

# 被动倾斜桩应用研究与展望

周德泉<sup>1</sup>,王创业<sup>1</sup>,周毅<sup>1,2</sup>,赵亚党<sup>3</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.湖南建设投资集团有限责任公司,湖南 长沙 410004;  
3.保利长大工程有限公司,广东 广州 510000)

**摘要:**特定倾斜方向的倾斜桩比竖直桩具有更好的水平承载性能,但其工作机制尚不十分清楚,相应设计标准没有形成,制约了倾斜桩水平承载能力和稳定性能的应用和发挥。该文从模型试验、数值模拟和理论分析方面,综合分析侧向卸载、侧向加载条件下被动倾斜桩及其组合体的桩土相互作用规律、水平移动与承载机制,并提出研究前景,以期推动被动倾斜桩及其组合体的深入研究和工程应用,有望根治土体滑移。

**关键词:**倾斜桩;被动桩;侧向卸载;侧向加载

**中图分类号:**U443.15 **文献标志码:**A

## 0 引言

荷载直接作用于桩体、再传给地基,该桩体称为主动桩,例如,桥墩底面的荷载直接作用于承台和基桩、再传递给桩周岩土层和桩底持力层;地下室浮力通过地板直接作用于桩体、再传递给桩周岩土层。荷载直接作用于岩土体、再传给桩体,该桩体称为被动桩,例如,基坑开挖时,坑壁土体挤压桩体导致桩侧向卸载,填料堆放于坡体时,挤压坡脚桩体导致桩侧向加载。

近年来,随着“一带一路”持续推进,基础设施建设不断增强,主动桩被大量采用的同时,岩土体的移动导致主动桩演变成“主动-被动”复合桩的情况很常见,被动桩的应用也越来越多。主动桩的研究成果丰富,被动桩的工作机制较复杂。基于主动桩和被动桩的海量研究成果,学术界和工程界发现特定倾斜方向的倾斜桩比竖直桩具有更好的水平承载潜能,例如,桩顶拉力方向与桩倾斜方向相反时,倾斜桩顶部水平位移随倾斜角增加而逐渐增大<sup>[1]</sup>,拉力方向与桩倾斜方向相同时,倾斜桩顶部水平位移必然随倾斜角增加而逐渐减小;倾斜方向同侧土体受压时,倾斜桩顶部

水平位移随倾斜角增加而逐渐减小<sup>[2]</sup>。

为避免混淆,本文明确,侧向卸载或者侧向加载作用下,倾斜角(定义为桩轴线与垂直线间夹角,下同)趋于增大的桩称为正斜桩,倾斜角趋于减小的桩称为负斜桩,如图1所示。侧向卸载作用包括桩体侧向基坑开挖、隧道开挖等,侧向加载作用包括邻近大面积堆载、堤坝填筑、上坡侧土体滑移等方面。如果设置双排桩,顺滑移方向,位于前排的桩称为前排桩,位于后排的桩称为后排桩。

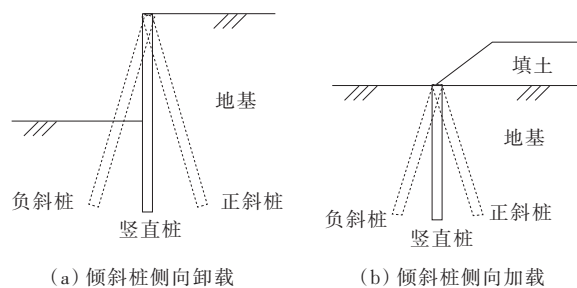


图1 倾斜桩侧向卸载或侧向加载形成被动正斜桩或被动负斜桩

侧向加载条件下倾斜桩<sup>[2]</sup>和侧向卸载条件下倾斜桩<sup>[3]</sup>应用和研究取得了一些成果,但整体上处于起步阶段<sup>[4-5]</sup>,其工作机制尚不十分清楚,没有形成统一的认识,相应标准或者规范没有形成,制约了倾斜桩

收稿日期:2023-01-18(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:202247);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20210765,CX20220875);长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金资助项目(编号:kfj190305)

作者简介:周德泉,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:zhoudequan28@163.com

水平承载能力和稳定性能的应用和发挥。

本文从模型试验、数值模拟和理论分析方面,综合分析侧向卸载、侧向加载条件下被动倾斜桩及其组合体的桩土相互作用规律、水平移动与承载机制,并提出研究前景,以期推动被动倾斜桩及其组合体的深入研究和工程应用,有望根治土体滑移。

## 1 倾斜单(排)桩被动受力研究

### 1.1 桩土相互作用规律

#### 1.1.1 模型试验

侧向卸载条件下,桩周土体应力场发生变化,诱发周边土体产生应力释放和位移,进而在邻近桩体内部产生附加应力和变形。朱彦鹏等<sup>[6]</sup>研究了悬臂式支护桩在开挖阶段的工作性能,发现在桩身上部2/3区段弯矩增长缓慢,越过此区段时,弯矩急剧增长,土压力计算值大于实际土压力;祝伟程等<sup>[7]</sup>通过试验研究发现,桩后土压力随着开挖深度的增加而减小;桩身的弯矩、剪力分别呈现“C”、“S”形分布规律,最大弯矩和剪力突变位置均随着开挖深度的增加而下移;郑刚等<sup>[8]</sup>、孔德森等<sup>[9]</sup>研究倾斜支护桩在开挖过程中的工作性状,发现负斜桩的变形和弯矩分布模式均与悬臂直桩相似,但与悬臂直桩相比,作用在负斜桩上的主动区土压力减小,因此其变形及内力相对较小。在相同开挖深度下,随着倾斜角的增大,桩身弯矩最大值减小,弯矩峰值位置沿桩身逐渐下移<sup>[10]</sup>。

侧向加载条件下,地基土发生侧向变形挤压邻近桩体,桩体承受负摩阻力、发生挠曲变形,引起地基土沉降。王波等<sup>[11]</sup>对桥台桩基承受侧向堆载进行分析,发现桩身轴力和侧摩阻力随堆载的增大而增加,轴力分布沿桩身先增大后减小;肖元杰等<sup>[12]</sup>通过试验对被动桩的负摩阻力进行分析,发现桩周地面附加荷载的大小对中性点的深度有明显的影 响;周德泉等<sup>[13]</sup>开展了复合地基受压时侧向约束桩模型试验,发现桩身轴力分布呈倾斜的“S”形,上部受拉、下部受压,桩身上、下段分别出现正、负摩阻力;桩身弯矩先增大后减小,最大弯矩值位于桩身中部;王华<sup>[14]</sup>等基于工程实测资料,认为桩侧负摩阻力中性点位置受很多因素影响,大面积填土对桩产生的负摩阻力,应具体问题具体分析;周健等<sup>[15]</sup>通过模型试验研究侧向受荷被动桩的桩土相互作用,发现桩侧土压

力分布与桩身变形有关,桩前土压力在转动中心以上呈抛物线形,桩后土压力则在上部呈抛物线形、下部随深度线性增长。

#### 1.1.2 数值模拟

侧向卸载条件下,卿伟宸等<sup>[16]</sup>建立有限元模型研究隧道开挖对邻近桩基的影响,发现桩身轴力和弯矩最大值出现在隧道轴线处,桩身轴力沿桩长先增大,在轴线位置处达到最大,随后趋于恒定;董洁等<sup>[17]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>分析悬臂桩支护结构受力特征,发现随着开挖深度的增加,支护桩的正负弯矩差值增大,弯矩分布明显不均匀;孔德森等<sup>[18]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>研究倾斜支护桩工程特性,发现随着倾斜角的增大,桩身弯矩明显减小<sup>[10]</sup>。比较悬臂式支护桩和倾斜支护桩的正、负弯矩峰值,发现负斜桩的弯矩分布更加合理,避免了桩身因某处弯矩过大而产生应力集中<sup>[19]</sup>;张文超等<sup>[20]</sup>通过数值模拟发现,在相同开挖深度下,负斜桩的正弯矩峰值随倾斜角增大而增加,负弯矩峰值随倾斜角增大而减小;随着桩身倾斜角的增大,最大剪力减小,而最大弯矩先减小后增大,说明负斜桩存在最优倾斜角;邱红胜等<sup>[21]</sup>通过数值模拟研究隧道盾构施工对倾斜桩内力的影响,发现正、负斜桩与直桩的弯矩、轴力曲线分别呈“S”、“C”形分布;正斜桩的弯矩正负性与直桩、负斜桩恰好相反且峰值最小,正斜桩的最大轴力小于直桩、负斜桩;负斜桩摩阻力随倾斜角增大而增大,正斜桩摩阻力则随倾斜角增大略有减小。

侧向加载条件下,吴琼等<sup>[22]</sup>采用三维有限元方法对被动桩进行分析,发现桩侧堆载会导致桩身产生较大的弯矩和轴力,认为堆载距离对桩侧负摩阻力大小和分布影响较为明显;屠毓敏等<sup>[23]</sup>通过有限元方法研究被动排桩的弯曲性状,发现最大正弯矩出现在桩身中部偏下,桩顶产生较大的负弯矩,随着超载的增大弯矩先增大后减小;当超载过大时,桩身正弯矩快速增长,地基中软弱下卧层将导致负弯矩减小,而正弯矩明显增大;Chen等<sup>[24]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>研究负斜桩被动受荷响应,分析倾斜角和软弱土层厚度对桩身弯矩的影响,发现随倾斜角的增大,桩身上部弯矩减小、下部增大;桩身弯矩随软弱土层厚度的增加而增大,最大弯矩发生在软弱层与稳定层交界处;杨剑等<sup>[25]</sup>采用Abaqus建立三维有限元模型,研究桩土相对刚度、侧向土体位移的大小及形状、桩顶约

束条件及土体移动厚度对斜桩内力及土抗力分布的影响,发现刚性斜桩的挠度小于柔性斜桩,但弯矩和剪力较大;桩土相对刚度对正、负斜桩的弯矩及土抗力分布规律有明显影响。

由于桩身倾斜布置,桩周土体初始应力场呈现非轴对称分布,从而使桩侧摩阻力、桩身弯矩及土压力较被动直桩发生明显变化。现有研究<sup>[6-25]</sup>表明:侧向卸载条件下,负斜桩的弯矩、桩侧土压力明显小于直桩,弯矩分布均匀合理,有利于桩体作用的充分发挥,变化规律受到倾斜角度、桩顶约束条件的影响;侧向堆载条件下,倾斜桩的内力、土压力变化规律较为复杂,受到倾斜方向、倾斜角度、桩顶有无约束、桩侧堆载的大小和位置、桩顶荷载和桩体刚度等诸多因素的影响,其工程特性的研究成果较少,需要继续开展相关研究。

## 1.2 水平移动与承载机制

### 1.2.1 模型试验

侧向卸载条件下,张亚芳等<sup>[26]</sup>通过模型试验研究悬臂桩间距对支护性能的影响,发现随着间距的减小,悬臂桩对基坑的支护性能增强;陈启辉等<sup>[27]</sup>研究认为悬臂桩支护以基坑底面土的被动土压力来平衡边坡的主动土压力和水压力的作用,而被动土压力的提供则需要较大的位移,容易导致基坑周围地面的开裂和破坏;郭建芝等<sup>[28]</sup>介绍了斜桩挡土支护在某工程中的应用,发现相较于竖直桩挡土结构,负斜桩挡墙能充分发挥材料性能,提高基坑的稳定性;孔德森等<sup>[29]</sup>采用模型试验研究倾斜支护桩的受力变形特性,对比分析单排直桩、单排斜桩的桩顶位移、桩后土体沉降和桩身弯矩,发现支护桩倾斜形成负斜桩的布置方式可以更加有效地减小桩顶位移、桩身位移和桩后土体沉降,增强了支护结构的刚度和抗倾覆能力;Maeda等<sup>[30]</sup>基于离心试验发现负斜桩挡墙的桩身水平位移及弯矩要小于直桩挡墙,最大桩身位移和弯矩分别位于桩顶和桩身中部。

侧向加载条件下,Poulos等<sup>[31]</sup>采用模型试验研究被动单桩的响应,发现影响桩身最大弯矩的关键参数是桩端约束条件、移动土层厚度与桩体埋置深度的比值、桩径及刚度,并给出了最大弯矩的归一化表达式;Tsuchiya等<sup>[32]</sup>采用大型剪切箱研究侧向土体运动对基桩性能的影响,发现桩身应变分布及桩体破坏模式明显受到侧向土体运动形式的影响;李仁平等<sup>[33]</sup>基于

某软土地区桥梁桩基实测资料,认为路基堆填导致土体侧向变形是桥梁桩基损坏的主要原因;软土层厚度越大,侧向变形越严重,岸坡稳定性越差;马学宁等<sup>[34]</sup>通过室内模型试验研究堆载和桩载施加顺序对单桩负摩阻力的影响,认为先堆载后桩载工况下,桩身轴力先增加后减小,中性点位置随桩载增加逐渐上移;先施加桩载时,桩身轴力沿深度逐渐减小,无中性点,施加堆载时,轴力先增加后减小,中性点出现并逐渐下移;先桩载后堆载较先堆载后桩载桩基承载力发挥系数大,即桩基承载力安全储备小。

### 1.2.2 数值模拟

侧向卸载条件下,杨晓杰等<sup>[35]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>研究隧道施工对邻近桩基的影响,认为土体卸载的扰动表现在桩侧摩阻力和桩端总抗力的变化,进而影响到桩基承载力;房艳峰等<sup>[36]</sup>采用Ansys研究基坑开挖过程中支护桩及桩周土的变形,发现当开挖深度较小时,坑外的沉降曲线呈三角形,当开挖深度较大时,呈抛物线形;桩身位移呈非线性增加,顶部位移为底部的5~6倍,桩顶位移超限时将引发桩后土体剪切破坏;王恩钰等<sup>[37]</sup>、宋福渊等<sup>[38]</sup>建立三维数值模型研究悬臂式支护桩和倾斜支护桩的变形与桩周土沉降,发现负斜桩比直桩约束效果好,有效减小了桩身侧移与卸载造成的紧邻建筑物的附加变形<sup>[29-30]</sup>,其坑外土体沉降曲线类似于带支撑支护的土体沉降曲线形式;桩数相同时,采用负斜桩支护可增大基坑开挖深度;Ye等<sup>[39]</sup>对倾斜支护桩的承载性能进行评估,发现负斜桩挡墙的承载力远大于垂直桩墙,但倾斜角过大会降低其支护效果和占用宝贵的开挖空间,建议负斜桩倾角为 $9^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ;通过比较桩截面尺寸、桩长及桩周土抗剪强度对斜桩墙响应的影响,建议将长细比设置为小于40,桩底嵌入比大于0.4,将显著减小负斜桩挡墙变形,提高基坑稳定性。

侧向加载条件下,Martin等<sup>[40]</sup>、Miao等<sup>[41]</sup>分别采用FLAC<sup>3D</sup>、Abaqus研究土体侧向移动作用下的桩身响应,认为桩土相对刚度对桩身变形、桩侧土压力分布和桩体破坏模式具有重要影响;李忠诚等<sup>[42]</sup>采用有限元研究堆载作用下桩基响应,发现桩身侧移随着堆载、桩间距的增大而增加,随着堆载距离和桩身刚度的增大而减小;当桩身刚度较大时,桩身侧移模式由弹性挠曲变形变为刚性转动,桩身最大侧移位置发生变化;胡明等<sup>[43]</sup>采用强度折减法研究微型斜

桩加固边坡,发现正斜桩加固的稳定系数均大于直桩,微型斜桩加固边坡存在最优倾斜角度;Ye等<sup>[44]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>研究斜桩加固边坡,分析了边坡上桩体不同位置及不同倾斜角对桩身受力变形特征及边坡安全系数的影响,发现负斜桩能减小边坡的变形和桩身弯矩,提高边坡的稳定性。

### 1.2.3 理论分析

侧向卸载条件下,王小敏等<sup>[45]</sup>分析传统土压力计算方法存在的主要问题,提出按土的软硬状态确定修正土压力系数 $K_a$ ,考虑土的固结状态和支护结构位移对土压力的影响;陈林靖等<sup>[46]</sup>假设地基土抗力系数随深度呈双参数非线性变化,采用有限元法计算桩身内力,通过调整抗力比例系数和幂指数,使计算值与实测值较好吻合;赵明华等<sup>[47]</sup>对桩体进行离散化处理,假定基坑内、外侧土压力与桩身位移之间的非线性函数关系,建立刚度方程组,采用Newton-Raphson法求解得到节点位移列阵,通过单元刚度方程和节点位移列阵反求桩身内力和桩侧土压力;王帅刚等<sup>[48]</sup>借助库仑公式及竖直桩内力分析理论,建立倾斜桩支护计算模型,提出在一定倾斜角范围内适用的倾斜桩内力计算公式;Diao等<sup>[49]</sup>采用非连续性布局优化方法,分析倾斜桩支护结构破坏模式和稳定性影响因素,认为随着倾斜角增加,破坏模式逐渐从倾覆破坏转变为整体破坏;基于大量案例,提出一个简单的无量纲公式来预测斜桩支护基坑的安全系数;周海祚等<sup>[50]</sup>模拟分析倾斜支护桩在基坑开挖过程中变形到破坏的全过程,提出基坑倾斜桩支护的抗倾覆与整体稳定安全系数计算方法,认为倾斜支护桩应分别验算其抗倾覆稳定性和整体稳定性,并取两者最小值作为最危险状态下的安全系数。

侧向加载条件下,王广月<sup>[51]</sup>基于Boussinesq解,推导局部超载下地下结构侧压力计算公式;栾茂田等<sup>[52]</sup>基于桩和土变形协调条件,确定桩侧土压力表达式;杨敏等<sup>[53]</sup>基于 $p$ - $y$ 曲线法<sup>[54]</sup>和Poulos弹性理论法<sup>[55]</sup>,提出一种能够考虑两者优点的耦合算法;李忠诚等<sup>[56]</sup>从土体运动和应力传递方式入手,将被动桩分为被动侧成拱和主动侧形成应变楔,基于应变楔理论<sup>[57]</sup>和塑性变形理论<sup>[58]</sup>分别计算土压力和土抗力;宋修广等<sup>[59]</sup>基于Flamant解建立条形荷载作用下水平附加应力计算公式,考虑到桩-土界面剪切效应,采用双参数地基模型分析桩后土体的桩-土受力特征。

被动荷载下桩身的承载能力变化主要与桩体刚度、桩端约束条件、桩顶荷载、土层性质、荷载大小和位移等因素有关。对于倾斜桩而言,除了上述因素外,倾斜方向及倾角角度对其承载性能有很大的影响。现有研究<sup>[26-59]</sup>表明:侧向卸载条件下,当倾斜角(负斜)在一定范围内增加时,桩体整体位移、坑外土体沉降减小,支护结构承载力增大;侧向加载条件下,一定倾斜角下,倾斜桩能提高边坡的稳定性。目前工作集中在侧向卸载条件下倾斜桩(负斜)支护结构的稳定性能,而侧向堆载条件下的倾斜桩承载力变化问题很少研究,其正、负斜桩的工作机理尚不清楚。因此,对于倾斜单(排)桩的研究,桩土相互作用、桩身变形和承载能力研究总体上还处于初级阶段。

## 2 倾斜桩组合体被动受力研究

工程中,倾斜桩常与其他结构形成组合体,共同抵抗竖向、水平静载作用及风、浪、地震等循环荷载。为了抵抗由侧向堆载、基坑开挖及土体运动作用于桩身的被动荷载,国内外研究人员提出了许多种包含斜桩的组合体结构,如斜直双排桩、正负斜桩组合体,并开展研究。

### 2.1 桩土相互作用规律

#### 2.1.1 模型试验

侧向卸载条件下,通过对双排桩支护结构开展试验研究,何颐华等<sup>[60]</sup>发现上部朝开挖面方向弯曲、下部朝迎土面弯曲,连接梁与结点的刚度越大,双向弯曲会越明显;姚爱军等<sup>[61]</sup>发现前排桩前土压力呈“右凸”形分布,土压力值明显大于规范方法计算值;彭文祥等<sup>[62]</sup>发现排距的变化对后排桩的内力影响明显大于前排桩,一定程度上,排距过大容易导致前后排桩受力不合理;将双排桩中的前排桩向基坑外倾斜一定角度作为新型支护结构,徐源等<sup>[63]</sup>研究发现斜直双排桩的弯矩分布规律与前排桩的倾斜角有关,随着倾斜角的增大,前排负斜桩的弯矩峰值略有增加,但后排桩弯矩峰值明显减小,认为前排桩最优倾斜角度为 $10^\circ$ ;郑刚等<sup>[10]</sup>研究发现斜直双排桩的弯矩分布模式与桩顶设支撑的直桩弯矩类似,反弯点随开挖深度的增加沿桩身下移;桩身倾斜角越小,前排负斜桩上的被动土压力就越大,而后排桩上的主动土压力就越小,认为前排桩受压,发挥了类似内支

撑作用,后排桩受拉,发挥了类似锚杆作用;王洋等<sup>[64]</sup>依托某改造工程研究了边坡开挖卸载条件下微型组合桩的受力机制,发现各排桩桩身轴力依次呈现出反“S”形、双弓形和“S”形,最大轴力均为拉力,其峰值位置与卸载开挖侧有关,认为正负斜桩组合体可以有效控制边坡卸荷回弹引起的滑动位移和坡体内塑性区的开展。

侧向加载条件下,Jeong等<sup>[65]</sup>研究了堆载作用下桩基的工程性状,发现后排桩的最大弯矩位于黏土层的上部,前排桩的最大弯矩出现在桩顶,后排桩的最大弯矩比前排桩的稍大些;随路堤填筑,后排桩最大弯矩增量大于前排桩。为了增强复合地基的整体稳定性,提升软基加固效果,周德泉等<sup>[66]</sup>提出了“斜直双排桩+复合地基”的软基处理方案。在路堤坡脚处,设置斜直双排桩,充分发挥后排直桩的“挡土”作用及前排负斜桩的“支撑”作用,控制地基软土的侧向滑移,开展模型试验研究<sup>[67-69]</sup>,分析前排桩倾斜度、桩长及排距对斜直双排桩工程特性的影响,结果表明:由于后排桩的遮帘效应,前排桩土压力小于后排桩,后排桩弯矩峰值位于桩身中部,且随前排桩桩长、倾斜度及排距的增大而增大,前排桩弯矩峰值位于桩顶,随桩长增大而增大,随倾斜角和排距的增大而减小。认为路堤荷载作用下,后排直桩的中部、前排斜桩的顶部易发生弯曲破坏,后排直桩先于前排斜桩破坏,并为上述参数给出合理的取值范围,为斜直双排桩的设计提供了试验依据。

### 2.1.2 数值模拟

侧向卸载条件下,王军等<sup>[70]</sup>采用Ansys分析排距对双排桩内力的影响,发现排距对前、后排桩的正、负弯矩分布影响较大,认为排距在一定范围内,桩间土才能有效地将后排桩体受到的土压力传递给前排桩<sup>[62]</sup>;杨德健等<sup>[71]</sup>研究双排桩支护的桩侧土压力,发现开挖面以上主动土压力接近理论主动土压力,开挖面以下土压力介于理论主动土压力与静止土压力之间,前、后排桩的被动土压力与理论被动土压力值相差较大<sup>[61]</sup>;丁洪元等<sup>[72]</sup>通过数值模拟研究发现,在一定范围内,双排桩的桩径越大,前排桩的负弯矩峰值越大、正弯矩峰值减小,后排桩的正、负弯矩峰值均减小,认为桩径增大有利于后排桩的整体受力;王建等<sup>[73]</sup>采用有限元对斜直双排桩支护进行研究,发现随着前排负斜桩倾斜角的增大,双排桩的负弯矩

分布范围逐渐缩小,正弯矩分布范围增加,当倾斜角超过 $20^{\circ}$ 时,桩身受力分布不均匀;马雪兵等<sup>[74]</sup>研究开挖过程中斜直双排桩内力的影响因素,发现前排负斜桩弯矩峰值小于后排直桩,且桩间土体作用于前排负斜桩的压力相对后排直桩小,认为增加前、后排桩桩长、缩小桩间距、减小连梁长度,可改善桩身内力分布;王祖珍等<sup>[75]</sup>通过有限元探讨后排桩倾斜的工程性状,认为随着后排正斜桩倾斜角的增大,前排桩弯矩、桩顶剪力增大,轴力减小,后排桩弯矩、桩顶剪力减小,轴力增大。

侧向加载条件下,刘敦平等<sup>[76]</sup>采用Ansys研究群桩的桩-土相互作用,比较各桩侧向压力分布情况,发现由于群桩中的“遮挡”和桩间土拱效应,靠近堆载的后排桩上的侧向压力要比前排桩上的侧向压力大<sup>[67-69]</sup>;申永江等<sup>[77]</sup>建立有限元模型研究不同排距条件下双排抗滑桩受力状况,发现排距越大,后排桩的弯矩和剪力就越大,而前排桩的弯矩和剪力却越小,认为合理的排距才能保证前、后排桩都能起到较好的抗滑作用;胡毅夫等<sup>[78]</sup>通过数值模拟研究人字形抗滑桩的内力分布规律,发现人字形桩的弯矩分布呈倒“S”状;人字形桩夹角为负时(前排为负斜桩、后排为直桩),弯矩的最大值随着夹角绝对值增大而减小,夹角为正时(前排为直桩、后排为正斜桩),弯矩的最大值随着夹角增大而增大,故负夹角桩的受力优于正夹角桩。实际工程中,应尽量将夹角设计为负值,且根据施工条件适当增大夹角。

正斜桩、负斜桩或者竖直桩通过桩顶连系梁连接在一起形成组合体,抵抗被动荷载作用,其桩身内力、桩侧土压力规律与竖直桩组合体相比发生明显的变化。研究<sup>[60-78]</sup>表明:侧向卸载条件下,前排桩倾斜(负斜)稍微增大前排桩的弯矩,显著减小后排桩的弯矩,后排桩倾斜(正斜)时,则前排桩弯矩减小、后排桩弯矩增大,说明斜桩的布置与倾斜方向对倾斜桩组合结构的内力变化可能产生相反的规律;侧向加载条件下,前排桩倾斜(负斜)减小了前排桩的弯矩,增大了后排桩的弯矩,且后排桩的水平土压力大于前排桩,负斜桩组合体的性能要优于正斜桩组合体,上述规律均受到桩间距、排距的影响。

## 2.2 水平移动与承载机制

### 2.2.1 模型试验

侧向卸载条件下,郑轩等<sup>[79]</sup>通过模型试验研究,

发现双排桩支护结构中前排桩主要发生弯曲变形,承担大部分荷载,后排桩主要发生拉伸变形,具有锚固和分担荷载的作用;Seo等<sup>[80]</sup>利用斜桩改进现有挡土墙支护结构,认为正斜桩导致挡土墙结构的侧向位移显著减小,显著降低作用于前支撑上的土压力,增强结构支护能力;郑刚等<sup>[10]</sup>通过大型室内模型试验对比测试直桩、负斜桩 $20^\circ$ 、正斜直组合 $10^\circ$ 、正斜直组合 $20^\circ$ 、负斜直组合 $10^\circ$ 、负斜直组合 $20^\circ$ 和正负斜组合 $10^\circ$ 的支护性能,发现正负斜组合 $10^\circ$ 和负斜直组合 $20^\circ$ 的支护性能相近,且开挖某深度时最大水平位移和最大弯矩最小,即1倍倾斜度正负斜组合能够达到2倍倾斜度负斜直组合的工程效果;王际凯等<sup>[81]</sup>研究开挖过程中倾斜长短桩的受力变形特性,发现倾斜长短组合桩的支护效果与负斜桩的倾斜角成正比,与排桩的桩长成反比;存在倾斜角临界值,当倾斜角小于临界值时,最佳桩长分配受倾斜角大小的影响,而当倾斜角大于临界值时,斜桩越长,支护效果越好;叶金铨等<sup>[82]</sup>采用模型试验比较5种桩型支护效果,发现双排斜桩位移增长最为缓慢,性能排序依次为:双排负斜桩、常规排距前排负斜双排桩、双排直桩、小排距前排负斜双排桩、单排桩。

侧向加载条件下,Chen等<sup>[83]</sup>通过模型试验研究,发现被动群桩响应的影响程度取决于群桩位置、桩间距、桩数和桩头固定条件;陈永战等<sup>[84]</sup>采用试验研究码头桩基对岸坡侧向变形的遮帘效应,认为应充分考虑叉桩和斜桩对桩台约束力强及桩台约束时排桩对岸坡侧向变形抑制力强等工程特点,一定数量的叉桩或斜桩可提高基础抗滑能力;Sabbagh等<sup>[85]</sup>通过千斤顶给砂土中的正-负斜桩(倾斜角分别为 $+10^\circ$ 、 $-10^\circ$ )、双直桩、斜直桩(倾斜角分别为 $+20^\circ$ 或 $-20^\circ$ )水平加载对比测试,发现正-负斜桩的水平位移最小,具有更大的水平抗力;周德泉等<sup>[86-87]</sup>开展了循环荷载下路堤坡脚处双排斜桩模型试验,研究桩端不同约束条件下负斜桩水平位移变化规律,发现顶部约束下后排斜桩侧移曲线分布呈倒梯形,桩身变形模式为“平移+绕桩底转动”,相同荷载作用下,负斜桩的顶部侧移小于竖直桩,桩身侧移随倾斜角增大而减小;通过将坡脚抗滑桩布置成负斜形式或桩底嵌固,明显减少桩顶侧移,提高抗滑移效果。基于实际工程研究倾斜软基上桩体复合地基受压时坡脚处插入斜直桩组合体,揭示倾斜软基

上插入硬层的斜直桩组合结构单侧受力变形机制与破坏模式,进一步为倾斜软基上斜直桩组合结构的设计提供依据<sup>[2]</sup>。

### 2.2.2 数值模拟

侧向卸载条件下,商卫东等<sup>[88]</sup>采用有限差分法研究开挖过程中桩周土变化规律,发现加固双排桩的桩间土明显减小坑外土体位移,可用双曲线来拟合最大位移和桩间土体刚度的关系;刘日成等<sup>[89]</sup>采用有限元软件研究双排桩支护结构的工程特征,发现桩顶侧移最大,最大弯矩和剪力位于坑脚位置,该处发生应力集中,受力最大;黄晓程等<sup>[90]</sup>发现增大前排负斜桩的抗弯刚度能更好控制土体变形,认为设计前、后桩刚度不同的斜直双排桩支护体系可充分发挥结构优势;余地华等<sup>[91]</sup>通过有限元研究发现斜直双排桩的最大水平位移并非位于桩顶,随开挖深度加大,水平位移峰值沿桩身下移的趋势明显,前排负斜桩的斜撑效应也更显著;谢潘想等<sup>[92]</sup>采用Abaqus研究倾斜组合桩的水平位移,发现前排负斜桩的最大位移普遍大于后排桩;增加排距可提高组合桩与桩间土的整体刚度,抗滑移能力增强,但排距过大将导致抗滑移能力变弱。

侧向加载条件下,周应华<sup>[93]</sup>采用Plaxis研究门架式双排桩的工程特性,发现门架式双排桩具有较大的侧向刚度,可以有效地限制支护结构的侧向变形,连梁调整了结构内力,充分发挥各个构件的最大效能;张建勋等<sup>[94]</sup>通过有限元研究了双排桩土拱效应,认为土拱效应出现的条件为行间距为桩径的2~8倍;Chen等<sup>[95]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>研究斜直群桩承受侧向土体位移的桩身响应,发现群桩中加入正、负斜桩减小了整体水平位移;当桩间距从 $2d$ ( $d$ 为桩径)增加到 $4d$ 时,土拱效应发挥,群桩的位移减小;Poulos等<sup>[96]</sup>、方君华等<sup>[97]</sup>对含有斜桩的群桩基础进行数值研究,认为正、负斜桩可减小群桩基础的水平位移,提高承载能力<sup>[83]</sup>;Zhou等<sup>[98-99]</sup>针对软土地基由于施工不当导致地基中桩体倾斜或水平变形过大、引起路堤边坡滑移等问题,提出负斜群桩加固方案,并开展有限元模拟,发现该方案可有效减小土体变形和桩身内力,增强地基承载力,提高稳定性。

### 2.2.3 理论分析

侧向卸载条件下,郑刚等<sup>[100]</sup>考虑桩土相互作用,将双排桩间的土体视为薄压缩层,以水平弹簧模拟,

提出平面杆系有限元双排桩分析模型;范秋雁等<sup>[101]</sup>将前后排桩视为弹性地基梁,用土弹簧模拟开挖面以下的土抗力,根据弹性地基梁的挠曲微分方程及桩身变形协调条件,获得前、后排桩的内力;Jeldes等<sup>[102]</sup>介绍一种新型的挡土结构——框架式挡土墙(PFRW),通过现场监测数据和基于库仑应力和张应力修正的设计方法,提出了一种预测斜桩土压力和整体倾覆力矩的简化计算方法;郑刚等<sup>[103]</sup>研究倾斜桩组合支护结构的变形特性及稳定性,发现倾斜桩组合支护基坑的稳定性随斜桩倾斜角增大而增大,由于冠梁、斜桩及直桩(或斜桩)组成一个空间结构,提高整体抗倾覆能力,抵抗失稳滑动能力较强;郭景琢等<sup>[3]</sup>考虑基坑开挖过程中斜直组合支护结构的受力变形特点,基于桩土相互作用的平面杆系有限元模型<sup>[99]</sup>,对桩侧摩阻力、被动侧法向土压力、桩间土体及桩端阻力采用等效弹簧进行模拟,考虑桩间土体对桩侧的初始压力,提出适用于斜直组合桩有限元计算方法;Ma等<sup>[104]</sup>采用离心试验研究边坡的变形及破坏模式,对比分析不均匀沉降条件下浅基础、竖直桩基及斜直组合桩基的加固效果和机理,发现斜桩的基础形式在抵抗不均匀沉降和减少边坡变形方面是有效的,提高了边坡的稳定性;通过变形局部化和局部破坏的综合分析,揭示边坡的破坏机理,并阐明倾斜桩基的加固机理。

侧向加载条件下,胡铁权等<sup>[105]</sup>基于Rankine土压力理论,推导出考虑地面超载作用土压力分布模式,结合双排桩土压力分配模型,采用荷载结构法进行计算,得到双排桩水平位移和弯矩;钱同辉等<sup>[106]</sup>考虑变形协调作用,将双排门架式抗滑桩视为桩梁岩土共同作用的单层多跨框架结构,建立刚架结构的变形协调方程,采用有限元理论计算内力和变形特征;申永江等<sup>[107]</sup>假定悬臂式双排抗滑桩的最优状态,分析双排抗滑桩的力学传递过程,运用土拱理论和极限平衡理论,推导前、后排抗滑桩所承受滑坡推力的计算公式,提出滑坡推力的分配计算方法;安孟康等<sup>[108]</sup>通过将“人”字形微型桩体系滑面以上部分分别简化为独立单桩模型、顶部铰接刚架结构模型和顶部固定连接刚架结构模型,在滑坡推力为矩形分布条件下,推导滑面处内力的计算公式。

被动荷载作用下,倾斜桩组合体的承载性能取决于桩体倾斜方向、倾斜角度及连梁(或承台),其工

作机理相当复杂。研究<sup>[79-108]</sup>表明:在侧向加、卸载条件下,相较于其他结构,正、负斜桩组合体水平位移最小,具有更大的水平抗力,支护和抗滑移效果十分显著;在群桩基础或软基中使用倾斜桩将有效减小土体沉降、侧移和桩身弯矩,改善桩基的应力应变状态,增强桩基础或地基承载力。但上述效果受到倾斜方向、倾斜角度、桩间距、排距及桩身刚度的影响。倾斜桩组合体的工程特性影响因素包括单桩的影响因素(桩体刚度、桩端约束条件、桩顶荷载、土层性质、荷载大小、土体位移、倾斜方向及倾斜角等),还包括桩间土拱效应、遮帘效应和群桩效应等,这些因素对倾斜桩组合体承载力的影响尚不十分清楚。

### 3 研究展望

特定倾斜方向的倾斜桩及其组合体具有很好的水平承载潜能,但其工作机制尚不十分清楚,制约了倾斜桩及其组合体水平承载能力和稳定性能的应用和发挥。本文从模型试验、数值模拟和理论分析方面,综合分析侧向卸载、侧向加载条件下被动倾斜桩及其组合体的桩土相互作用规律、水平移动与承载机制,在此基础上,后续相关研究主要从如下几方面拓展,以期推动被动倾斜桩及其组合体的深入研究和工程应用,根治土体滑移。

(1) 侧向卸载、侧向加载条件下,桩体侧面可能是天然土体也可能是复合土体,例如,高层建筑下的桩体复合地基侧面新建基坑开挖,桩体复合地基上的路堤不断填筑加高。基于均质土移动模式与土压力计算原理,研究复合地基水平移动模式及竖直桩、正斜桩、负斜桩水平土压力和桩前土抗力计算方法,为被动倾斜桩受力分析提供依据。

(2) 竖直桩、正斜桩、负斜桩,相互组合形成双排桩或者多排桩。基于侧向卸载和侧向加载条件下竖直桩内力计算方法,研究被动正斜桩、被动负斜桩的内力计算方法及竖直桩与倾斜桩组合体的工作机制与破坏模式,提出被动倾斜桩水平位移安全阈值。

(3) 竖直桩与倾斜桩组合体与桩体复合地基相互作用,形成新的复合体。研究侧向卸载和侧向加载条件下竖直桩与倾斜桩组合体协同复合地基的渐进破坏模式与稳定分析方法,为编制、修订相应设计标准提供依据。

## 参考文献:

- [1] 周德泉,蔡强,王创业,等.负斜桩顶部水平受拉响应及  $p$ - $y$  曲线特征试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):198-207.
- [2] 周德泉,冯晨曦,肖灿,等.倾斜软基上斜直桩组合结构单侧受力破坏模式试验[J].中国公路学报,2021,34(7):201-214.
- [3] 郭景琢,李昕昊,程雪松,等.基坑斜直组合倾斜桩支护结构设计计算方法研究[J/OL].土木工程学报,2022:1-11 [2022-07-27].<https://doi.org/10.15951/j.tmgcx.22030261>.
- [4] 周德泉,颜超,邓超.堆载作用下桩体工程特性研究[J].中外公路,2015,35(1):5-9.
- [5] 周德泉,杨帆,谭焕杰.土体中倾斜桩工程性状研究[J].中外公路,2012,32(3):14-18.
- [6] 朱彦鹏,王秀丽,于劲,等.悬臂式支护桩内力的试验研究[J].岩土工程学报,1999,21(2):101-104.
- [7] 祝伟程,曹周红,彭云溪,等.基于离心模型试验的悬臂式排桩力学特性[J].水运工程,2019,44(7):198-203,225.
- [8] 郑刚,白若虚.倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J].岩土工程学报,2010,32(S1):39-45.
- [9] 孔德森,张杰,王士权,等.倾斜悬臂支护桩受力变形特性模型试验[J].工业建筑,2019,49(3):117-121,70.
- [10] 郑刚,王玉萍,程雪松,等.基坑倾斜桩支护性能及机理大型模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(9):1581-1591.
- [11] 王波,王保田,张福海,等.膨胀土地基桥台桩基负摩阻力现场试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(4):447-450.
- [12] 肖元杰,袁观富,张恒,等.软土地区负摩阻力对桩基影响分析及检测实例[J].中国水运(下半月),2011,11(10):242-244.
- [13] 周德泉,颜超,刘宏利.桩体复合地基受压过程中侧向约束桩工程特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3784-3791.
- [14] 王华,王东,周健永.大面积填土对桩基产生负摩阻力中性点位置确定[J].工程勘察,2008,36(S2):77-80.
- [15] 周健,亓宾,曾庆有.被动侧向受荷桩模型试验及颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报,2007,29(10):1449-1454.
- [16] 卿伟宸,廖红建,周冬峰.隧道开挖对桩基影响的有限元分析[J].土工基础,2006,20(5):29-31.
- [17] 董洁,李建军,秦伟华,等.悬臂桩基坑支护数值分析[J].绿色科技,2015,17(12):273-275.
- [18] 孔德森,张秋华,史明臣.基坑倾斜支护桩模型试验的数值模拟研究[J].岩土工程学报,2011,33(S2):408-411.
- [19] 孔德森,张秋华,史明臣.基坑悬臂式倾斜支护桩受力特性数值分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(4):742-747.
- [20] 张文超,薛炜.斜桩支护基坑的数值模拟研究[J].城市勘测,2017(2):171-173.
- [21] 邱红胜,符传邦.盾构隧道施工对邻近斜桩的影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):925-929.
- [22] 吴琼,陈锦剑,夏小和,等.桩侧堆载作用下被动桩受力性状研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):467-471.
- [23] 屠毓敏,俞亚南.被动排桩弯曲性状的三维有限元分析[J].岩土力学,2008,29(2):342-346.
- [24] CHEN C Y, TSAI C X. Batter pile behavior modeling using finite difference analysis[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Impact Engineering,2013,566:199-204.
- [25] 杨剑,高玉峰,程永锋,等.受侧向土体位移斜桩的特性[J].防灾减灾工程学报,2008,28(4):506-512.
- [26] 张亚芳,肖昔泽,刘浩,等.悬臂桩的间距布置对基坑支护性能的影响[J].广州大学学报(自然科学版),2013,12(6):15-20.
- [27] 陈启辉,孙剑平,郭秋英.某基坑事故原因分析及加固处理[J].建筑结构,2006,36(11):107-108.
- [28] 郭建芝,曹华先.斜桩挡土支护深基坑[J].广州建筑,1997,25(2):38-41.
- [29] 孔德森,张杰,王士权,等.基坑支护倾斜悬臂桩受力变形特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):160-168.
- [30] MAEDA T, SHIMADA Y, TAKAHASHI S, et al. Design and construction of inclined-braceless excavation support applicable to deep excavation[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,2013:2051-2054.
- [31] POULOS H G, CHEN L T, HULL T S. Model tests on single piles subjected to lateral soil movement[J]. Soils and Foundations,1995,35(4):85-92.
- [32] TSUCHIYA T, KAKURAI M, YAMASHITA K, et al. Large-scale laminar shear box for lateral pile loading tests with ground displacements[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2001,1(2):43-51.
- [33] 李仁平,陈云敏,陈仁朋.软基中桥头路基对邻近桩基的影响分析[J].中国公路学报,2001,14(3):76-80.
- [34] 马学宁,张沛云,王旭,等.考虑堆载和桩载施加顺序的单桩负摩阻力模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S1):266-271.
- [35] 杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等.地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1290-1295.
- [36] 房艳峰,高华喜.悬臂式围护结构基坑的数值模拟[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2010,29(1):5-8.
- [37] 王恩钰,周海祚,郑刚,等.基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J].岩土工程学报,2019,41(S1):73-76.



- [38] 宋福渊,油新华.深基坑斜桩支护受力性能研究[J].建筑技术,2020,51(9):1028-1032.
- [39] YE J, HE X. Performance of batter pile walls in deep excavation: Laboratory test and numerical analysis[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, 28(14):1-10.
- [40] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(8): 588-598.
- [41] MIAO L F, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional finite element analyses of passive pile behaviour[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30(7):599-613.
- [42] 李忠诚,朱小军.地面超载条件下土体侧移模式及对邻近桩基影响分析[J].岩石力学,2007,28(S1):809-814.
- [43] 胡明,雷用,赵晓柯.倾斜微型桩桩身参数敏感性有限元分析[J].后勤工程学院学报,2014,30(1):12-16,68.
- [44] YE J, ZENG G. Beneficial role of batter pile in slope under infinite uniform surcharge loading[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, 28(23):1-16.
- [45] 王小敏,王宏润,杨世忠.红粘土中悬臂支护桩的土压力计算[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2005,34(3): 106-110.
- [46] 陈林靖,戴自航.基坑悬臂支护桩双参数弹性地基杆系有限元法[J].岩石力学,2007,28(2):415-419.
- [47] 赵明华,李文,张锐.考虑桩-土相互作用的悬臂式排桩内力计算方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(1):1-7.
- [48] 王帅刚,王自豪.基坑倾斜支护桩在水平荷载作用下的内力分析[J].江西建材,2016(18):216-217.
- [49] DIAO Y, ZHU P Y, JIA Z Y, et al. Stability analysis and safety factor prediction of excavation supported by inclined piles in clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 140: 104420.
- [50] 周海祚,郑刚,何晓佩,等.基坑倾斜桩支护稳定特性及分析方法研究[J].岩土工程学报,2022,44(2):271-277.
- [51] 王广月.地下结构局部超载侧压力计算[J].岩土工程技术,1997,11(1):35-40.
- [52] 栾茂田,韩丽娟,年廷凯,等.被动桩-土相互作用的简化分析[J].防灾减灾工程学报,2004,24(4):370-374.
- [53] 杨敏,周洪波.承受侧向土体位移桩基的一种耦合算法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(24):4491-4497.
- [54] GOH A T C, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(9):792-801.
- [55] POULOS H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(5):391-406.
- [56] 李忠诚,杨敏.被动桩土压力计算的被动拱-主动楔模型[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4241-4247.
- [57] ASHOUR M, NORRIS G, PILLING P. Lateral loading of a pile in layered soil using the strain wedge model[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(4):303-315.
- [58] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. *Soils and Foundations*, 1975, 15(4): 43-59.
- [59] 宋修广,李信,万立尧,等.堆载作用下被动桩的水平受力及位移分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(2):56-62.
- [60] 何颐华,杨斌,金宝森,等.双排护坡桩试验与计算的研究[J].建筑结构学报,1996,17(2):58-66.
- [61] 姚爱军,李浩波,郑轩,等.深基坑悬臂双排桩支护结构土压力分析[J].施工技术,2016,45(S1):1-5.
- [62] 彭文祥,刘彬.深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):121-127.
- [63] 徐源,郑刚,路平.前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J].岩土工程学报,2010,32(S1):93-98.
- [64] 王洋,冯君,谢先当,等.微型桩组合抗滑结构受力机制的现场试验研究[J].岩石力学,2018,39(11):4226-4231,4250.
- [65] JEONG S, SEO D, LEE J, et al. Time-dependent behavior of pile groups by staged construction of an adjacent embankment on soft clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(4):644-656.
- [66] 周德泉,周果子.一种加固倾斜软基的组合型复合地基:中国,CN206233257U[P].2017-06-09.
- [67] 周德泉,肖灿,冯晨曦,等.侧向堆载下斜桩长度影响斜-直双排桩受力响应试验研究[J].公路交通科技,2021,38(2): 24-32.
- [68] 周德泉,曹之焯,冯晨曦,等.倾斜度影响斜-直组合桩单侧受力响应试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021, 52(7):2426-2437.
- [69] 周德泉,蔡港旗,胡鹏,等.路堤荷载下坡脚处不同排距斜直组合桩工程特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2656-2667.
- [70] 王军,王磊,肖昭然.双排桩支护排距的有限元分析与研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):1096-1099.
- [71] 杨德健,王铁成,李新华.双排桩支护结构变形特点与土压力有限元分析[J].华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(3):10-16.
- [72] 丁洪元,昌钰,陈斌.软土深基坑双排桩支护结构的影响因素分析[J].长江科学院院报,2015,32(5):105-109.
- [73] 王建.基坑前排桩倾斜的双排桩性状分析[J].低温建筑技术,2017,39(1):89-92.
- [74] 马雪兵,余地华,郑刚,等.深基坑前排倾斜双排桩设计与施工技术研究[J].施工技术,2021,50(7):6-10.

- [75] 王祖珍,董阁,汪东林.基坑后排桩倾斜的双排桩受力与变形特征[J].安徽建筑,2020,27(12):86-88.
- [76] 刘敦平,蒯行成,赵明华.软土运动作用下被动桩桩-土水平相互作用的三维有限元分析[J].中国公路学报,2008,21(4):18-24.
- [77] 申永江,吕庆,尚岳全.桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(7):1033-1037.
- [78] 胡毅夫,乌青松.前后桩夹角对人字型微型抗滑桩内力影响研究[J].水文地质工程地质,2014,41(4):92-96.
- [79] 郑轩,朱文秀,周一君.双排桩支护结构变形规律模型试验研究[J].建筑结构,2018,48(S1):763-767.
- [80] SEO M,IM J C,KIM C,et al.Study on the applicability of a retaining wall using batter piles in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal,2016,53(8):1195-1212.
- [81] 王际凯,石钰锋,刘伟煌,等.基坑开挖下倾斜长短组合桩的受力变形特性[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(4):35-44.
- [82] 叶金铨,周先齐,王晨飞,等.基坑双排斜桩模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):398-404,519.
- [83] CHEN L T,POULOS H G,HULL T S.Model tests on pile groups subjected to lateral soil movement[J]. Soils and Foundations,1997,37(1):1-12.
- [84] 陈永战,魏汝龙.桩基码头岸坡与桩基相互作用的试验研究[J].水利水运科学研究,1993,15(3):257-266.
- [85] SABBAGH T T,Al-SALIH O,Al-ABBOODI I.Experimental investigation of batter pile groups behaviour subjected to lateral soil movement in sand[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2019,4(7):705-716.
- [86] 周德泉,黎冬志,冯晨曦,等.路堤重复加卸载下坡脚倾斜摩擦桩变位规律试验研究[J].中外公路,2019,39(1):1-8.
- [87] 周德泉,陈圣保,冯晨曦,等.竖向加卸载下邻近双端约束倾斜桩侧移规律试验研究[J].公路交通科技,2020,37(1):42-49.
- [88] 商卫东,聂庆科,白冰,等.深基坑开挖过程及空间效应影响的数值模拟[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):34-37.
- [89] 刘日成,徐帮树,张芹,等.深基坑双排桩结构支护效果有限差分数值模拟[J].地质与勘探,2012,48(2):366-373.
- [90] 黄晓程,张松波,邓昌福,等.前排倾斜桩参数对双排桩支护效果影响分析[J].施工技术,2020,49(1):29-32,37.
- [91] 余地华,田野,张涛,等.无支撑前斜后直倾斜双排桩支护监测与分析[J].施工技术,2021,50(1):57-61,75.
- [92] 谢潘想,余振锡,陈志敏.基于ABAQUS模拟排距对倾斜组合桩影响分析[J].四川建材,2022,48(7):51-52
- [93] 周应华.门架式双排桩受力位移特性分析[J].铁道工程学报,2009,26(6):30-33.
- [94] 张建勋,陈福全,简洪钰.被动桩中土拱效应问题的数值分析[J].岩土力学,2004,25(2):174-178,184.
- [95] CHEN C Y,HSU H Q. Modeling of batter pile behavior under lateral soil movement[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2017,216(Conference 1):012039.
- [96] POULOS H G.Raked piles-virtues and drawbacks[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6):795-803.
- [97] 方君华,庄宁,李军伟.洋山深水港区接岸结构稳定性三维数值分析[J].海洋工程,2011,29(3):82-87.
- [98] ZHOU D Q,FENG C X. Engineering characteristics and reinforcement program of inclined pre-stressed concrete pipe piles[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2019,23(9):3907-3923.
- [99] ZHOU D Q,FENG C X,LI L X. Reinforcement effect of inclined prestressed concrete pipe piles on an inclined soft foundation[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 5275903.
- [100] 郑刚,李欣,刘畅,等.考虑桩土相互作用的双排桩分析[J].建筑结构学报,2004,25(1):99-106.
- [101] 范秋雁,许胜才,崔峰.一类双排桩支护结构内力计算[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):3152-3158.
- [102] JELDES I A, DRUMM E C, BENNETT R M, et al. Piling framed concrete retaining wall: Design pressures and stability evaluation[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2015, 20(3): 04014041.
- [103] 郑刚,王玉萍,程雪松,等.倾斜桩支护结构的工作性能和基坑稳定性[J].厦门大学学报(自然科学版),2021,60(1):115-124.
- [104] MA L, YANG K, YUAN W, et al. Centrifuge modeling of the pile foundation reinforcement on slopes subjected to uneven settlement[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(5):2647-2658.
- [105] 胡铁权,张洪波.地面超载作用下双排桩结构计算分析[J].公路工程,2014,39(3):140-144.
- [106] 钱同辉,唐辉明.双排门式抗滑桩的空间计算模型[J].岩土力学,2009,30(4):1137-1141.
- [107] 申永江,孙红月,尚岳全,等.滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2668-2673.
- [108] 安孟康,郑静,孟进宝,等.“人”字形微型桩体系内力计算方法比较研究[J].铁道工程学报,2015,32(3):16-20.