

# 基于透明土的不同间、排距抗滑桩边坡滑移特征

刘强<sup>1</sup>, 吴能森<sup>2</sup>, 张震<sup>1</sup>

(1. 新疆理工学院 机电工程学院, 新疆 阿克苏 843000;

2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350100)

**摘要:** 为探讨不同间、排距抗滑桩支护下边坡的滑移规律和特征, 采用透明土模型试验并结合粒子图像测速技术, 进行不同间、排距抗滑桩加固下边坡透明土试验, 以探讨坡顶受荷下抗滑桩边坡土体的整体移动规律和滑移破坏特征。通过不同间、排距抗滑桩加固边坡土体的位移矢量图、位移等值线图以及荷载-位移曲线特征分析。结果表明: 抗滑桩边坡的滑移过程可分为稳定、匀速和加速变形3个阶段, 边坡极限承载力随桩间、排距的减小有所增大; 抗滑桩加固边坡的滑动层深度随桩间、排距的扩大而加深, 间、排距为 $3b$ 时, 出现坡面浅层和桩身中部位置的两个深浅不一的滑动面, 表现为越顶剪切和桩土体系共同倾覆破坏。基于研究结论, 对边坡防护提出以下建议: 对于重要边坡防护工程, 方形抗滑桩间、排距不宜超过桩截面边长的3倍和4倍, 对于承载力要求不高的边坡工程, 可适当增加桩间、排距以减小施工成本。

**关键词:** 抗滑桩; 桩间排距; 透明土模型试验; 土体位移场; 边坡滑移

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0333-08

## Sliding characteristics of anti-slide pile slopes with different pile spacing and row spacing based on transparent soil

LIU Qiang<sup>1</sup>, WU Nengsen<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843000 China;

2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100; China)

**Abstract:** In order to study the sliding process and characteristics of slopes supported by anti-slide piles with different pile spacing and row spacing, transparent soil model test combined with PIV digital image processing technology was adopted to conduct tests on the transparent soil of slope reinforced by anti-slide piles with different pile spacing and row spacing, so as to study the displacement law and sliding failure characteristics of anti-slide pile slope soil under load at the top of the slope. The displacement vector diagram, displacement contour map and load-displacement curve characteristics of slope soil reinforced by anti-slide piles with different pile spacing and row spacing were analyzed. Results show that the sliding process of the anti-slide pile slope can be divided into three stages: stable, uniform, and accelerated deformation. The ultimate bearing capacity of the slope increases with the decrease of the pile spacing. The depth of the sliding layer of the slope deepens with the increase of pile spacing and row spacing. When the spacing is  $3b$ , there are two sliding surfaces with different depths in the shallow layer of the slope and the middle of the pile body, manifested as the joint overturning failure of the top shear and pile soil system. Based on the research conclusions, the following suggestions are put forward for engineering applications. Firstly, for important slope protection projects, the pile spacing and row spacing of square anti-slide piles should not exceed 3 and 4 times the side length of the pile section. Secondly, for slope engineering with low bearing capacity requirements, the pile spacing and row spacing can be appropriately increased to reduce construction costs.

**Keywords:** anti-slide pile; pile spacing and row spacing; transparent soil model test; soil displacement field; slope sliding

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 新疆阿克苏地区科技兴阿项目(KJXA-2022AN018)

第一作者简介: 刘强(1994—), 男, 四川乐至人, 助教, 硕士, 研究方向: 岩土与地下工程。

通信作者: 吴能森(1964—), 男, 福建福清人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

抗滑桩是一种用于整治滑坡的支撑建筑物,其抗滑原理主要基于桩与周围岩土体的共同作用,即抗滑桩穿过滑体,在滑床的一定深度处锚固,以抵抗滑坡推力的作用。目前,许多学者采用室内模型试验对抗滑桩边坡滑移规律展开研究。陈建峰等<sup>[1]</sup>利用透明土模型试验揭示了抗滑桩锚固长度对边坡滑动面和抗滑能力的影响机理。屈俊童等<sup>[2]</sup>开展室内结构模型试验,总结出变截面抗滑桩的受力性能和工作机理。景彬余等<sup>[3]</sup>采用模型试验分析了抗滑桩在路基边坡加固过程中桩身前后的土压力分布规律。以上的模型试验研究主要集中在抗滑桩桩身的受力和变形特征上,而对坡内土体变形特征的关注较少。同时,虽然在传统室内模拟试验中使用介入式传感器对桩土体系变形进行量测,但由于其覆盖范围有限,传感器刚度和土样扰动所引起的量测误差,导致对抗滑桩边坡滑移机理的认识存在分歧。

近年来,透明土技术逐渐运用于岩土工程领域。阙云等<sup>[4]</sup>运用透明土试验技术,分析了不同边界条件下非饱和土均匀入渗的特征。邓友生等<sup>[5]</sup>通过透明土和粒子图像测速技术,研究了梅花型桩沉桩过程中的挤土效应。张建伟<sup>[6]</sup>、刘强等<sup>[7]</sup>对不同土质边坡滑移特征展开研究。

为了弥补传统模型试验的缺陷,本研究利用透明土模型试验和粒子图像测速技术,以抗滑桩加固的二元结构边坡为研究对象,对坡内桩土体系变形可视化观测与研究,以揭示滑坡体内部变形规律及不同间、排距抗滑桩边坡的滑移特征。

## 1 模型试验

### 1.1 模型试验系统

利用激光散斑技术结合数字图像处理监测土体位移,得出土体变形规律,试验系统示意图如图

1 所示。其中,激光发射器布设于模型箱右侧 30 cm 处,以斜下 45° 方向照射至透明土边坡形成激光散斑面,切面位于模型中心处。工业相机布设于模型箱正前方 40 cm、1/2 高度处。标准重量砝码置于加载平台上以模拟边坡下滑推力,采用数字位移监测器量测并记录加载平台下降高度。

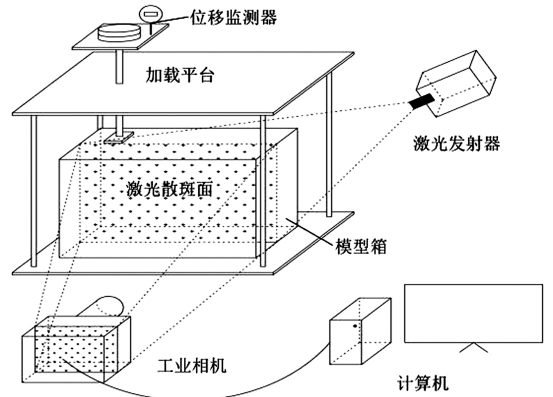


图 1 模型试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of model test system

### 1.2 模型试验材料

透明土材料采用 600 目(0.23 μm)沉淀白炭黑(无定型硅石粉末)模拟土体颗粒,选用化妆品级 15 号白油和正十二烷的混合溶液作为孔隙溶液,配制材料基本物理指标如表 1 所示。在室温 22 °C 下试验,两种溶液按质量比 1:1 混合后的折射率为 1.442 0,与沉淀白炭黑折射率一致,土样透明厚度可达 15 cm。沉淀白炭黑与混合溶液按质量比 1:5 混合,采用真空器去除气泡后,堆载预压 10 kPa 荷载进行土样固结,经土工试验测得该固结压力下土样的黏聚力  $c = 7.35$  kPa,内摩擦角  $\varphi = 16.30^\circ$ ,压缩模量  $E_s = 1.85$  MPa,压缩系数  $\alpha_v = 0.88$  MPa<sup>-1</sup>,抗剪强度指标与一般黏土相近,属于高压缩性土。

表 1 孔隙溶液基本物理指标

Tab.1 Basic physical indicators of pore solution

材料类型	颜色外观	分子式	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	熔点/°C	沸点/°C	22 °C 时材料的折射率
15 号白油	无色透明液体	C <sub>15</sub> H <sub>31</sub> ClO <sub>7</sub>	0.825	-24.0	300.0	1.458 5
正十二烷	无色透明液体	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.750	-9.6	216.3	1.421 5

透明土中的散斑点是记录模型内部土体位移规律的重要途径。本次试验选用化妆品级钛白粉作为示踪粒子(图 2),以此来记录土体位移变化。

钛白粉具有良好的白度和光亮度,且不与透明土配制材料发生反应,将其分散在透明土中,在激光的照射下会形成亮斑点(图 3),可清晰显示土颗

粒的运动轨迹。

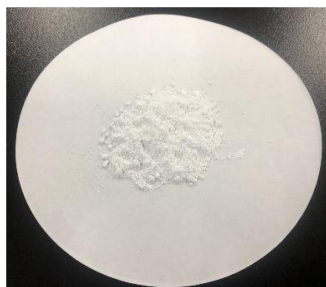


图 2 钛白粉实物图

Fig.2 Physical image of titanium dioxide powder

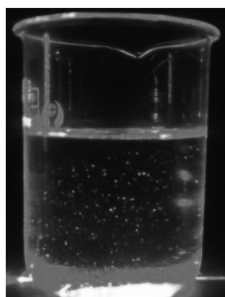


图 3 激光散斑

Fig.3 Laser speckle surface

### 1.3 试验设计

#### 1.3.1 试验模型

试验设计模拟的二元结构边坡滑体垂直高度 10 m,坡面长 18 m,坡顶上台阶长 10 m,坡角 30°,滑体下部有倾角为 30°的基岩,坡体埋置截面尺寸为 1 m×1 m 的双排方形抗滑桩,梅花形布设在坡体中部。试验模型采取的几何相似比  $n = 100:1$ (原型尺寸:模型尺寸),依此设计模型箱的净尺寸为 40 cm×30 cm×15 cm(长×宽×高),内置坡面打磨处理的基岩模型,均由透明亚克力材料胶结制作,边坡模型尺寸如图 4 所示。透明有机玻璃的弹性模量约为 22.24 GPa,与混凝土的弹性模量范围(22~38 GPa)相对接近。在常温条件下,透明有机玻璃展现出稳定的力学性能,能够承受较大的变形,因此在受到较大的作用力时不易断裂。此外,这种材料的透明性允许激光穿透桩体,在透明土中形成良好的散斑面,对于试验数据的采集十分有利。在本次试验中,为了模拟实际工程中的抗滑桩,采用截面尺寸为 1 cm×1 cm 的方形透明有机玻璃模型桩。

#### 1.3.2 试验方案

本文共开展 1 组等间、排距对比试验和 4 组不同间、排距抗滑桩边坡试验,具体抗滑桩布设参数

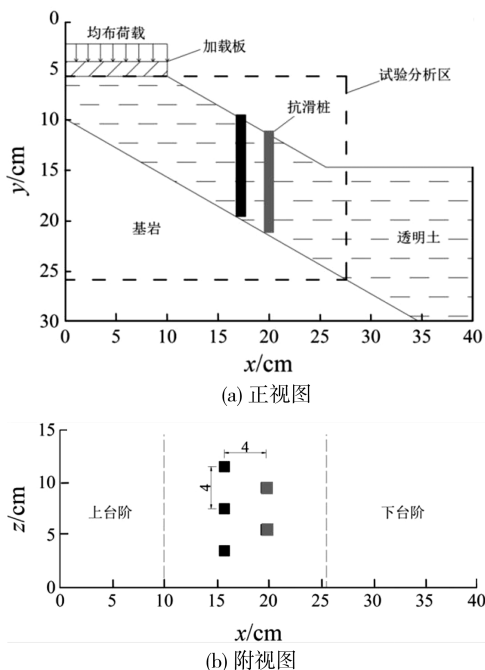


图 4 抗滑桩加固边坡模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of anti-slide pile reinforced slope model

见表 3。表中  $b$  为方形抗滑桩截面边长,抗滑桩排距的改变是自坡中等距向坡顶和坡脚增大(或减小),抗滑桩坐落在基岩表面,以摩擦方式接触。

表 3 透明土模型试验方案

Tab.3 Transparent soil model test plan

试验工况	桩间距/cm	桩排距/cm	桩长/cm
1	4b	4b	10
2	3b	4b	10
3	5b	4b	10
4	4b	3b	10
5	4b	5b	10

#### 1.3.3 试验步骤

(1)透明土边坡制作。在室温 22 °C 的条件下,15 号白油和正十二烷按质量比 1:1 配置孔隙溶液,混合期间加入适量钛白粉;将混合溶液和沉淀白炭黑按质量比 1:5 配置透明土;利用真空泵在负压 0.1 MPa 条件下除去气泡;采用砝码堆载 10 kPa 对土样按每层 15 cm 厚度分层固结,并用数字位移监测器监测土样的固结沉降量达到标准规定后形成坡面。

(2)边坡加荷方式。坡顶采用砝码加载,同

时在坡顶放置尺寸为  $15\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)的透明亚克力板,以保证受荷均匀。加载从  $1\text{ kg}$  开始,并按每级  $1\text{ kg}$  增量的方式连续施加,直到坡内土体发生剪切破坏或抗滑桩出现明显的位移后停止加载。

(3) 试验数据采集。激光切面为模型中心面,工业相机放置在距离模型箱正前方  $30\text{ cm}$  位置,相机的拍摄间隔设定为每  $30\text{ s}$  一张照片,每级加载过程拍摄 5 张照片并储存。为了保证数据的完整性和连续性,各级荷载之间的间隔时间严格控制在  $5\text{ s}$  之内。由于 15 号白油和正十二烷的折射率对温度变化敏感,需要保持室内温度基本恒定,温差控制不超过  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 2 试验结果分析

利用基于 Matlab 的 PIVLab 粒子图像分析程序,对连续捕捉的激光散斑面图像进行后处理分析,并获取土体的位移矢量图,采用 Origin 软件绘制荷载-位移曲线及土体的归一化位移等值线图。在位移矢量图中,矢量的大小和方向分别反映了土体的位移程度及方向,规定土体位移的正向与坐标轴的正向保持一致。由于土颗粒的位移量相对较小,对位移矢量适当放大处理。在归一化位移等值线图中,土体位移和坐标轴均采用模型桩横截面边长  $b = 10\text{ mm}$  作归一化处理。

### 2.1 抗滑桩边坡滑移特征分析

图 5 为工况 1 坡顶荷载-位移关系曲线。由图可见,随着荷载的增加,坡顶竖向位移也逐渐增大,但曲线的变化规律存在差异。当坡顶荷载从 0 增加到  $22\text{ kg}$  时,竖向位移匀速增加,增量约为  $0.30\text{ mm/kg}$ 。当荷载继续增加到  $23\text{ kg}$  时,坡顶竖向位移从  $4.65\text{ mm}$  迅速增加到  $5.68\text{ mm}$ ,增量为  $1.03\text{ mm/kg}$ ,较前一阶段明显增大。而后续加载过程中,曲线斜率持续增大,边坡峰值承载力可取  $22\text{ kg}$ 。

图 6 展示了工况 1 前排桩桩身位移与坡顶荷载之间的关系 ( $h$  为  $2\sim 10\text{ cm}$ ,自下而上)。从图中可看出,桩身水平位移变化明显地分为 3 个阶段:当顶部荷载小于  $8\text{ kg}$  时,桩身水平位移累积量小于  $0.08\text{ mm}$ ,表明在此阶段中,坡内土体持续压密,处于弹性平衡状态,滑体依靠土体自身的抗剪强度及抗滑桩的阻滑作用维持土坡稳定。当坡顶荷载从  $8\text{ kg}$  增加到  $22\text{ kg}$  时,桩身水平位移随

着坡顶荷载的增加而近似线性增长,最大水平位移增量出现在桩顶,从  $0.08\text{ mm}$  线性增加至  $1.35\text{ mm}$ ,可认为在此加载过程中,坡内土体的塑性区逐步由坡顶向坡中扩展,桩体则出现挠曲变形,其水平位移呈匀速变化趋势。当顶部荷载持续增加至  $25\text{ kg}$  时,桩身最大水平位移从  $1.35\text{ mm}$  迅速增加至  $2.34\text{ mm}$ ,曲线斜率不断增大,表明整个坡体出现塑性贯通区,坡体内部滑动面加速形成,由于桩、土相对刚度较大,且桩下端得不到充分的水平约束,失稳破坏时桩体出现刚体转动,与土体一起发生倾覆破坏。

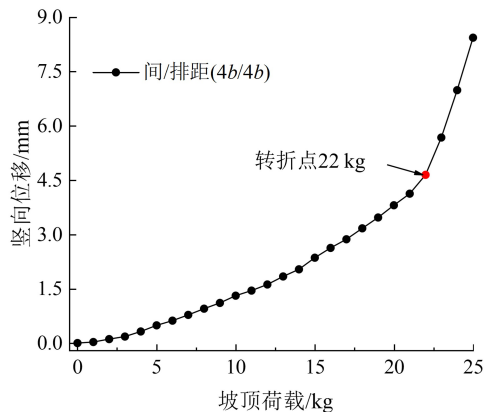


图 5 双排桩边坡坡顶荷载-位移曲线  
Fig.5 Load displacement curve of double row pile slope top

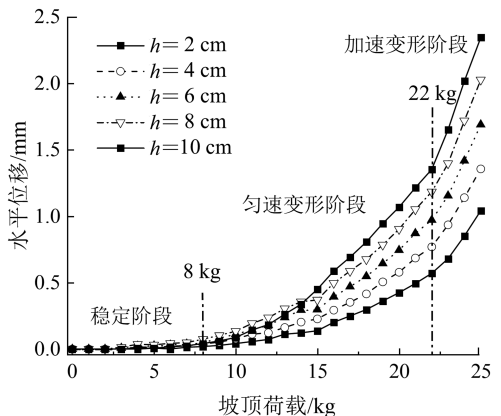


图 6 双排桩边坡各级荷载下桩身水平位移  
Fig.6 Horizontal displacement of pile body under various loads on double row pile slope

图 7 为工况 1 各荷载下边坡土体位移矢量图,由图可见,荷载增至  $8\text{ kg}$  时,土体变形主要集中在坡顶区域,土体持续被压密;随着荷载持续增加至  $15\text{ kg}$  时,土体变形逐渐向坡中和基岩面发展,整个坡体出现明显位移,土体位移大小相等且

分布均匀;在荷载达到极限荷载 22 kg 时,土体位移持续加大,由于抗滑桩的阻挡,土体位移矢量方向由斜下 30° 逐渐过渡至与抗滑桩垂直,位移大小分布较前一阶段明显不同,主要表现为桩前位移大于桩后,且伴桩身自下而上逐渐增大;超过峰值承载力至 23 kg 时,土体位移进一步增大。根

据试验可观测滑动体与稳定地层的分界面,以及图示最大位移矢量范围,可绘出坡体内部沿基岩面至后排桩顶的圆弧滑动面(图 7(d)),滑动面以下出现较小位移主要是因为土体受荷挤密,并且在桩顶浅层区域土体位移矢量有斜上剪出趋势,试验观察到桩顶区域土体出现隆起变形。

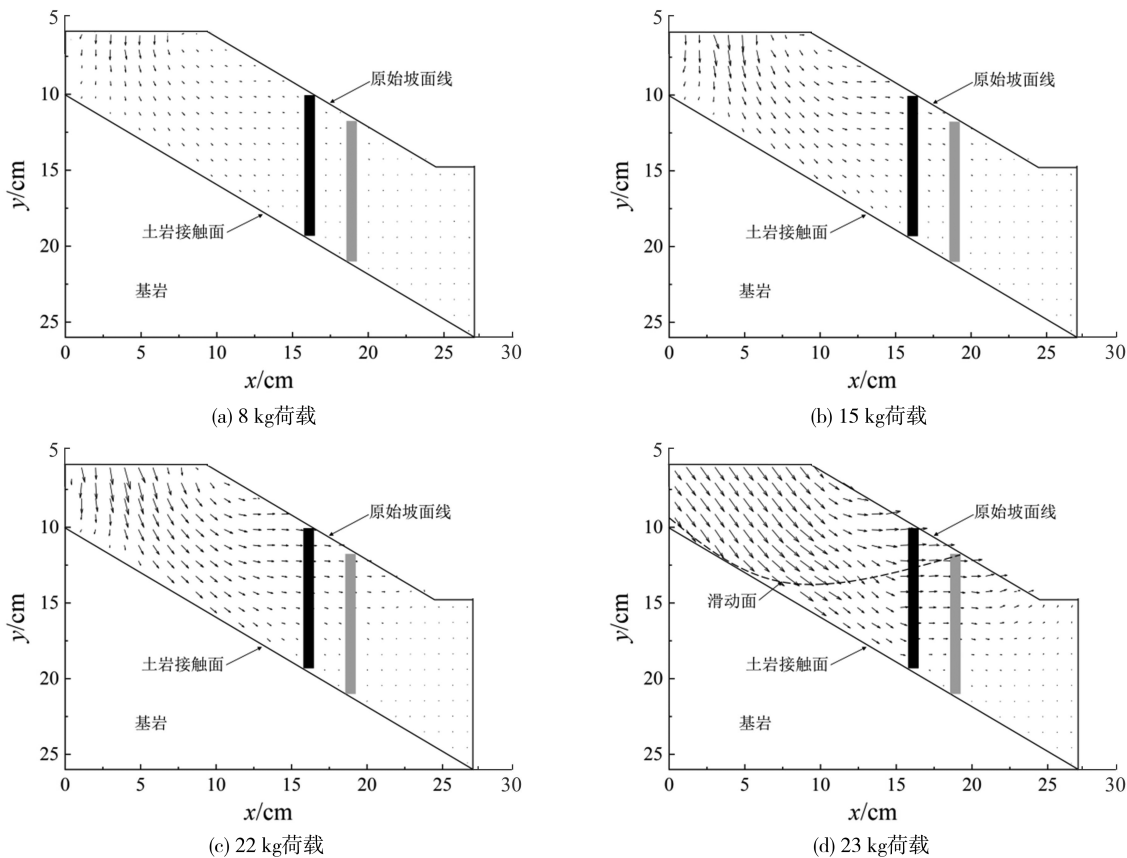


图7 各级荷载下抗滑桩边坡土体位移矢量图

Fig.7 Vector diagram of soil displacement of anti-slide pile slope under various loads

图 8 为抗滑桩边坡在极限荷载下土体归一化位移等值线图,由图可见,土体位移主要集中在桩前区域,最大水平位移出现在坡面浅层,桩周土体水平位移等值线较密集,这是由于抗滑桩的阻滑作用,致使位移迅速减小。最大竖向位移在坡顶区域,表明此区域土体在垂直方向上发生显著下沉,而桩顶至坡脚浅层区域出现负值,意味着这部分土体在垂直方向上相对于其他区域是上升的。综合判断,整个坡体破坏形式呈坡顶土体逐渐下沉,从坡面低位处剪出,滑动面为坡面圆。

## 2.2 不同间、排距抗滑桩边坡滑移特征分析

图 9 为工况 1~5 下坡顶竖向位移随荷载变

化曲线,由图可见,各荷载-竖向位移曲线变化趋势类似,即随坡顶荷载的增加,坡顶竖向位移逐渐增大,在达到某一峰值承载力前,曲线的斜率基本保持不变,超过峰值承载力,竖向位移发生突变,曲线斜率不断增大,边坡失稳滑移。此外,随桩间、排距不断增大,边坡稳定峰值承载力有所减小,5 种工况下边坡稳定峰值承载力(按图例自上而下)分别为 23、22、20、25、20 kg,此时坡顶竖向位移分别为 4.05、4.71、5.01、5.06、5.23 mm。

图 10 为工况 1~5 下前排桩桩顶水平位移变化规律(由于荷载小于 14 kg 时位移累积量较小,图中不予展示)。由图可见,不同间、排距抗滑桩边坡变形同样可分为 2 个阶段,即在坡顶荷载逐

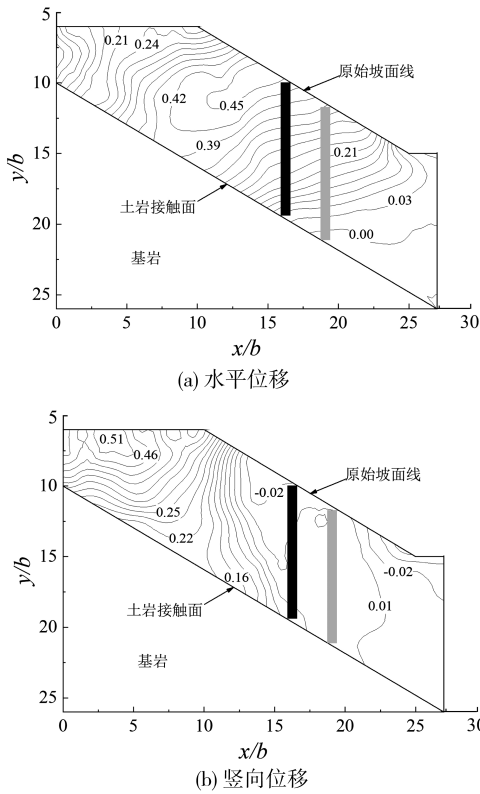


图 8 抗滑桩边坡土体归一化位移等值线图

Fig.8 Normalized displacement contour map of anti-slide pile slope soil

渐增加至极限荷载过程中, 桩顶水平位移呈线性增长累积, 为匀速变形阶段; 超过边坡极限荷载后, 位移增量持续增加, 曲线呈抛物线, 为加速变形阶段。在达到边坡稳定荷载峰值时, 桩顶水平位移值分别为 1.78、1.65、1.68、2.21、1.58 mm。同时可以发现, 在相同荷载下, 不同间、排距抗滑桩桩顶水平位移值有所不同, 随间、排距增加而增大。这是因为抗滑桩不仅依靠自身锚固段的抗力起阻滑作用, 同时, 由于土体的抗剪强度, 桩土相互作用会产生应力偏转, 在桩间形成应力拱, 桩间应力能很好地传递至桩上, 从而起到抗滑作用, 即“土拱效应”。抗滑桩间、排距正是影响土拱效应的重要因素, 在间距较小时 ( $3b \rightarrow 4b$ ), 桩间土能够很好地形成土拱区, 在桩土体系的协调作用下起到良好的阻滑效果。随着桩间距的增大 ( $4b \rightarrow 5b$ ), 桩间土体难以形成土拱, 土拱效应的影响大幅度削弱, 对桩间土体的约束作用逐渐减小, 阻滑能力下降, 从而导致桩身水平位移增幅逐渐变大。同样地, 由于抗滑桩排距较小时 ( $3b \rightarrow 4b$ ), 后排桩能及时阻挡前排桩间“溢出”的土体, 承担此部

分土压力, 并以此作为拱脚在后排桩间土内形成二次土拱效应, 前、后排桩以叠加形态相互辅助, 从而提高双排桩的阻滑效果。持续增大排距 ( $4b \rightarrow 5b$ ), 因排距过大, 前、后排桩相对独立, 前排桩需要承担更多滑坡推力, 此时桩间土承担荷载超过其抗剪强度, 造成前排桩桩间土拱效应失效, 其支挡能力降低, 出现水平位移量增大的情况。

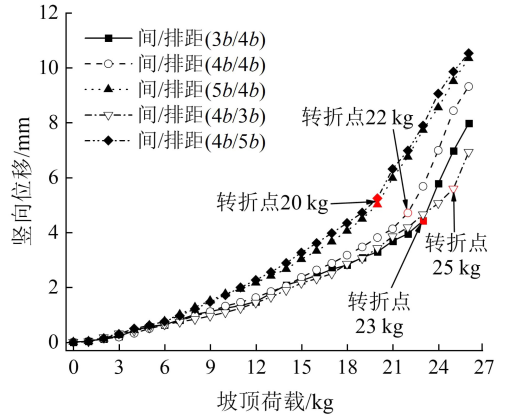


图 9 不同间、排距抗滑桩边坡坡顶荷载-竖向位移曲线  
Fig.9 Load-vertical displacement curve of slope top of anti-slide piles with different pile spacing and row spacing

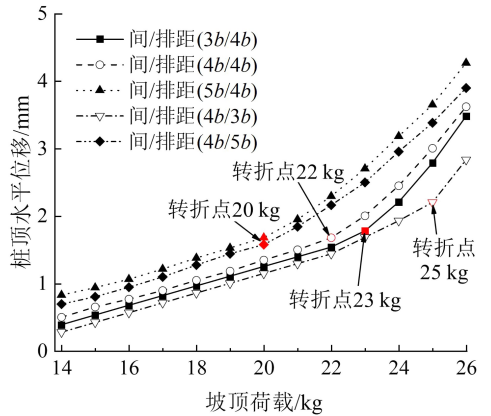


图 10 不同间、排距抗滑桩桩顶水平位移曲线  
Fig.10 Horizontal displacement curve of anti-slide pile top with different pile spacing and row spacing

图 11 为工况 2~5 极限荷载下边坡土体位移矢量图, 由位移矢量箭头方向可以判断, 坡顶受荷载下土体位移方向沿斜下  $60^\circ$  逐渐延伸至与基岩面平行, 后续发展为垂直于桩身, 整个坡体位移大小分布不均, 表现为桩前大于桩后, 桩底小于桩顶。但不同间、排距抗滑桩边坡滑动面位置有所不同, 间、排距较小时 ( $3b$ ), 在桩前浅层和桩身深部区域出现两个滑动面。这是由于对于此次试验中的

黏土边坡而言,间、排距较小的抗滑桩已经发挥了良好的阻滑效果,不仅在深层形成了滑动面,而且抗滑桩有效地阻挡了深层土体的水平位移,致使土体向坡面浅层移动,由于土质自身强度较差,最终越过桩顶,在桩前浅层土体区域内形成了新的

圆弧滑动面。对于实际软弱土质边坡防护,为避免出现二次滑动面,在保证边坡承载力的前提下,可适当增加桩的间、排距。

图 12~15 展示了工况 2~5 极限荷载下土体归一化位移等值线图。

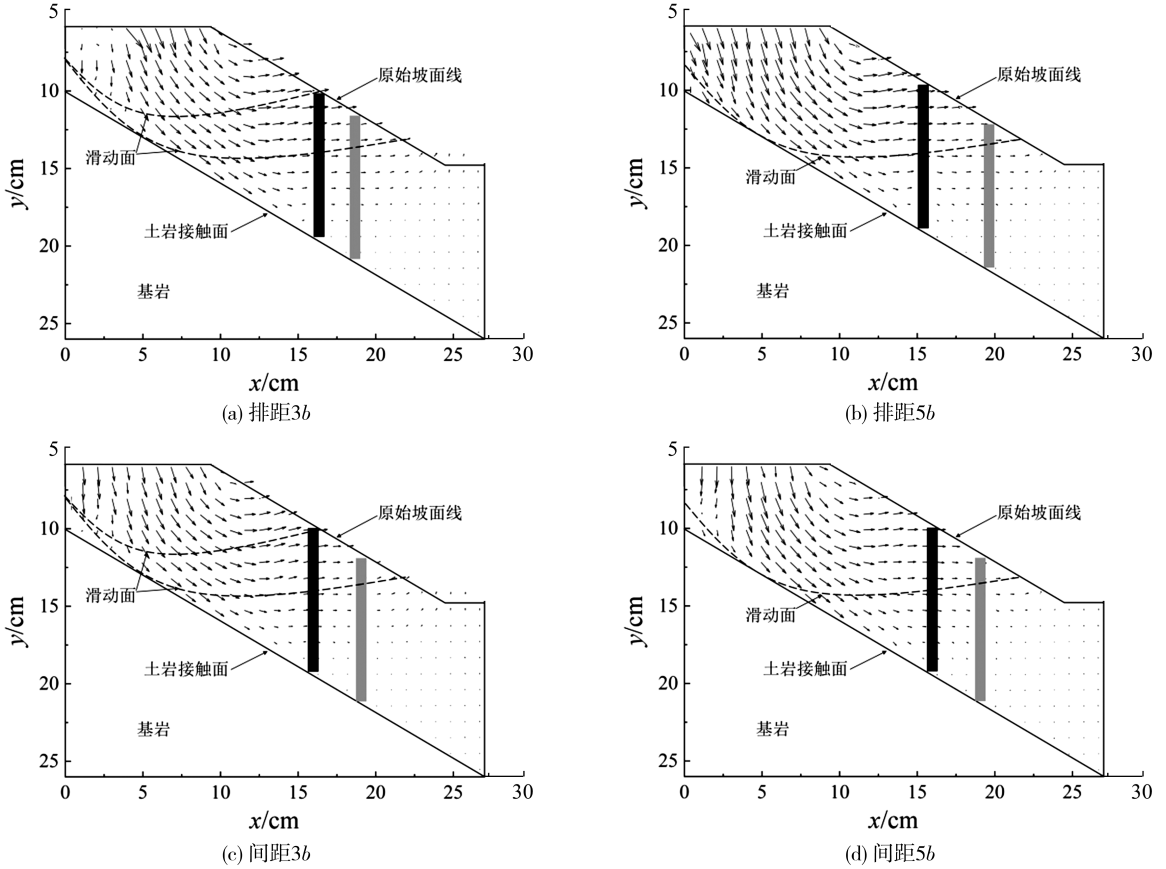


图 11 不同间、排距抗滑桩边坡土体位移矢量图

Fig.11 Vector diagram of soil displacement of anti-slide pile slopes with different pile spacing and row spacing

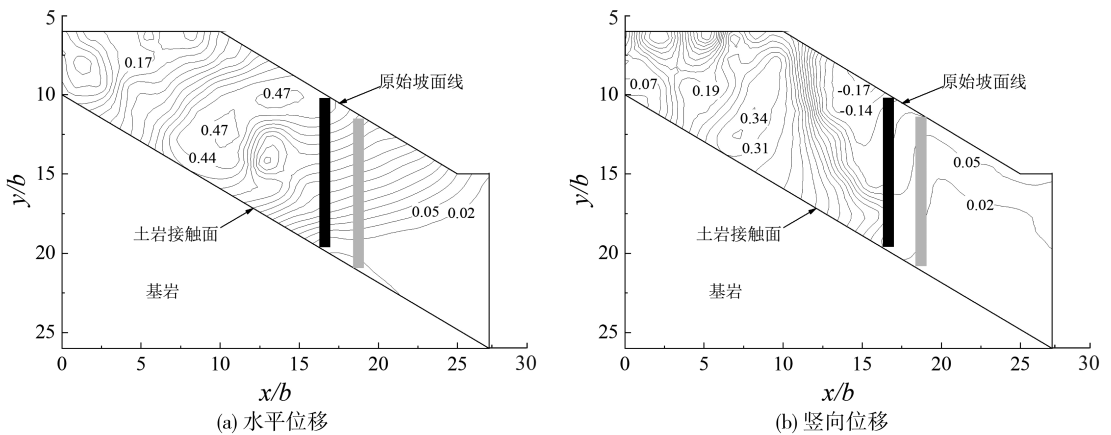


图 12 排距 3b 抗滑桩边坡土体归一化位移等值线图

Fig.12 Normalized displacement contour map of soil mass of anti-slide pile slope with row spacing 3b

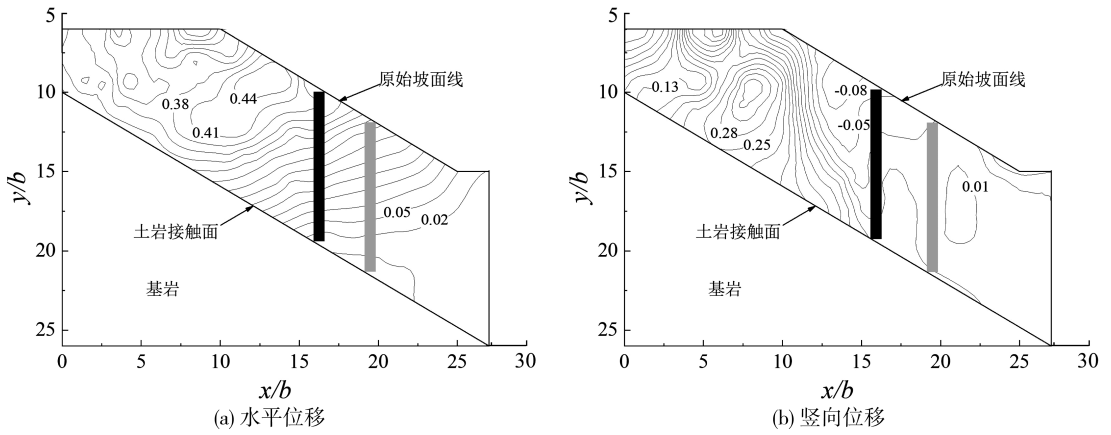


图 13 排距  $5b$  抗滑桩边坡土体归一化位移等值线图

Fig.13 Normalized displacement contour map of soil mass of anti-slide pile slope with row spacing  $5b$

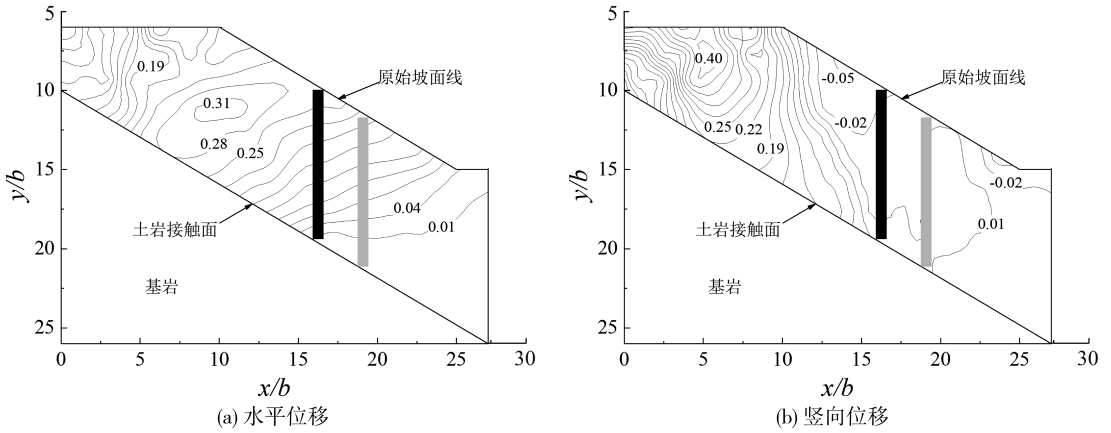


图 14 间距  $3b$  抗滑桩边坡土体归一化位移等值线图

Fig.14 Normalized displacement contour map of soil of anti-slide pile slope with spacing  $3b$

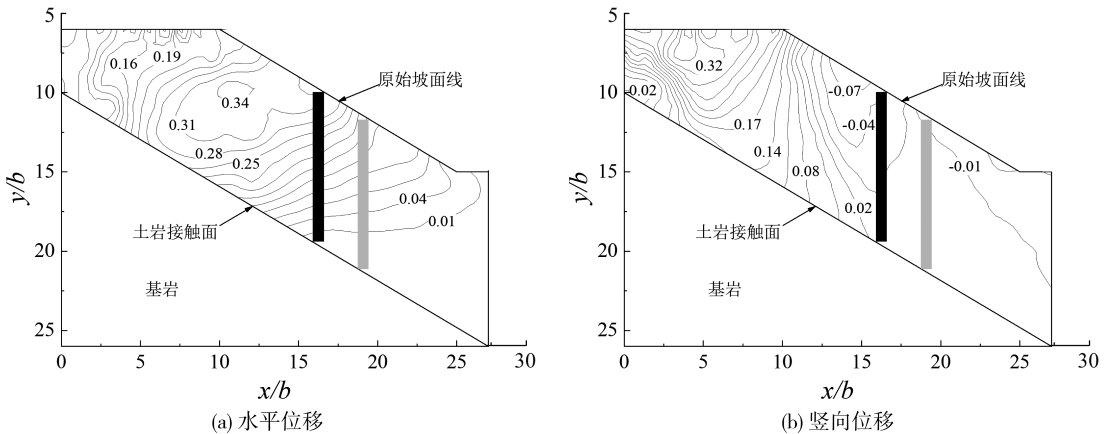


图 15 间距  $5b$  抗滑桩边坡土体归一化位移等值线图

Fig.15 Normalized displacement contour map of soil of anti-slide pile slope with spacing  $5b$

由图可见,各工况下位移分布区域类似,最大水平位移主要集中在抗滑桩前,竖向位移最大值分布于坡顶区域,自上而下沿土岩交界面逐渐减小,在抗滑桩桩顶周围竖向位移出现负值。但不

同间、排距其分布区域略有不同,抗滑桩间、排距为  $3b$  时,仅在前排桩桩周出现负值,坡内土体出现越顶剪切破坏现象;而间、排距为  $5b$  时,其分布 (下转第 355 页)

- CH005 isolated from petroleum contaminated sites in India[J]. *Energy, Ecology and Environment*, 2018, 3(3): 162-170.
- [17] 刘雪,温全宝,张雷,等.一株钠长石分解菌的筛选及其生长特性[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(5): 1801-1814.
- [18] 王晓萍,石贤爱.尼古丁降解菌株的分离及其降解特性[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2023, 52(4): 540-545.
- [19] PSAHI S K, GOKHALE S. Benzene biodegradation by indigenous mixed microbial culture: kinetic modeling and process optimization[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 511-519.
- [20] RAJAMANICKAM R, KALIYAMOORTHY K, RAMACHANDRAN N, et al. Batch biodegradation of toluene by mixed microbial consortia and its kinetics[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 282-288.
- [21] QIN Y, HE Y, SHE Q, et al. Heterogeneity in respiratory electron transfer and adaptive iron utilization in a bacterial biofilm[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3702.
- [22] LIU N, LI D, LI K, et al. Enhanced biodegradation of chlorobenzene via combined  $Fe^{3+}$  and  $Zn^{2+}$  based on rhamnolipid solubilisation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 103(5): 108-118.
- [23] STREESE J, SCHLEGELMILCH M, HEINING K, et al. A macrokinetic model for dimensioning of biofilters for VOC and odour treatment.[J]. *Waste Management*, 2005, 25(9): 965-974.

(责任编辑:方素华)

(上接第340页)

范围延伸至桩身中部和后排桩桩周,桩土一起失稳发生倾覆破坏。表明随抗滑桩间、排距的增加,坡体深层滑动面剪出口会逐渐下移,滑动面由坡面圆逐渐变化为坡脚圆。

## 4 结论

1)抗滑桩边坡土体破坏模式为坡面剪切,滑动面呈坡面圆,整个滑移过程可分为稳定、匀速和加速变形阶段。随着抗滑桩间、排距的减小,边坡极限荷载有所增加,桩间距 $3b$ 、排距 $4b$ 时,不仅边坡峰值承载力最大,而且桩顶水平位移量最小。

2)抗滑桩边坡的滑动面数量和深度会随桩间、排距的变化而变化,间、排距较小时( $3b$ ),会在桩顶浅层和桩身深部区域出现两个圆弧滑动面,间、排距逐渐增大后( $4b$ 和 $5b$ ),深部滑动面的剪出口逐渐向坡脚处移动。对于土体强度不高的边坡工程,可适当增加桩的间、排距来避免二次滑动面的产生。

3)抗滑桩间、排距是影响边坡承载能力的重要因素,对于关键性的边坡防护工程而言,建议方形抗滑桩的间距与排距不应分别超出桩截面边长的3倍和4倍。然而,在边坡承载力要求相对较低的工程中,为降低施工成本,可以考虑适度地增大桩间距与桩排距。

## 参考文献:

- [1] 陈建峰,郭小鹏,田丹,等.抗滑桩锚固长度对均质边坡滑动面及抗滑能力影响研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 42-49.
- [2] 屈俊童,崔茂俊,孙再斌,等.不同滑坡推力模式下新型变截面抗滑桩模型试验研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(S2): 2490-2496.
- [3] 景彬余,温树杰.抗滑桩加固红砂岩风化土路基边坡模型试验[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(1): 109-114.
- [4] 阙云,翁斌,蔡松林,等.基于透明土技术的非饱和和均匀流运移机理分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(4): 946-960.
- [5] 邓友生,李龙,赵衡,等.基于透明土的梅花桩沉桩挤土效应[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(7): 205-213.
- [6] 张建伟,丁乐,樊亚龙,等.基于透明土模型试验的卸载后土体变形分析[J]. *中国科技论文*, 2022, 17(2): 127-132, 140.
- [7] 刘强,吴能森,黄志波,等.抗滑桩加固二元结构边坡可视化模型试验[J]. *林业工程学报*, 2023, 8(2): 172-179.

(责任编辑:陈雯)