

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.056>



基于土拱效应的多层滑带滑坡抗滑桩加固效果研究

李亚博, 胡新丽*, 徐 楚, 张海燕, 刘欣宇

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘 要: 大型滑坡受工程地质条件影响, 通常具有多滑带结构特征。而抗滑桩加固研究中较少考虑土拱效应对多滑带滑坡的影响。因此, 开展了推力荷载作用下多层滑带滑坡—抗滑桩体系的数值模拟, 探讨了不同桩间距和桩嵌固深度对多层滑带抗滑桩土拱效应的影响, 并评估了不同抗滑桩设计参数下桩的加固效果。研究结果表明: (1) 在多层滑带滑坡运动过程中, 桩周应力沿深度方向呈现双向多级土拱分布, 表现为“桩后土拱—桩前土拱—桩后土拱”现象; (2) 桩间距由 6 倍减小至 2 倍时, 抗滑桩在不同深度的端承土拱效应越明显, 加固效果越好。桩间距由 2 倍增大至 6 倍时, 桩间摩擦土拱逐渐成为主要的抗滑作用, 抗滑桩加固效果变差; (3) 嵌固深度的变化不会改变抗滑桩不同深度处的土拱类型, 但会影响土拱的强度; (4) 当浅层滑动主导时, 减小桩间距可以提高抗滑桩的加固效果; 而当深层滑动主导时, 应增加嵌固深度以提高加固效果。

关键词: 多层滑带滑坡; 抗滑桩设计参数; 土拱效应; 数值模拟; 加固效果; 工程地质。

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000—2383(2025)08—3153—14

收稿日期: 2025-02-03

Study on the Reinforcement Effect for Anti-Slide Piles of the Multi-Sliding Zones Landslide Based on Soil Arching Effect

Li Yabo, Hu Xinli*, Xu Chu, Zhang Haiyan, Liu Xinyu

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Large landslides are typically characterized by the multi-sliding zones structure, influenced by engineering geological conditions. However, the impact of the soil arch effect on multi-sliding zones landslide is often overlooked in studies of anti-slide piles reinforcement. Therefore, numerical simulations of multi-sliding zones landslide-anti-sliding piles system under thrust loading were conducted. These simulations investigated the effects of pile spacing and embedment depth on the soil arching effect across different motion modes and evaluated the reinforcement effectiveness under various design parameters. The results show that: (1) During landslide movement in multi-sliding zones, the stress around the pile exhibits a bidirectional, multi-level soil arch distribution along the depth, manifesting as the phenomenon of “soil arch behind pile-soil arch in front of the pile-soil arch behind pile”. (2) As the pile spacing decreases from six times to two times the pile diameter, the end-bearing soil arch effect at various depths becomes more pronounced, thereby improving the reinforcement effect. Conversely, when the pile spacing increases from two times to six times, the frictional soil arch between the piles gradually becomes the dominant anti-slide mechanism, diminishing the reinforcement effectiveness. (3) Changes in embedding depth do not alter the type of soil arch at different depths but affect the

基金项目: 重点国际(地区)合作与交流项目(No.42020104006)。

作者简介: 李亚博(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟与地质灾害防治的研究工作。ORCID: 0009-0001-8835-5257. E-mail: yaboli@cug.edu.cn

* 通讯作者: 胡新丽, ORCID: 0000-0003-3440-0064. E-mail: huxinli@cug.edu.cn

引用格式: 李亚博, 胡新丽, 徐楚, 张海燕, 刘欣宇, 2025. 基于土拱效应的多层滑带滑坡抗滑桩加固效果研究. 地球科学, 50(8): 3153—3166.

Citation: Li Yabo, Hu Xinli, Xu Chu, Zhang Haiyan, Liu Xinyu, 2025. Study on the Reinforcement Effect for Anti-Slide Piles of the Multi-Sliding Zones Landslide Based on Soil Arching Effect. *Earth Science*, 50(8): 3153—3166.

strength of the soil arch.(4) When shallow sliding dominates, reducing pile spacing enhances the reinforcement effect of anti-slide piles; when deep sliding dominates, increasing the embedment depth improves the reinforcement effect.

Key words: multi-sliding zones landslide; anti-slide pile design parameters; soil arching effect; numerical simulation; reinforcement effect; engineering geology.

0 引言

滑坡是全球分布最广的地质灾害之一,给人类生产生活和城市建设带来严重威胁(黄润秋, 2007). 为了控制这类地质灾害,抗滑桩被开发出来,凭借其良好的稳定性和广泛的适用性,在滑坡治理和边坡防护工程中得到广泛应用(Ding *et al.*, 2024). 滑坡抗滑桩加固效果研究可作为抗滑桩优化设计的基础. 因此,研究不同设计参数下抗滑桩的加固效果是非常重要的.

近年来,国内外学者对抗滑桩的加固效果的研究主要集中在桩参数(Ashour *et al.*, 2011; 贾志波等, 2022; Xu *et al.*, 2024)及桩平面布置参数(Li *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020)等方面. Li *et al.* (2015)考虑到滑体的三维特性,提出了一种基于土拱效应和差异桩距分布原理的新型抗滑桩平面优化布置方法. 陈冲等(2019)基于复合单元抗滑桩模型,研究了抗滑桩设计参数对桩加固边坡效果的影响以及抗滑桩的潜在失效模式. 张玲等(2019)从抗滑桩的阻滑能力充分发挥的角度出发,建立了悬臂式抗滑桩最大桩间距的计算方法. 上述对抗滑桩的加固效果研究多以单个滑带分析为基础. 在实际工程中,由于三峡库区复杂的工程地质条件的影响,多层滑带滑坡发育非常广泛(Xu *et al.*, 2022). 多层滑带滑坡被定义为滑坡内包含多个滑动带的滑坡,如黄土坡滑坡、藕塘滑坡和马家沟滑坡(Niu *et al.*, 2023). 目前,只有少数文献涉及多层滑带滑坡抗滑桩加固效果的研究. 刘涛等(2018)通过构建多层滑坡体模型,分析了桩后土拱的形成及演化,提出适用于多层滑带滑坡体的条分法,对抗滑桩的加固效果进行了研究. 曾江波等(2019)基于土拱的受力形式,建立了新的桩间土拱受力模型,提出了多层渣土边坡最大桩间距的计算方法. 上述研究主要通过理论分析来进行研究,由于岩土工程的复杂性,仅从理论上对桩的加固特性进行分析存在一定的局限性. 这种分析难以同时考虑桩的受力行为和边坡的稳定性,无法将桩—土系统作为一个整体来考虑. 同时,已有的多层滑带滑

坡抗滑桩加固效果的研究一般都局限于土拱效应和相关力学平衡分析,而缺乏对多层滑带滑坡抗滑桩的作用机理和桩土变形特性等方面的系统分析.

数值模拟方法已成为解决岩土问题的重要方法,因其能够考虑复杂的地质条件并同时考虑桩—土的相互作用. 许多学者采用数值模拟方法对土拱效应的研究,由于抗滑桩对滑体有阻挡作用,抗滑桩之间的土体会产生相对位移,从而形成应力拱. 土拱的作用机制与抗滑桩受力特征密切相关,它间接地反映了抗滑桩加固边坡的效果. 孙书伟等(2019)通过模型试验与数值模拟研究了抗滑桩土拱演化特征及力学机理,并将土拱的演化分为形成期、发展期与破坏期3个阶段. Tang *et al.* (2023)通过PFC3D数值模拟探讨了开挖过程中的边坡应力变化与力链演化,揭示开挖宽度对变形区域的影响及土拱效应的形成机制.

综上所述,目前在抗滑桩加固效果研究中,同时考虑滑坡特性和土拱效应的研究鲜少,导致抗滑桩设计不合理,进而引起成本增加和抗滑桩作用失效等问题. 基于此,本文采用FLAC3D有限差分软件,建立了多层滑带滑坡—抗滑桩体系相互作用的数值模型,通过物理模型试验的结果验证了数值模型的正确性,在此基础上,研究了浅层滑带运动为主和深层滑带运动为主下,不同桩长、嵌固深度等设计参数对土拱效应的影响,并评价了抗滑桩对边坡的加固效果. 研究成果对抗滑桩加固多层滑带滑坡工程设计具有重要的指导意义.

1 多层滑带滑坡—抗滑桩体系数值模型

1.1 物理模型试验概况

多层滑带滑坡—抗滑桩体系物理试验模型装置包括模型框架、多层滑带滑坡理想模型、抗滑桩模型和多级加载系统. 物理试验模型如图1所示. 具体的试验过程和分析可参见徐楚(2022)的研究,本文将其试验数据作为数值模拟的对比数据,以验证数值模拟方法的准确性.

1.2 数值模型的建立

为了弥补模型试验在抗滑桩设计参数改变上

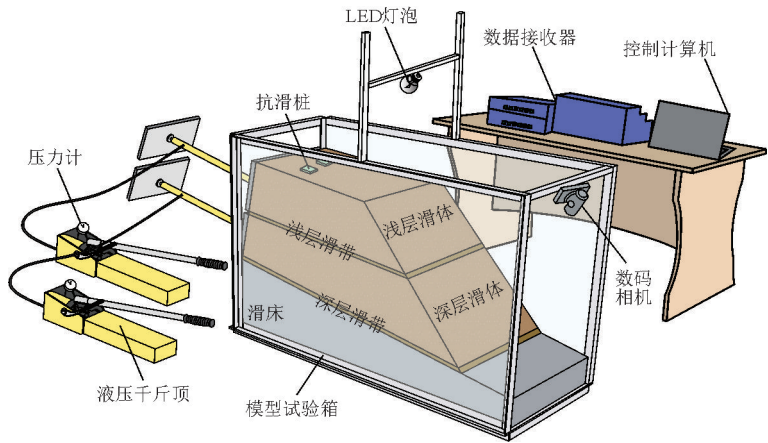


图 1 物理试验模型装置示意图

Fig. 1 Diagram of the physical model test apparatus

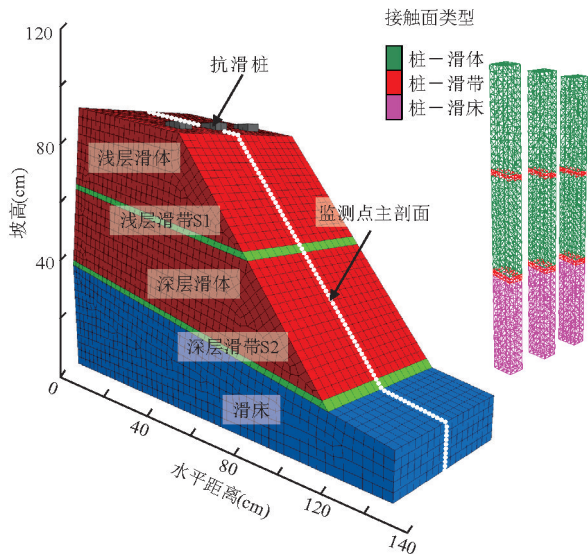


图 2 多层滑带滑坡—抗滑桩体系数值计算模型

Fig. 2 The numerical model for multi-sliding zone landslide-anti-slide pile system

的不足,采用数值模拟方法,对多层滑带抗滑桩在不同设计参数下的土拱和受力变形特性进行深入研究,进而分析多层滑带滑坡抗滑桩的加固效果。

采用有限差分程序FLAC3D建立了与模型试验尺寸和边界条件一致的数值计算模型,数值模拟模型如图 2 所示。模型长 150 cm,高 100 cm,宽 50 cm,抗滑桩桩长为 $L=90$ cm,截面尺寸为 $5.0\text{ cm}\times 7.5\text{ cm}$ ($D\times h$),桩间距 S 为 $3D$,嵌固深度为 $H=30$ cm。模型底部为固定边界,顶部为自由面,其他面限制法向位移。抗滑桩和基岩底部为固定端,抗滑桩桩顶无约束。

1.3 计算参数

在数值模拟中,滑坡岩土体采用莫尔—库仑本

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料特性	滑体	滑带	滑床	抗滑桩
密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 690	1 630	2 500	1 800
黏聚力 $c(\text{kPa})$	20.6	1.2	2 000	
内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	21.8	20.2	5	
体积模量 $K(\text{MPa})$	9.3	6.7	560	160
剪切模量 $G(\text{MPa})$	4.6	2.8	300	120

构模型,由于本研究物理模型试验所用抗滑桩由聚氨酯材料制成(一种在有限变形下工作的柔性材料)所以抗滑桩采用实体单元进行建立,并赋予弹性本构模型(Liu *et al.*, 2020)。计算参数与物理模型试验材料参数相同,模型岩土体及抗滑桩材料参数如表 1 所示。

在FLAC3D中,interface单元可模拟两种材料之间的黏接、滑移和分离。本研究模拟的滑体和滑带均为黏土,因此主要采用interface单元来描述黏土与抗滑桩结构之间的滑移。桩侧界面和桩端界面在交点处具有不同的节点id,以反映桩侧和桩端受力的差异。

在该模型中定义了3个接触面单元:(1)抗滑桩与各层滑体之间的接触面;(2)抗滑桩与各层滑带之间的接触面;(3)抗滑桩与滑床之间的接触面。接触面的参数如表 2 所示。其中,法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 由式(1)确定(Chen *et al.*, 2024)。研究表明,接触面的内摩擦角和黏聚力值对抗滑桩的弯曲性能影响不大(Jalalifar *et al.*, 2010)。本研究中,桩土之间接触面的黏聚力和内摩擦角选取为桩周岩土体抗剪强度的 0.8 倍,接触面的屈服条件遵循莫尔—库仑准则。

$$k_n = k_s = 10\max\left[\frac{(K + 4/3 G)}{\Delta z_{\min}}\right], \tag{1}$$

式中： $\Delta z_{\min}$ 是接触面单元法线方向的最小长度； K 和 G 分别是体积模量和剪切模量。

1.4 模拟方案

在外界环境因素的影响下,多层滑带滑坡呈现出不同的相对运动特征和运动模式.不同运动模式下多层滑带滑坡的位移场、应力场和抗滑桩受力变形特征等多场信息会呈现不同的变化规律.根据徐楚(2022)的研究,物理模型试验通过在滑坡模型后缘施加推力荷载,并逐渐增大推力载荷,模拟滑坡的运动过程.通过在各层滑体后缘施加不同比例的推力,可以实现不同运动模式的研究.具体的试验加载方案见表3.

数值试验以工况1和工况2的模型试验为参考,采用控制变量法,改变抗滑桩的桩间距和嵌固深度.在试验中,嵌固深度 H 分别取 $1/5L$ 、 $1/4L$ 、 $1/3L$ 、 $2/5L$ 和 $1/2L$;桩间距 S 选取 $2D$ (10 cm)、 $3D$ (15 cm)、 $4D$ (20 cm)、 $5D$ (25 cm)和 $6D$ (30 cm),这些参数值是抗滑桩设计中的常见选择.

在数值模拟试验中,通过改变滑坡模型后缘的应力边界条件,实现了多层滑带滑坡后缘的连续加载过程.为了简化计算,将后缘推力分为每50 N一级,并设置每级荷载作用下的计算时间步为10 000步.这样可以确保滑坡内部应力状态得到充分调整,并保证不平衡力在收敛时足够小.加载方案与物理模型试验一致,以工况1为例,如图3所示.

表 2 接触面单元力学参数

接触面特性	接触面类型		
	桩—滑体	桩—滑带	桩—滑床
法向刚度 k_n (GPa/m)	10	2	5 900
切向刚度 k_s (GPa/m)	10	2	5 900
内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	17.4	16.1	40
黏聚力 c (kPa)	16.5	0.9	1 600

表 3 物理模型试验加载方案

工况	推力大小(N/min)		运动模式
	浅层滑体	深层滑体	
1	10	10	浅层滑动为主
2	10	15	深层滑动为主

1.5 监测点布置

为验证数值模拟方法,选取多层滑带滑坡—抗滑桩体系数值模型中轴线处的主剖面作为研究对象.为了观察桩周水平土压力和坡体深部位移的变化,在抗滑桩桩前、桩后及桩间等间距布置了A、B、C三列共18个监测点.为监测抗滑桩的受力变形特性,在桩前和桩后位置布置了D、E两列共24个监测点.为监测滑坡表面变形和桩顶位移,在浅层滑体坡表、深层滑体坡表、桩顶和浅层滑体后缘布置了4个监测点.监测点的总体布置如图4所示.

2 数值模型的验证

以工况1模型试验为参考,将图3所示物理模型试验中的推力设计加载曲线,通过FLAC3D内置FISH语言编程进行转换,导入数值模型.通过对比数值试验与模型试验结果,验证数值试验的合理性.

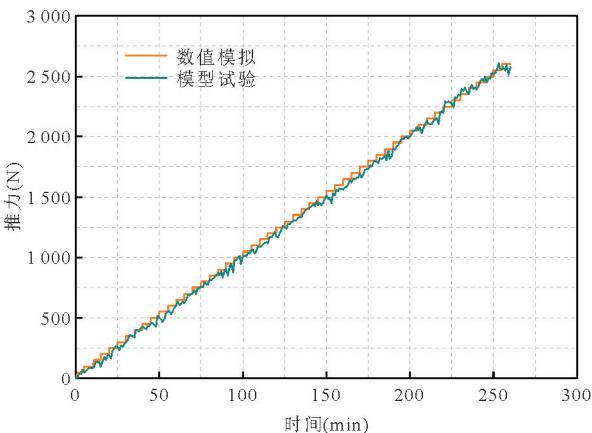


图 3 推力设计加载曲线

Fig.3 Thrust design loading curve

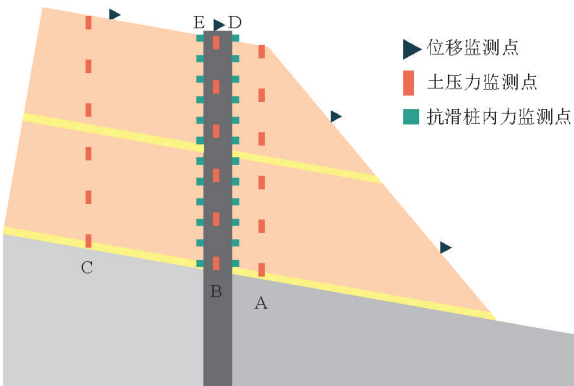


图 4 数值模拟监测点布置示意图

Fig.4 Numerical simulation monitoring point layout diagram

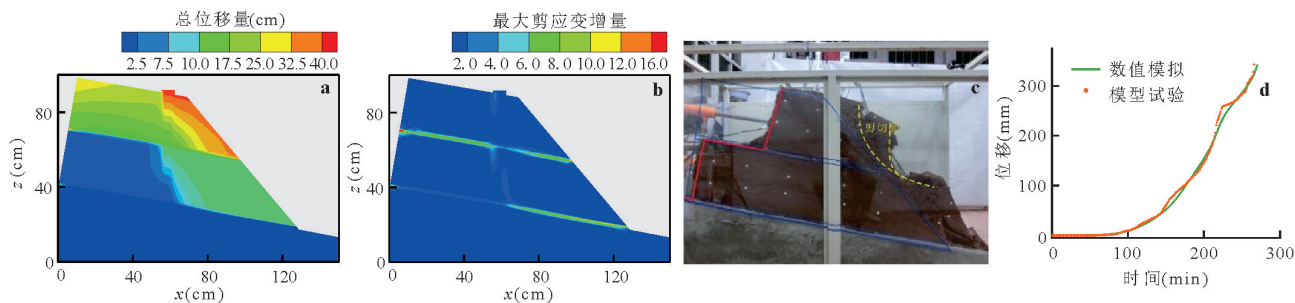


图 5 模型试验与数值模拟位移对比

Fig. 5 Comparison of model test and numerical simulation displacement

a. 滑坡位移云图; b. 滑坡剪应变增量云图; c. 物理模型试验宏观变形图(徐楚, 2022); d. 滑坡位移曲线

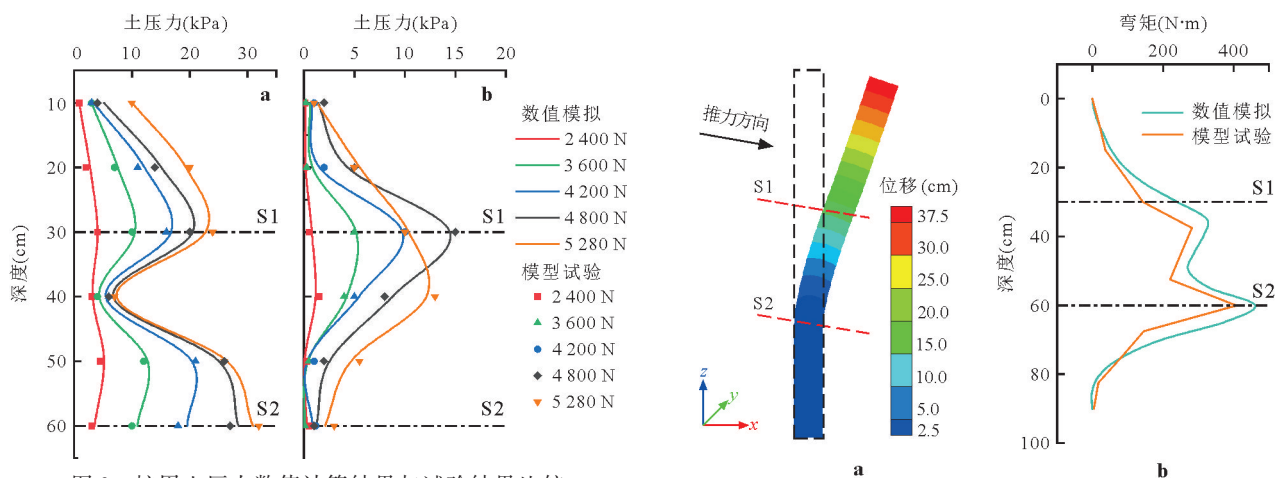


图 6 桩周土压力数值计算结果与试验结果比较

Fig. 6 Comparison of numerical calculation results and test results of soil pressure around the pile

a. 桩后; b. 桩前

2.1 位移场特征

图 5 为后缘推力为 5 320 N 时的模型试验与数值模拟位移对比. 图中可见, 数值模拟和物理模型试验监测曲线趋势基本一致(图 5d). 滑坡主要沿浅层滑带滑动, 最大位移出现在桩顶前缘位置(图 5a), 这一现象与模型试验结果一致(图 5c). 抗滑桩附近的剪应变增量较小, 而在桩前区域的浅层及深部滑带处, 存在明显的剪应变增量带(图 5b), 并出现了与模型试验一致的局部滑移现象.

2.2 应力场特征

图 6 为多层滑带滑坡抗滑桩体系桩周水平土压力的数值计算与模型试验结果对比. 在土压力的产生和分布方面, 数值模拟结果与试验结果基本一致. 土压力分布呈波浪形, 桩前的最大土压力出现在浅层滑带 S1 附近, 桩后最大土压力位于深层滑带 S2 处. 随着推力增加, 不同埋深的土压力差值逐渐增大.

图 7 抗滑桩弯矩与水平位移图

Fig. 7 Anti-slide pile bending moment and horizontal displacement diagram

a. 桩身水平位移; b. 弯矩

2.3 抗滑桩受力变形特征

如图 7 所示, 抗滑桩的变形表现出弹性桩特点, 并出现多级弯曲现象. 与模型试验相比, 数值模拟结果在抗滑桩桩身弯矩分布规律和大小上基本一致, 均在浅层滑带和深层滑带附近出现两个弯矩极值点, 桩身弯矩的最大相对误差小于 10%. 因此, 数值模拟基本能反映多层滑带滑坡抗滑桩在推力作用下的响应.

3 数值模拟结果与参数分析

基于验证后的多层滑带滑坡—抗滑桩体系数值模型, 比较了不同运动模式下后缘推力为 5 320 N 时的多层滑带滑坡抗滑桩桩周应力的差异, 探讨了桩间距和桩嵌固深度对土拱效应的影响.

3.1 土拱效应

3.1.1 浅层滑动为主的多层滑带滑坡

由图 8 可

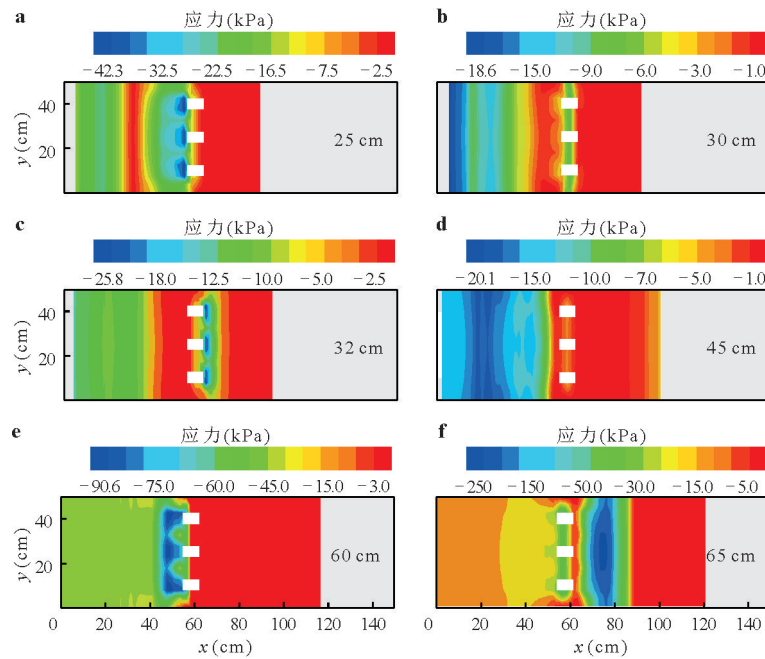


图8 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图

Fig. 8 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

知,浅层滑动为主时,桩周应力呈现沿深度方向的双向多级土拱分布,即“桩后土拱—桩前土拱—桩后土拱”现象.桩后土拱分布在深层滑体处,浅层滑体仅出现桩后应力集中,桩后土拱未完全形成,桩前土拱分布于浅层滑带与深层滑体交界处(Liu *et al.*, 2024).

在桩深 25 cm 处,由于浅层滑体位移大于深层滑体,此处桩周土体变形强烈,桩周土体会“自我调整”,以提供对桩的支撑,桩后形成相对密实区,进而形成以此密实区为拱脚的“端承土拱”(Fang *et al.*, 2024).

在桩深 30 cm 处,土压力和抗滑桩弯矩达到极值,抗滑桩挤压桩前土体,导致应力集中现象向桩前发展,但土拱尚未形成,此处桩间摩擦土拱处于支配地位.由桩深 32 cm 处的水平应力云图可知,该深度位于浅层滑带 S1 下方,相对于浅层滑带 S1,深层滑体可视为“相对弱嵌固段”,在一定程度上提供了“嵌固段桩前抗力”.当“嵌固段桩前抗力”超过桩后推力时,抗滑桩桩前会出现压应力集中,形成桩前被动土拱.

在桩深 45 cm 处,深层滑体相对于浅层滑体可视为“相对弱嵌固段”,此处桩后土体位移较小,桩间土体受挤压作用,导致土体应力向周围发展,出现桩间应力大于桩后桩前应力的现象,此处桩间摩擦土拱处于支配地位.到桩深 60 cm 处,深层滑带

S2 发生滑动,桩后土体相对位移较滑床大,此时推力主要通过桩后土拱承担,导致深层滑带 S2 上方出现桩后土拱效应,土拱具有端承拱的结构特征.到桩深 65 cm 处,该处为滑床嵌固段,桩前抗力大于桩后应力,符合抗滑桩嵌固段受力特征.

3.1.2 深层滑动为主的多层滑带滑坡 由图 9 可知,深层滑动为主时,桩周应力呈现沿深度方向的双向多级土拱分布.与浅层滑动为主的多层滑带滑坡相比,桩后土拱更为明显,桩前出现应力集中现象,但土拱尚未完全形成.浅层滑带以上的桩周应力云图分布与图 8 基本相似,因此,重点分析了桩身 30 cm 以下的桩周应力云图.

在桩深 30 cm 处,由于深层滑体相对于浅层滑带的移动,桩后土体位移较小,抗滑桩与桩周土体的相对位移较大,桩间土体与抗滑桩接触较强,土体将大部分推力传递到抗滑桩侧边,此时桩侧摩阻力发挥主要抗滑作用,桩间摩擦土拱处于支配地位.

在桩深 32 cm 处,位于浅层滑带下方,抗滑桩的弯曲作用挤压桩前土体,导致桩前出现较大的抗力.在桩深 40 cm 和 50 cm 处,抗滑桩作为主要受荷段,深层滑体相对位移较浅层滑带大,这些位移导致桩后土体的挤压和压实,进而在桩后形成明显的土拱效应,土拱具有端承拱的结构特征.

在桩深 60 cm 处,该区域靠近深层滑带,土体与抗滑桩的相对位移增大,桩间土体扩展,桩间及桩

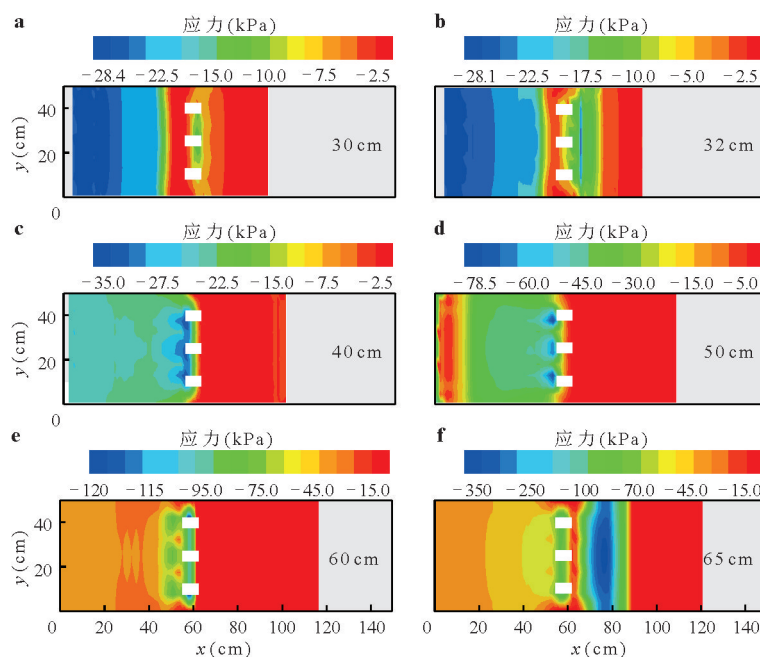


图9 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图

Fig. 9 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

后出现应力集中,形成一个“三角形带”,并在此范围内形成完整的土拱,土拱具有端承拱和摩擦土拱的结构特征。

3.2 抗滑桩设计参数敏感性分析

3.2.1 桩间距对土拱效应的影响 (1)浅层滑动为主的多层滑带滑坡

图10为桩间距为4倍(嵌固深度 $1/3L$)时,不同深度下水平方向的桩周应力云图。由桩深25 cm处的水平应力云图可见,随着桩间距增大,桩后仅形成“树干”状拱脚,未形成“树冠”状端承土拱拱轴,说明此时抗滑桩呈现较弱的端承土拱结构特征,桩间摩擦土拱现象明显。

在桩深30 cm和32 cm处,浅层滑带附近桩间摩擦土拱现象较为明显。由于桩间距增大,桩后土体的约束作用减弱,土体所受的力有较大一部分未传递到桩上,仅靠近桩的部分土体与桩之间存在力的传递。

在桩深45 cm处,桩间距增大导致端承土拱特征减弱,桩间摩擦土拱现象明显,表明土拱承载能力有所衰减。到桩深60 cm处,桩间和桩后压力集中,桩间摩擦土拱现象明显,桩体承受的荷载主要由单桩承担,相邻桩之间的相互影响较小(Bao *et al.*, 2024)。

(2)深层滑动为主的多层滑带滑坡

图11为桩间距为4倍(嵌固深度 $1/3L$)时,不同

深度下水平方向的桩周应力云图。在桩深30 cm和32 cm处,桩间距增大导致桩间摩擦土拱减弱,从而降低了承载能力。在桩深40 cm和50 cm处,桩间距增大使端承土拱特征减弱,表明土拱承载能力衰减。到桩深60 cm处,端承土拱和桩间摩擦土拱的强度均有所降低,桩体承受的荷载主要由单桩承担,相邻桩之间的相互影响较小。

通过对比不同桩间距下两种运动模式的桩周水平应力云图,发现抗滑桩的桩周土拱沿深度分布规律相似,但土拱类型存在差异。具体而言,当桩间距为3倍时,桩周土拱主要表现为端承土拱和桩间摩擦土拱;而当桩间距增大至4倍时,桩周土拱主要表现为桩间摩擦土拱。这表明,桩间距越小,抗滑桩在不同深度方向上的端承土拱现象越明显;桩间距越大,桩间摩擦土拱的抗滑作用越强,抗滑桩的承载能力减弱。

3.2.2 嵌固深度对土拱效应的影响 (1)浅层滑动为主的多层滑带滑坡

图12为嵌固深度 H 为 $1/4L$ (桩间距15 cm)时,不同深度下水平方向的桩周应力云图。与图10和图11对比可知,在不同嵌固深度下,桩周土拱的分布规律和土拱类型相似。在深层滑带S2上方,出现明显的桩后端承土拱现象。然而,在桩深60 cm处,桩后“树冠”状端承土拱现象不明显,说明桩后端承土拱的位置发生了变化,且其结构特征较嵌固深度为

30 cm 时弱,此时桩间摩擦土拱处于支配地位.

(2) 深层滑动为主的多层滑带滑坡

图 13 为嵌固深度 H 为 $1/4L$ (桩间距 15 cm) 时,不同深度下水平方向的桩周应力云图. 与图 11 和图 12 对比可知,在不同嵌固深度下,桩周土拱的分布

规律和类型相似. 在桩深 40 cm 处,随着嵌固深度减小,桩后端承土拱效应明显减弱,土拱强度略有增大;在桩深 60 cm 处,桩后土体勉强形成端承土拱,但桩间摩擦土拱的形态和强度未发生明显变化.

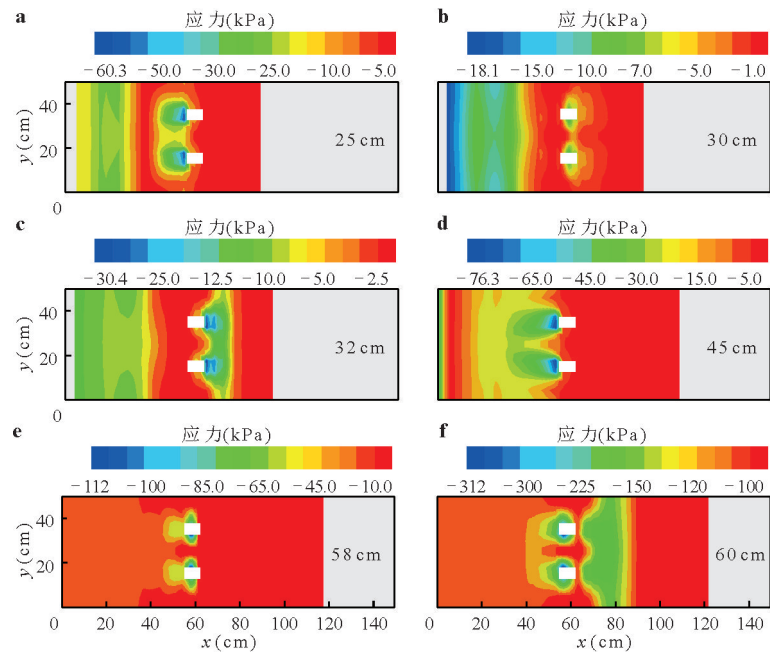


图 10 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图
Fig. 10 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

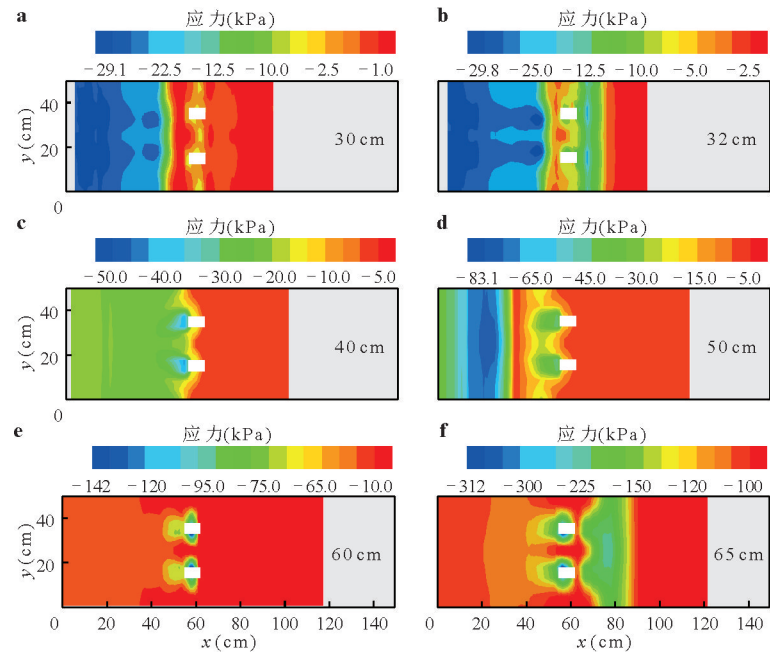


图 11 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图
Fig. 11 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

对比不同嵌固深度下两种运动模式的桩周水平应力云图发现,嵌固深度的变化不会导致多层滑带抗滑桩不同深度处的土拱类型发生变化,只会影响土拱的强度,这与桩体与土体之间的相互作用力

密切相关(Fang, 2020),改变嵌固深度,抗滑桩支撑拱脚的位置并没有发生改变.同时,深层滑带S2处的桩后端承土拱位置随着抗滑桩嵌固深度的增加逐渐下移.

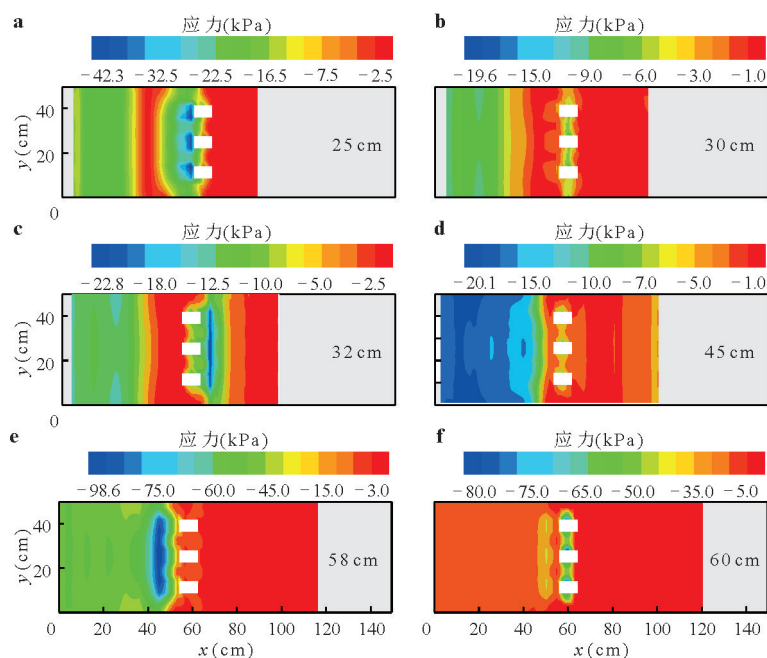


图 12 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图

Fig. 12 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

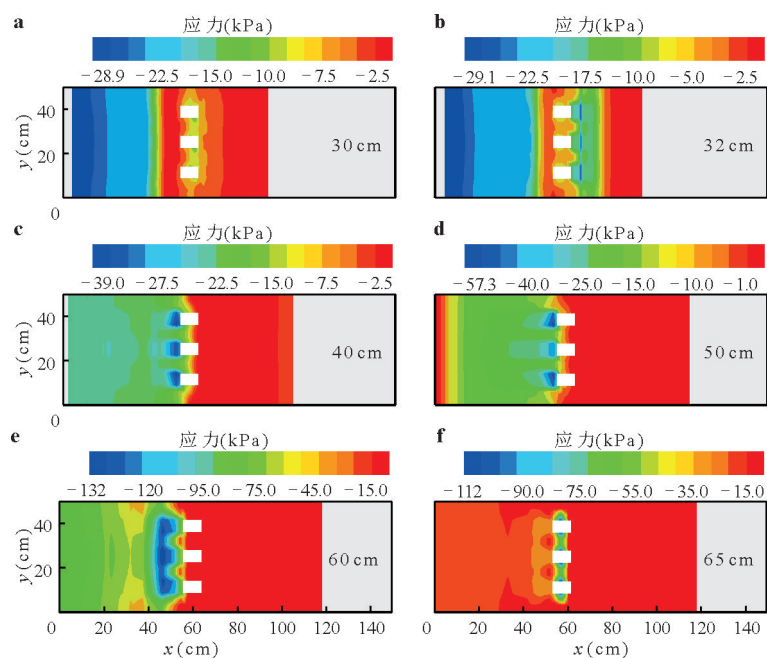


图 13 抗滑桩不同深度桩周水平应力云图

Fig. 13 Horizontal stress clouds around the pile at different depths of the anti-slide pile

4 抗滑桩加固效果评价

4.1 桩间距对抗滑桩加固效果的影响

4.1.1 浅层滑动为主的多层滑带滑坡 如图 14 所示,浅层滑动为主时,不同桩间距下,抗滑桩桩身剪力分布规律趋于一致:(1)剪力基本呈“波浪型”分布,浅层滑带 S1 附近出现剪力最大值,深层滑带 S2 附近出现零剪力拐点。(2)抗滑桩的剪力值分别在两层滑带的上方和下方呈现逆分布模式,反映了多层滑带抗滑桩多弯矩极值的受力变形特征。(3)此外,嵌入基岩中的部分结构可以有效抵抗滑坡推力,这反映了基岩内部的最大负剪力(Wang *et al.*, 2023)。随着桩间距的增加,剪力极值和最大值逐渐减小,直到桩间距 $S \leq 3D$,剪力分布趋于稳定。

桩顶位移(弯矩最大值)的增幅为当前桩间距

与前一级桩间距桩顶位移(弯矩最大值)的增长率。从图中可以看出,在相同嵌固深度条件下,随着桩间距增大,抗滑桩的桩顶位移和桩身弯矩逐渐增大。当桩间距由 20 cm 增大至 25 cm 时,桩顶位移和桩身弯矩最大值分别增幅为 5% 和 9%;而当桩间距由 15 cm 增大至 20 cm 时,桩顶位移和桩身弯矩最大值的增幅分别为 27% 和 21%。这表明,桩间距从 4 倍缩小至 3 倍时,对抗滑桩加固效果的影响最为显著,说明 3 倍桩间距可视为最优桩间距(Wang *et al.*, 2024)。

4.1.2 深层滑动为主的多层滑带滑坡 深层滑动为主时,在相同嵌固深度下,随着桩间距增大,抗滑桩的桩顶位移、弯矩最大值和桩身剪力逐渐增大。深层滑带 S2 附近出现零剪力拐点,而浅层滑带 S1 附近的剪力相较浅层滑动为主的多层滑带滑坡显

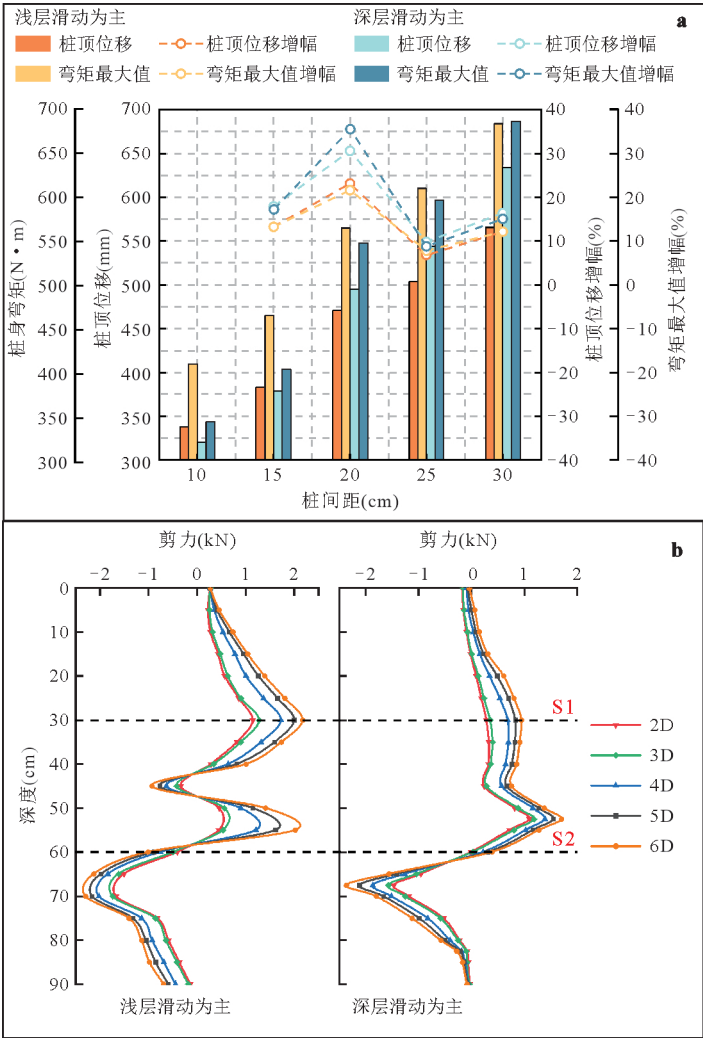


图 14 不同桩间距抗滑桩受力特性

Fig. 14 Mechanical behavior of anti-slide piles with different spaces

a. 桩顶位移和弯矩最大值变化; b. 桩身剪力分布曲线

著减小. 当桩间距由 20 cm 增大至 25 cm 时, 桩顶位移和桩身弯矩最大值分别增幅为 10% 和 9%; 当桩间距由 15 cm 增大至 20 cm 时, 桩顶位移和桩身弯矩最大值的增幅分别为 27% 和 37.5%. 这表明, 桩间距由 4 倍缩小至 3 倍时, 对抗滑桩加固效果的影响最为显著.

综上所述, 当桩间距从 6 倍减小至 2 倍时, 在浅层滑动主导的情况下, 桩顶位移和桩身最大弯矩分别减少约 40%; 在深层滑动主导的情况下, 桩顶位移和桩身最大弯矩分别减少约 49%. 当桩间距由 4 倍减小至 3 倍时, 两种滑动模式下桩顶位移和桩身最大弯矩的减幅最大. 这表明, 桩间距从 4 倍缩小至

3 倍时, 对抗滑桩治理多层滑带滑坡的加固效果最为显著, 3 倍桩间距为最优桩间距, 尤其在深层滑动情况下更加明显.

4.2 嵌固深度对抗滑桩加固效果的影响

4.2.1 浅层滑动为主的多层滑带滑坡 图 15 显示了不同嵌固深度下抗滑桩的受力特性. 桩顶位移(弯矩最大值)的增幅为当前嵌固深度与前一级嵌固深度下桩顶位移(弯矩最大值)的增长率. 当滑坡以浅层滑动为主时, 在相同桩间距条件下, 若嵌固深度 $H \leq 1/4L$, 桩顶位移和桩身弯矩的最大值变化明显, 并随着嵌固深度增加而减小; 当嵌固深度 $H \geq 1/3L$ 时, 嵌固深度从 $2/5L$ 减小至 $1/3L$ 时, 抗滑桩

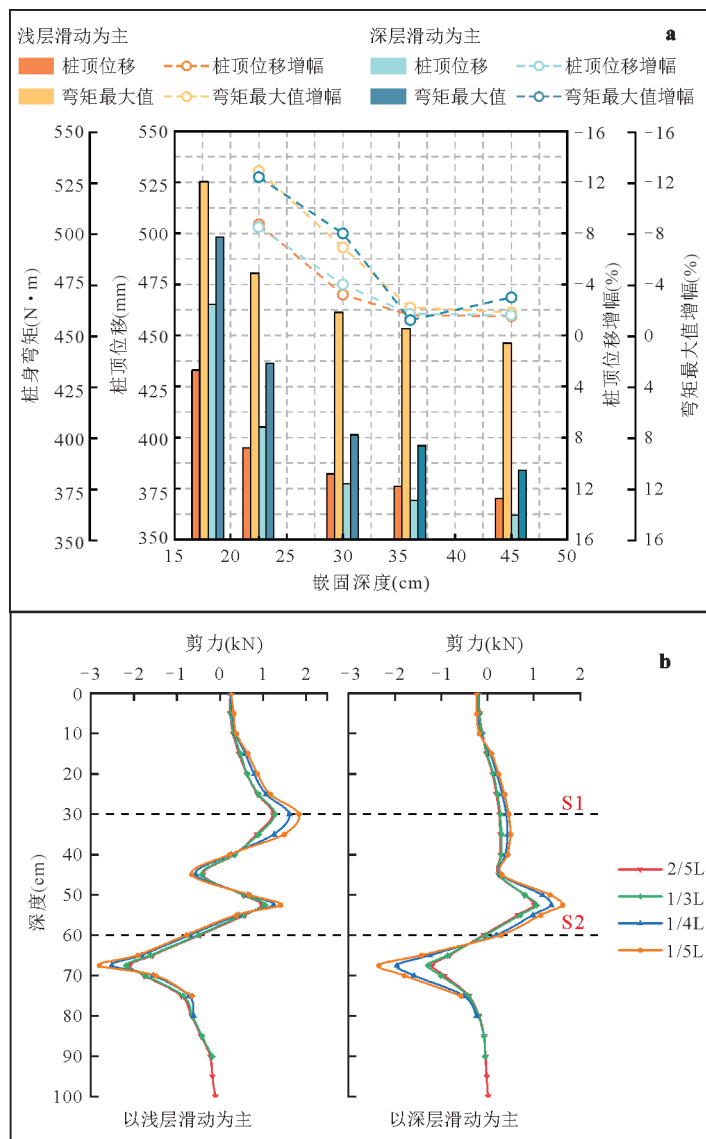


图 15 不同嵌固深度抗滑桩受力特性

Fig. 15 Mechanical behavior of anti-slide piles with embedment depth
a. 桩顶位移和弯矩最大值变化; b. 桩身剪力分布曲线

弯矩的极值和最大值增幅接近 0. 说明嵌固深度增加到一定程度后, 桩顶位移、桩身弯矩和剪力趋于稳定, 表明抗滑桩的嵌固深度存在一个临界值(Li *et al.*, 2023).

抗滑桩桩顶位移和桩身最大弯矩随嵌固深度的变化呈指数函数分布. 当嵌固深度超过 25 cm 时, 抗滑桩的剪力分布趋于稳定(图 15b). 因此, 可以将 25 cm 视为临界嵌固深度, 此时嵌固深度不再是影响桩身受力变形的主要因素, 继续增加嵌固深度对抗滑桩加固效果的提升作用有限.

4.2.2 深层滑动为主的多层滑带滑坡 滑坡深层滑动主导时, 当抗滑桩的嵌固深度超过 30 cm, 桩顶位移、弯矩最大值和桩身剪力趋于稳定. 当嵌固深度从 30 cm 增加至 35 cm 时, 桩顶位移减小约 2.7%, 桩身弯矩减小约 1.3%, 但抗滑桩的加固效果未明显提高. 这表明, 在该运动模式下, 抗滑桩的临界嵌固深度为 30 cm, 该深度也可视为最优布桩长度. 此结果与《抗滑桩设计与计算》规范对于土层或软质岩层抗滑桩的锚固深度建议(为桩长的 1/3 至 1/4 倍)一致(马显春等, 2018).

综上, 当嵌固深度由 1/5L 增大至 2/5L 时, 浅层滑动为主时, 桩顶位移和桩身最大弯矩减小的幅度约 13%, 临界嵌固深度为 25 cm; 深层滑动为主时, 桩顶位移和桩身最大弯矩会较小约 23%, 临界嵌固深度为 30 cm, 这表明, 改变嵌固深度对抗滑桩治理深层滑动主导的多层滑带滑坡的加固效果影响更大, 且存在一个临界嵌固深度. 若嵌固深度超过该临界值, 再增加嵌固深度对抗滑桩的加固效果影响较小, 反而会增加施工难度和工程成本.

5 结论

本研究基于数值模拟, 针对不同运动模式下多层滑带抗滑桩的加固效果进行了系列研究. 通过比较桩周应力、抗滑桩内力和桩顶位移的差异, 探讨了桩间距和桩嵌固深度对不同运动模式下加固效果的影响. 主要结论如下:

(1) 在多层滑带滑坡运动过程中, 桩周应力呈现沿深度方向的双向多级土拱分布, 表现为“桩后土拱—桩前土拱—桩后土拱”现象. 不同运动模式下的双向多级土拱分布存在差异.

(2) 从土拱变化规律与抗滑桩受力变形规律可知, 不同的运动模式下, 抗滑桩设计参数的改变对抗滑桩加固效果的影响规律相似. 当桩间距减小时, 端

承土拱和桩间摩擦土拱起主要的抗滑作用, 桩顶位移与桩身弯矩减小; 当桩间距增大时, 桩间摩擦土拱起承载滑坡推力的主要作用, 迎荷面端承土拱分担的滑坡推力相对减小, 导致抗滑桩的加固效果变差.

(3) 嵌固深度的变化不会改变抗滑桩不同深度处的土拱类型, 但会影响土拱的强度, 这与桩体与土体之间的相互作用力密切相关. 改变嵌固深度, 抗滑桩支撑拱脚的位置并没有发生改变. 具体表现为: 嵌固深度减小时, 土拱强度降低, 且深层滑带处的端承土拱位置逐渐上移.

(4) 在设计多层滑带滑坡的抗滑桩时, 为实现投资与安全的双赢效果, 需了解滑坡的相对运动模式, 并根据不同模式提出合理的抗滑桩设计方案. 对于浅层滑动主导的滑坡, 可以通过减小桩间距提高加固效果; 而对于深层滑动主导的滑坡, 则应增大嵌固深度以提高加固效果.

Reference

- Ashour, M., Ardalan, H., 2011. Analysis of Pile Stabilized Slopes Based on Soil-Pile Interaction. *Computers and Geotechnics*, 39: 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.09.001>
- Bao, N., Chen, J.F., Wang, G.H., et al., 2024. Analytical Prediction of Displacement-Dependent Lateral Earth Pressure against Stabilizing Piles in Sandy Slopes Considering Arching Effect. *Computers and Geotechnics*, 176: 106776. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106776>
- Chen, C., Wang, W., Lu, H.Y., 2019. Stability Analysis of Slope Reinforced with Composite Anti-Slide Pile Model. *Rock and Soil Mechanics*, 40(8): 3207–3217 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Zeng, W. Q., Wang, X. B., et al., 2024. A Three-Dimensional DEM Method for Trajectory Simulations of Rockfall under Irregular-Shaped Slope Surface and Rock Blocks. *Journal of Earth Science*, 35(1): 306–312. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1959-3>
- Ding, H., Xue, L., Shang, J. S., et al., 2024. Study on Synergistic Action of Tap-Like Arbor Root System and Anti-Slide Piles by Physical Model Experiment of Landslides. *Landslides*, 21(7): 1707–1717. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02248-2>
- Fang, K., Jia, S. X., Tang, H. M., et al., 2024. Arching Effect in Slopes under Excavation: Classification and Features. *Engineering Geology*, 337: 107563. <https://doi.org/>

- 10.1016/j.enggeo.2024.107563
- Huang, R.Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanism in China since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433—454 (in Chinese with English abstract).
- Jalalifar, H., Aziz, N., 2010. Analytical Behaviour of Bolt-Joint Intersection under Lateral Loading Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(1): 89—94. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0032-6>
- Jia, Z.B., Tao, L.J., Bian, J., et al., 2022. Displacement Analysis of Slope Reinforced by Pile-Anchor Composite Structure under Seismic Loads. *Earth Science*, 47(12): 4513—4522(in Chinese with English abstract).
- Li, C. D., Wu, J. J., Tang, H. M., et al., 2015. A Novel Optimal Plane Arrangement of Stabilizing Piles Based on Soil Arching Effect and Stability Limit for 3D Colluvial Landslides. *Engineering Geology*, 195: 236—247. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.018>
- Li, S. J., Gao, H., Xu, D. M., et al., 2012. Comprehensive Determination of Reinforcement Parameters for High Cut Slope Based on Intelligent Optimization and Numerical Analysis. *Journal of Earth Science*, 23(2): 233—242. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0250-9>
- Li, T., Chen, G., 2023. Analysis of Factors Influencing Anti-Slip Pile Support in Tunnel Landslide Systems for Tunnels with Different Burial Depths. *Transportation Geotechnics*, 42: 101079. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101079>
- Liu, D. Z., Hu, X. L., Zhou, C., et al., 2020. Deformation Mechanisms and Evolution of a Pile-Reinforced Landslide under Long-Term Reservoir Operation. *Engineering Geology*, 275: 105747. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105747>
- Liu, D. Z., Gong, X. C., Wang, H. P., et al., 2024. Displacement Field Reconstruction in Landslide Physical Modeling by Using a Terrain Laser Scanner - Part 2: Application and Large Strain/Displacement and Water Effect Analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(10): 4077—4087. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.040>
- Liu, T., Zhang, H.K., Zhang, Y., et al., 2018. Minimum Pile Spacing between Stabilizing Piles in 3D Composite Multilayer Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(2): 473—484 (in Chinese with English abstract)
- Ma, X.C., Luo, G., Deng, J.H., et al., 2018. Study of Anchorage Depth of Anti-Sliding Piles for Steep-Sliding Accumulation Landslides. *Rock and Soil Mechanics*, 39 (S2):157—168 (in Chinese with English abstract)
- Niu, L. F., Hu, X. L., Xu, C., et al., 2023. Physical Model Test of the Deformation Mechanism of the Multi-Sliding Zones Landslide Subjected to the Operated Reservoir. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82 (6): 213. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03233-0>
- Sun, S.W., Ma, N., Hu, J.B., et al., 2019. Evolution Characteristics and Mechanism Analysis of Soil Arch of Anti-Slide Pile. *Journal of Railway Engineering Society*, 36 (11): 7—12(in Chinese with English abstract)
- Tang, C.Y., Tang, H.M., Fang, K., et al., 2023. Formation of the Soil Arch and Load Transfer Mechanism of a Slope due to Excavation by 3D Particle Flow Code Simulation. *Journal of Earth Science*. Online. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1810-x>
- Fang, K., Tang, H. M., Su, X. X., et al., 2020. Geometry and Maximum Width of a Stable Slope Considering the Arching Effect. *Journal of Earth Science*, 31(6): 1087—1096. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1052-0>
- Wang, C. T., Wang, H., Qin, W. M., et al., 2023. Behaviour of Pile-Anchor Reinforced Landslides under Varying Water Level, Rainfall, and Thrust Load: Insight from Physical Modelling. *Engineering Geology*, 325: 107293. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107293>
- Wang, L., Sun, D. A., Yao, Y. P., et al., 2020. Kinematic Limit Analysis of Three-Dimensional Unsaturated Soil Slopes Reinforced with a Row of Piles. *Computers and Geotechnics*, 120: 103428. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103428>
- Wang, X., Hu, X. L., Xu, C., et al., 2024. Probabilistic Stability Analyses of the Landslide-Stabilizing Piles System Considering the Spatial Variability of Geotechnical Parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(9): 345. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03842-3>
- Xu, C., 2022. Evolution Mode and Mechanical Characteristics of Multi-Sliding Zones Landslide-Stabilizing Pile System (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract)
- Xu, C., Hu, X. L., Niu, L. F., et al., 2022. Physical Model Test of the Deformation Behavior and Evolutionary Process of the Multi-Sliding Zone Landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(10): 401. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02913-7>
- Xu, C., Xue, L., Cui, Y., et al., 2024. Numerical Analysis of Surcharge Effect on Stability and Interaction Mechanism of Slope-Pile-Footing System. *Journal of Earth Science*, 35 (3): 955—969. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1866-7>
- Zeng, J., Zhang, H.K., Yao, W.M., et al., 2019. Maximum

Spacing of Stabilizing Piles in Multilayer Landfill Slope in Consideration of Groundwater Action. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 36(9): 104–109.

Zhang, G., Wang, L. P., Wang, Y. L., 2017. Pile Reinforcement Mechanism of Soil Slopes. *Acta Geotechnica*, 12(5): 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0543-3>

Zhang, L., Chen, J.H., Zhao, M.H., 2019. Maximum Cantilever Anti-Slide Piles Spacing Determination with Consideration of Soil Arching Effect. *Rock and Soil Mechanics*, 40(11): 4497–4505 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈冲, 王卫, 吕华永, 2019. 基于复合抗滑桩模型加固边坡稳定性分析. *岩土力学*, 40(8): 3207–3217.

黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. *岩*

石力学与工程学报, 26(3): 433–454.

贾志波, 陶连金, 边金, 等, 2022. 地震荷载下桩—锚组合结构加固边坡的位移解析. *地球科学*, 47(12): 4513–4522.

刘涛, 张海宽, 张友, 等, 2018. 三维复合多层滑坡体中抗滑桩最小桩间距研究. *岩石力学与工程学报*, 37(2): 473–484.

马显春, 罗刚, 邓建辉, 等, 2018. 陡倾滑面堆积层滑坡抗滑桩锚固深度研究. *岩土力学*, 39(S2): 157–168.

孙书伟, 马宁, 胡家冰, 等, 2019. 抗滑桩土拱演化特征及机理分析. *铁道工程学报*, 36(11): 7–12.

徐楚, 2022. 多层滑带滑坡—抗滑桩体系演化模式与抗滑桩受力特征研究(博士毕业论文). 武汉: 中国地质大学.

曾江波, 张海宽, 姚文敏, 等, 2019. 考虑地下水影响的多层渣土边坡抗滑桩最大桩间距研究. *长江科学院院报*, 36(9): 104–109.

张玲, 陈金海, 赵明华, 2019. 考虑土拱效应的悬臂式抗滑桩最大桩间距确定. *岩土力学*, 40(11): 4497–4505