doi: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(武汉)工程学院,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 中图分类号: P642.22 收稿日期: 2025-01-02

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, Hubei 430074, People's Republic of 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 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.

Keywords: multi-sliding zones landslide; anti-slide pile design parameters; soil arching effect; numerical simulation; reinforcement effect

基金项目:重点国际(地区)合作与交流项目(No.42020104006)。

第一作者简介: 李亚博, 男, 1999 年生, 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,女,1968年生,教授,博士生导师,主要从事岩土体稳定性和地质灾害预测评价的研究工作。ORCID:0000-0003-3440-0064. E-mail: huxinli@cug.edu.cn

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(2021)。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 (2020),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,由于抗滑桩对滑体由阻挡作用, 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(2013)。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、发展期与破坏期三个阶段。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。

综上可知,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。



图 1 物理试验模型装置示意图 Fig. 1 Diagram of the physical model test apparatus

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 cm×7.5 cm(D ×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。



图 2 多层宿帘宿圾-机宿性体系数值订募模型 Fig. 2 The numerical model for multi-sliding zone landslide-anti-slide pile system

1.3 计算参数

在数值模拟中,滑坡岩土体采用莫尔-库仑本构 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。

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ρ(kg/m³)	1690	1630	2500	1800
黏聚力 c (kPa)	20.6	1.2	2000	
内摩擦角 φ (°)	21.8	20.2	5	
本积模量 K (MPa)	9.3	6.7	560	160
剪切模量 G (MPa)	4.6	2.8	300	120

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。

在该模型中定义了三个接触面单元:(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。

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

式中, Δzmin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。

表 2	接触面单元力学参数
Table 2 In	terface mechanical parameter

拉袖石柱树	接触面类型			
按 熈囬 村	桩-滑体	桩-滑带	桩-滑床	
法向刚度 kn (GPa/m)	10	2	5900	
切向刚度 ks (GPa/m)	10	2	5900	
内摩擦角 φ (°)	17.4	16.1	40	
黏聚力 c (kPa)	16.5	0.9	1600	

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。

表 3 物理模型试验加载方案 Table 3 Physical model test loading program

工况 —	推力	推力大小		
	浅层滑体	深层滑体	运动候式	
1	10 N/min	10 N/min	浅层滑动为主	
2	10 N/min	15 N/min	深层滑动为主	

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1/5 L、1/4 L、1/3 L、 2/5 L和1/2 L;桩间距S选取2D(10cm)、3D(15cm)、 4D(20cm)、5D(25cm)和6D(30cm),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50N一级, 并设置每级荷载作用下的计算时间步为10000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。



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。监测点的总体布设如图4所示。



图 4 数值模拟监测点布置示意图 Fig.4 Numerical simulation monitoring point layout diagram

2 数值模型的验证

以工況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。

2.1 位移场特征

图5为后缘推力为5320N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。



图 5 模型试验与数值模拟位移对比:(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

Fig. 5 Comparison of model test and numerical simulation displacement: (a) Landslide displacement contour map (b)Landslide shear strain increment contour map (c)Physical model test macroscopic deformation diagram (Xu, 2022) (d)Landslide displacement curve

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。 土压力分布呈波浪型,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 6 桩周土压力数值计算结果与试验结果比较:(a)桩后 (b)桩前

Fig. 6 Comparison of numerical calculation results and test results of soil pressure around the pile: (a) Behind the pile (b) Before the pile

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。



矩

Fig. 7 Anti-slide pile bending moment and horizontal displacement diagram: (a) Horizontal displacement (b) bending moment

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5320N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 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。



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

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)。



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

(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。



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 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。



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

(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。

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 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

(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,反应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≤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)。

(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

(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≤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≥1/3L 时,嵌固深度从 2/5L 减小至 1/3L 时,抗滑桩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。



embedment depth

(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 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/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106 776
- 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 threedimensional dem method for trajectory simulations of rockfall under irregular-shaped slope surface and rock blocks. *Journal of Earth Science*, 35, 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 Sopes under Excavation: Classification and Features. *Engineering Geology*, 337: 107563. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.10756 3
- 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)

- Jiao, C.L., Zhaon X., Niu, F.J., 2020. Pipe-Soil Contact State and Jacking Force Prediction of Rectangular Pipe Jacking. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 41(10): 1459 (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/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.01 8
- 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/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/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.20 20.105747.

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/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, W.J., Wang, X., Wang, B.L., et al., 2021. Transformation of Load-Settlement Curve Based on Load Transfer at Pile-Soil Interface. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 43(Sup. 1): 41-46 (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)

- Nian, Y.K., Xu, H.Y., Li, D.C., 2013. Numerical Analysis of Slope Reinforcement with Different Cross-Section Anti-Slide Piles. *Journal of Dalian University of Technology*, 53(5): 695-701 (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. China University Of Geosciences, Wuhan (in Chinese)
- 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, 2019, 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.
- 焦程龙,赵歆,牛富俊,2020. 矩形顶管管-土接触面状态及 顶推力预估. 东北大学学报(自然科学版),41(10):1459-1464.
- 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.
- 马文杰, 王旭, 王炳龙, 等, 2021. 基于桩土界面荷载传递的 荷载-沉降曲线转化研究. 岩土工程学报, 43(增刊1): 41-46.
- 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.
- 年廷凯,徐海洋,李东晨,2013. 不同截面型式抗滑桩加固边 坡数值分析. 大连理工大学学报,53(5):695-701.
- 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. 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