust on double-row stabilizing piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 376-380 (in Chinese))
- [10] Xiao Shiguo, Zeng Jinxiu, Yan Yuping. A rational layout of double-row stabilizing piles for large-scale landslide control [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 76: 309-321
- [11] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增 1): 237-244 (Yang Bo, Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 237-244 (in Chinese))
- [12] 谢芸菲, 迟世春. 桩基础变刚度调平设计研究进展[J]. *建筑结构*, 2017, 47(6): 91-95 (Xie Yunfei, Chi Shichun. Review of variable rigidity design method for balance settlement of pile foundation [J]. *Building Structure*, 2017, 47(6): 91-95 (in Chinese))
- [13] 董捷. 悬臂桩三维土拱效应及嵌固段地基反力研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009 (Dong Jie. Study on three-dimensional soil arching effect of cantilever piles and ground resisting force acted on its build-in zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009 (in Chinese))
- [14] 赵晓珂, 雷用, 胡明, 等. 梅花型布置双排抗滑桩合理桩位研究[J]. *后勤工程学院学报*, 2015, 31(2): 11-16 (Zhao Xiaoke, Lei Yong, Hu Ming, et al. Study on reasonable location of quincuncial layout double row anti slide pile [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2015, 31(2): 11-16 (in Chinese))
- [15] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民. 框架微型桩结构抗滑特性的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 3039-3044 (Sun Shuwei, Zhu Benzhen, Ma



- Huimin. Model experimental research on anti-sliding characteristics of micropiles with cap beam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3039-3044 (in Chinese)
- [16] 欧孝夺, 唐迎春, 崔伟, 等. H 型抗滑桩模型试验及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1943 (Ou Xiaoduo, Tang Yingchun, Cui Wei, et al. Model test and numerical simulation of h-shaped anti-sliding pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2012, 31(9): 1936-1943 (in Chinese))
- [17] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008 (Zhang Yongxing. Slope engineering [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2008 (in Chinese))
- [18] Robert Y L, Mohammad Y. Three dimensional finite element study of arching behavior in slope/drilled shafts system [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(11): 1157-1168

叶金铤 (1986— ), 男, 博士, 讲师。主要从事滑坡支挡结构、基坑支护等方面的研究。

俞 缙 (1978— ), 男, 博士, 教授。主要从事岩土力学与地下工程领域的研究。

林植超 (1991— ), 男, 硕士, 助理工程师。主要从事隧道工程方面的研究。

周先齐 (1982— ), 男, 博士, 副教授。主要从事岩土力学与地下工程方面的研究。

刘士雨 (1979— ), 男, 博士, 讲师。主要从事岩土体加固等方面的研究。

涂兵雄 (1984— ), 男, 博士, 讲师。主要从事深基坑支护及高边坡锚固方向研究。