

新旧组合排桩土拱效应及受力变形特性分析

安东辉^{1,2}, 杨航东^{1,2}, 胡双平^{1,2}, 黄勇敬³

(1. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室, 陕西 西安 710043;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;

3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 基坑开挖过程中, 新旧组合排桩的应用日益广泛, 其土拱效应及受力变形特征对基坑稳定性至关重要, 探究基坑开挖时新旧组合排桩的土拱效应及受力变形特征是保障基坑安全施工的前提。基于数值模拟方法构建新旧组合桩三维数值模型, 系统分析不同桩径、桩长新旧组合排桩的土拱效应特性, 并探究桩径、桩长对新旧组合排桩受力变形的影响规律。研究表明: 直径较大的旧桩承担主要土压力, 新桩桩长较长时, 承担主要弯矩; 当新旧桩长同时增大至 30 m 时, 最大水平位移降低 23.6%, 但旧桩的弯矩仅减小了 6.9%, 说明桩长对土拱效应影响较小, 桩径的变化对土拱效应影响较大; 新旧桩桩径增大时, 桩体体积增加, 但对土拱效应的改变相对较小, 所以单纯增加桩径对成本的性能比较差。基坑开挖施工过程中新旧桩桩长、桩径等因素对土拱效应及受力变形特征有着重要影响, 施工时应重点监测高应力旧桩和位移差区域的稳定性。

关键词: 基坑工程; 新旧组合排桩; 土拱效应; 数值模拟

中图分类号: TU94⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0098-08

Analysis of Soil Arch Effect and Force Deformation Characteristics of New and Old Combined Row Piles

AN Donghui^{1,2}, YANG Hangdong^{1,2}, HU Shuangping^{1,2}, HUANG Yongjing³

(1. Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710043, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: During foundation pit excavation, the combined use of old and new retaining piles is becoming more common. Their soil arching effect and mechanical behavior are critical to pit stability. This work aims to ensure safe construction, employs 3D numerical modeling to analyze the soil arching effect and deformation of combined piles with varying diameters and lengths. Results show that larger-diameter old piles bear more soil pressure, and longer new piles handle more bending moments. When both piles reach 30 m in length, the maximum horizontal displacement decreases by 23.6%, but the old pile's bending moment only drops by 6.9%, indicating that pile length has a relatively small impact on the soil arching effect compared to diameter changes. Also, increasing pile diameter enlarges the pile volume but barely affects the soil arching effect, making it cost-inefficient. Pile diameter and length significantly influence soil arching and mechanical behavior, the stability of high-stress old piles and displacement difference areas should be focused on during construction.

Keywords: foundation pit engineering; old and new combined row piles; soil arch effect; numerical simulation

城市化建设过程中出现大量深基坑工程,其围护结构的清除会不可避免地增加施工成本和延长工期,同时会对周边环境的安全造成影响^[1]。对既有桩进行再利用可以大幅减少建筑废弃物的产生,从而降低工程施工对环境造成的污染,考虑既有旧桩与新桩相互组合的相关研究受到越来越多的关注和应用^[2]。

基坑开挖时新旧组合排桩受力机制复杂,并且变形影响因素众多,为实现对既有围护结构的再利用,国内外学者进行了相关研究,研究手段主要可以分为理论计算、模型试验和数值模拟。在理论计算方面,申永江等^[3]推导了双排长短组合桩的前、后排桩滑坡推力的计算方法。Yang等^[4]基于成层地基一维固结理论建立了瞬时加载条件下悬浮刚-柔性长短桩复合地基的固结解析解。郭尤林等^[5]提出一种固体-散体串联组合桩,并建立了其鼓胀变形的计算模型。在试验研究方面,周德泉等^[6-7]通过一系列模型试验研究斜-直组合桩在加载条件下其工程特性受组合桩排距及倾斜度的影响规律,并分析其破坏模式。Xu等^[8]通过对不同长度的桩系统研究发现:基坑底部以上的挡土结构在工作性能满足设计要求的情况下,可以通过优化短桩的数量和长度来设计经济可靠的桩挡系统。Liu等^[9]研究长短桩复合地基的沉降变形特征及其影响因素,研究结果证明,长短桩复合地基能够有效地控制沉降。袁聪聪等^[10]通过常规室内砂土模型试验,结果显示倾斜长短桩能够在减小总桩长时,更有效地控制支护结构变形和桩身弯矩。此外,刘春峰等^[11]通过数值模拟,对传统“等长桩+支撑”形式优化方案的受力和变形规律进行了分析。王际凯等^[12]利用模型试验结合数值模拟的方法,研究开挖过程中倾斜长短桩在不同倾角和桩长组合下的变形受力特性。综上所述,国内外学者对新旧组合排桩的受力、变形规律已有一定研究,但对于旧桩位于基坑以上,在旧桩之间打入新桩,新旧桩不同刚度及长度组合排桩围护结构的基坑工程研究较少。

因此,本文采用数值模拟方法构建基坑工程数值模型,分析不同直径等长新旧组合排桩的土拱效应特性,并探究新旧桩桩长、桩径的不同配比对于组合排桩受力变形特性的影响,以期为进一步探究基坑开挖时新旧组合排桩的土拱效应及受力变形特征和保障基坑安全施工提供参考。

1 数值模型构建

1.1 土拱效应概念与机制

土拱效应是岩土工程中一种常见的力学现象。当土体发生变形或存在位移差异时,由于土颗粒之间的剪应力和摩擦作用,土体中的应力会重新分布,使得部分区域的土压力减小,而另一部分区域(通常是刚度较大的支撑结构附近)的土压力增大,形成类似“拱”的传力路径。在基坑围护结构如排桩中,当相邻桩体(或桩与墙)之间存在刚度差异(例如新旧桩直径不同)或位移差异(例如桩端约束条件不同导致变形不同)时,桩后土体趋向于向位移较大或刚度较小的区域移动。然而,土颗粒间的摩擦力和咬合力会阻止这种移动,导致土颗粒在相邻桩之间“架起”,将原本作用在位移较大/刚度较小区域上的部分土压力,转移到位移较小/刚度较大的桩体上(即“拱脚”),这种应力转移现象就是土拱效应^[13-16]。

如图1所示,在用疏排桩进行支护时,桩体间距较大,在桩后开挖后,相邻支护桩之间的土体处于临空状态,呈现出空隙状,土体在向坑内移动的过程中,土体与桩体之间会产生相对水平位移,从而激发土体抗剪能力,限制了土体从桩间滑出。桩基施工中,桩间土所引起的效应是水平方向上的土拱效应,也就是水平土拱,相邻的两个桩起到了拱脚的作用,直接土压力是由桩后土体直接作用产生的,而间接土压力则是由桩间土通过土拱传递而来的。对于利用既有护坡旧桩并在旧桩间打入不同直径的新桩构成不同直径新旧组合排桩围护结构来说,当旧桩直径比打入的新桩要大时,由于新旧刚度不同,其抵抗变形的能力不同,从而造成新旧桩体位移差。这往往意味着土拱效应的形成并重新分布,从而造成新桩和旧桩各自受到的土压力不同。如图2所示,对不同直径等长新旧组合排桩的桩后土压力分布进行预测,对I区土压力主要由新桩承担,II区为土拱作用区,III区为拱后滑移土体区,IV区为旧桩后土体区,II区和III区土压力通过土拱的作用而转移到旧桩上,IV区土体的土压力直接作用在旧桩上。

1.2 模型建立及参数选择

为了研究基坑工程中不同旧桩桩长下新旧桩的受力变形及桩后土体应力的情况,首先构建三维有限元模型模拟获取桩身位移与内力变化情况,为优化结构设计提供理论依据。数值模拟的本构模型采用小应变硬化(HSS)模型,该模型能够较为准确地

模拟土体的力学行为和变形特征, HSS 参数取值如 表 1 所示。

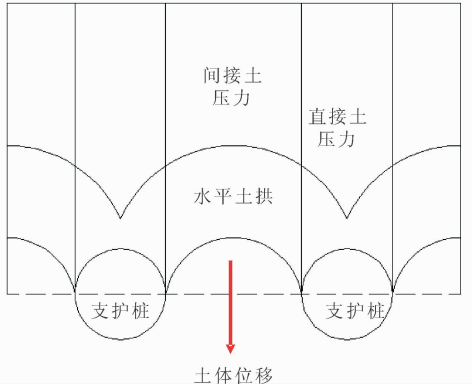


图 1 水平土拱效应示意图

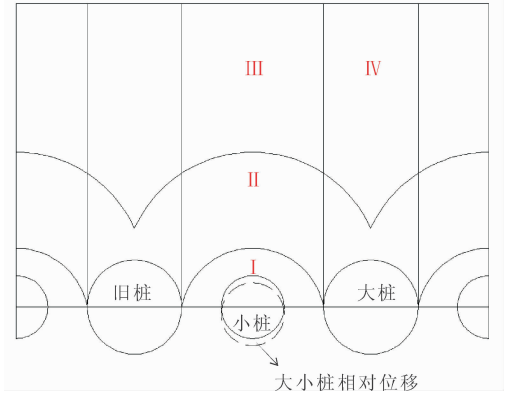


图 2 新旧组合排桩土压力分布预测

表 1 HSS 模型参数

名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$ / $\times 10^{-3}$
粉质黏土	20.3	33	18	9.3	9.3	27.9	120	0.32

注: E_{50}^{ref} 为标准排水三轴试验中的割线刚度, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为主固结仪加载中的切线刚度, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水剪切试验测定的加载卸载刚度, G_0^{ref} 为初始剪切模量, 取 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 27.9 \text{ MPa}$, E_{50}^{ref} 和 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 取值基本一致, 取 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 27.9 \text{ MPa}$, G_0^{ref} 为 $2.5 \sim 4.9 E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, 取 $G_0^{\text{ref}} = 120 \text{ MPa}$, $\gamma_{0.7} = 0.32 \times 10^{-3}$ 。土体的粘聚力 c 和摩擦角 φ 取自实际工程岩土勘察报告实测数据。

基坑开挖深度取 12 m, 开挖宽度取 22 m, 坑外土体宽度为 60 m, 土层厚度取 72 m, 围护结构采用梁单元, 取新旧桩长度相同均为 26 m。取旧桩桩径为 1.2 m, 新桩桩径为 0.8 m, 新旧桩间隔排列, 桩体中心间距为 1.5 m, 使用桩梁单元的弹性模量取为 $3 \times 10^4 \text{ MPa}$, 模型的尺寸如图 3 有限元模型图所示。

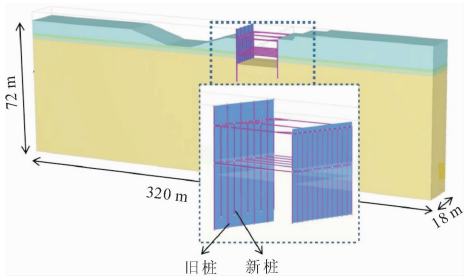


图 3 数值模拟计算模型

1.3 模型验证

为了进一步验证 HSS 模型的有效性, 根据实际的施工步骤(见表 2)进行模拟, 绘制坑外地表沉降曲线, 并且将 HSS 模型计算结果与 Hsieh 经验模型进行对比分析, 曲线具体如图 4 所示。其中, “Hsieh 经验模型” 通常指由 Hsieh and Ou^[17] 提出的, 基于大量现场实测数据总结的预测基坑开挖引起邻近地表沉降的经验方法(也称为“台北经验法”)。该模型采用双线性沉降槽形式来描述基坑外地表的沉降

分布, 其核心参数和计算方法如下:

表 2 基坑开挖步骤

施工步骤	
0	初始应力状态
1	重置位移为零
2	放坡 3 m
3	开挖 -4.5 m
4	激活全部围护桩和止水帷幕
5	激活第一道板支撑(-4 m)
6	坑内放坡
7	施加混凝土腰梁
8	开挖 -13 m
9	激活第二道板支撑(-11.6 m)
10	开挖 -16.8 m

① 最大沉降位置: 最大地表沉降点 δ_{vm} 通常位于距离围护结构(挡墙)约 $0.5H_e$ 的位置(H_e 为基坑最终开挖深度)。

② 最大沉降值估算: 最大沉降值 δ_{vm} 的估算较为复杂, 与基坑支护系统的刚度、土体性质、施工方法、支撑预加轴力等因素密切相关。在初步估算或定性分析中, δ_{vm} 常被表示为开挖深度 H_e 的一个百分比。

③ 在围护结构墙后 $0 \sim 0.5H_e$ 范围内: 地表沉降量从墙边的约 $0.50\delta_{\text{vm}}$ 线性增加到距离墙 $0.5H_e$ 处的 δ_{vm} 。 $0.5H_e \sim 2.0H_e$ 范围内: 地表沉降量从 δ_{vm} 线性减小到距离墙 $2.0H_e$ 处的接近零。在距离围护结构大于 $2.0H_e$ 的范围: 地表沉降可以忽略不计

(接近零)。

图 4 所示曲线即依据此双线性模式进行绘制的理想化沉降槽曲线(具体 δ_{vm} 值需根据项目情况估算或设定)。本研究中对比的目的是验证本文数值模型(HSS 模型)预测的沉降槽形状和主要影响范围是否符合这一被广泛认可的经验规律。

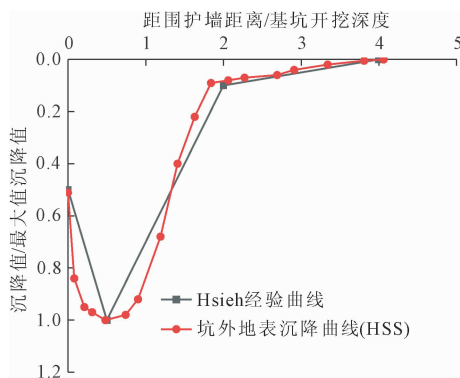


图 4 坑外地表沉降曲线与 Hsieh 经验曲线

由图 4 分析可知,坑外沉降槽最大沉降值发生在距离基坑一半开挖深度的位置处。而在围护结构墙边的土体则为最大沉降值的一半,同时沉降槽主要发生在距围护结构 $2H_0$ (H_0 为基坑开挖深度) 的范围内,而在距围护结构 $4H_0$ 的范围之外,地表沉降值明显减小,在 $4H_0$ 时几乎没有影响,故而围护结构对区域内地表沉降的影响具有明显的范围性,这与 Hsieh 的研究结论相似,表明 HSS 模型可以用于预测土体小应变变形引起的地表沉降。

2 土拱效应影响分析

2.1 土拱效应对桩身位移和弯矩的影响

土体变形会影响桩身位移和弯矩变化以及土拱效应的特性,从而影响桩身的承载能力和结构设计。因此,根据实际施工步骤进行数值模拟,绘制了旧桩桩径 $D=1.2\text{ m}$ 和新桩桩径 $D=0.8\text{ m}$ 时的桩身位移和弯矩变化图,如图 5 所示。

由图 5 可知,新旧桩桩身最大位移和弯矩均发生在基坑底部附近。① 从桩身水平位移分析可知,在基坑底部新旧桩的桩身位移变化趋势基本相同,并且数值变化也仅仅存在微小的差距,总体上直径 0.8 m 的新桩位移要比直径 1.2 m 的新桩位移要大。② 旧桩的弯矩明显要比新桩要大,即旧桩的最大弯矩约为新桩的 3.5 倍,故土压力主要由直径比较大的旧桩承担。

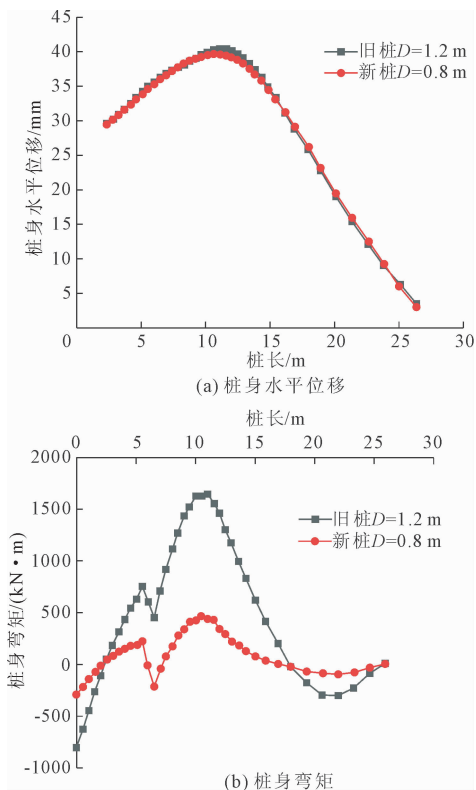


图 5 不同直径等长新旧组合排桩的桩身位移和弯矩

2.2 土拱效应对桩后土体应力的影响

提取新旧桩 -10 m 剖面桩后土体应力的数值,绘制土体压应力曲线如图 6 所示。

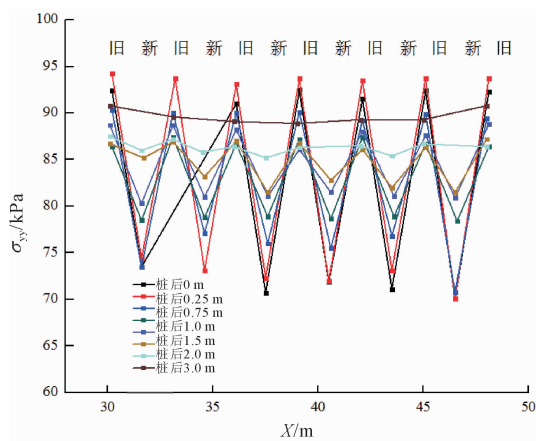


图 6 -10 m 剖面桩后土体应力图

根据图 6 可知,土体的应力呈现出明显的拱形状,两个相邻的旧桩为拱脚。直径较大的旧桩后土体的应力较大,而直径较小的新桩后土体的应力较小。在新桩的桩后部分,土体的应力明显小于周围土体,所以可以认为是松散区域。在这种情况下,大部分桩后土体的土压力通过土拱的作用传递到旧桩

上,因此旧桩承受了大部分的土压力。桩后土压力的数值差在桩后距离增加时逐渐减小,到达 2 m 处时几乎为零。在此工况下,如果新旧桩的拱高大约为 2 m,新桩后部分的土压力包括桩间部分土压力都通过土拱传递到了直径较大的旧桩上,形成了一个明显的应力拱。

为进一步揭示新旧桩沿深度方向桩后土体应力分布规律,绘制其变化曲线如图 7 所示。

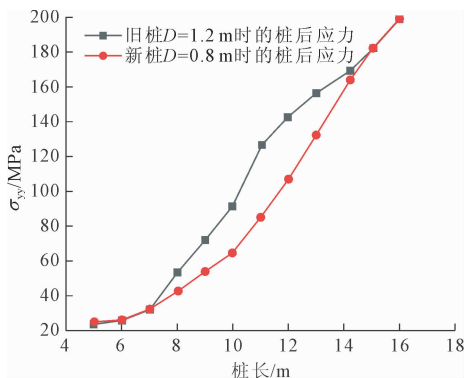


图 7 新旧桩沿深度方向桩后土体应力

图 7 表明,在埋深 7 m~15 m 范围内,直径大的旧桩的桩后 y 方向土压力比直径小的新桩的要大,新旧组合排桩最大位移差产生在基坑底部附近,因此桩后土压力差最大值也产生在基坑底部附近。新旧组合排桩的土拱效应也只在具有位移差范围内产生。综合分析,新旧桩直径分别为 0.8 m、1.2 m,直径大的旧桩抵抗变形的能力较直径小的新桩强,新旧桩之间就会产生位移差;直径小的新桩位移大,新桩桩后土体为松动区,旧桩桩后土体为挤压区,在桩后一定宽度范围和一定深度范围内形成不同强弱程度的土拱效应。

图 5、图 6 和图 7 清晰地展示了新旧组合排桩中显著的土拱效应现象(图 6 所示的应力拱)。桩径差异是影响土拱效应强度的关键因素:① 桩径差异越大,土拱效应越强:新旧桩刚度差异(主要源于直径差异)越大,相邻间位移差越明显(图 4(a)),导致桩后土体应力分布不均程度越显著(图 6,图 7)。直径较大的旧桩成为明显的“拱脚”,承担了主要的土压力(图 5(b)),其后形成高应力区;而直径较小的新桩后则形成低应力区(松动区)。② 位移差范围决定土拱效应范围:土拱效应主要发生在桩身存在显著位移差的深度范围内(图 7 中基坑底部附近位移差最大,土压力差也最大)。

3 新旧组合排桩受力变形分析

3.1 桩长的影响

(1) 新旧桩长相同

为探究桩长变化对支护结构的影响,取新旧桩桩径桩长一致,桩径为 1.2 m,取桩长 L 分别为 18 m、22 m、26 m、30 m 进行组合并计算分析,桩身位移和弯矩值随埋深变化规律绘制如图 8 所示。

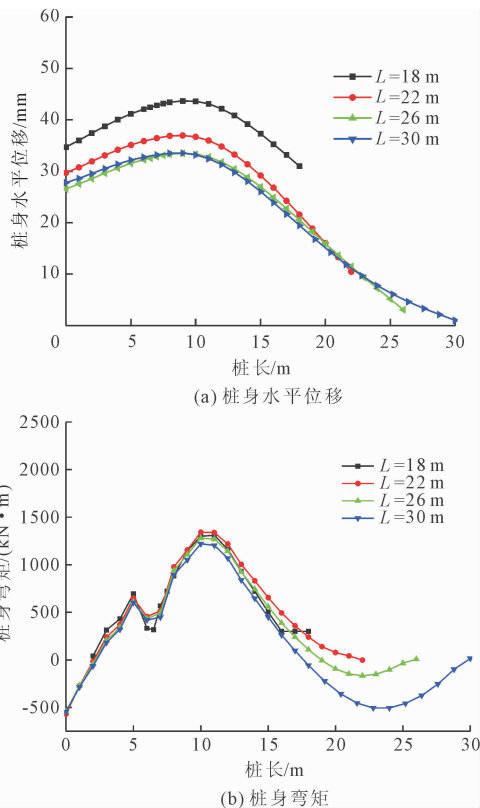


图 8 等直径等长排桩桩身位移和弯矩

由图 8 分析可知,新旧桩的不同桩长变化对于桩身水平位移与弯矩均有不同程度的影响。由图 8(a)可以发现,桩身的最大水平位移随着桩长的增加而减小,当桩长从 18 m 增加至 30 m 后,单桩体积增加了 66.7%,最大水平位移从 43.9 mm 降至 33.5 mm,减小了 23.6%。此外,在桩长从 26 m 增加到 30 m 的阶段中,桩身水平位移没有明显的变化,说明排桩的支护长度已达临界值,临界桩长在 26 m 左右。由图 8(b)可知,当桩长从 18 m 增加至 30 m 后,弯矩从 1 309 kN·m 降至 1 219 kN·m,仅减小了 6.9%。排桩上部的弯矩随桩长增加而减小,但减小值不大,这是因为桩体具有一定嵌固深度时,排桩承担土压力主要为上部。综上所述,当排桩的桩长小于临界桩长时,增加排桩的支护长度可以

较少桩体的位移,增强围护结构的稳定性。当排桩的桩长大于临界桩长时,增加桩长,桩体位移和弯矩变化不大。总体来看,当新旧桩径相同时,同时改变新旧桩的桩长对组合桩土拱效应影响程度较弱。

(2) 新桩桩长的影响

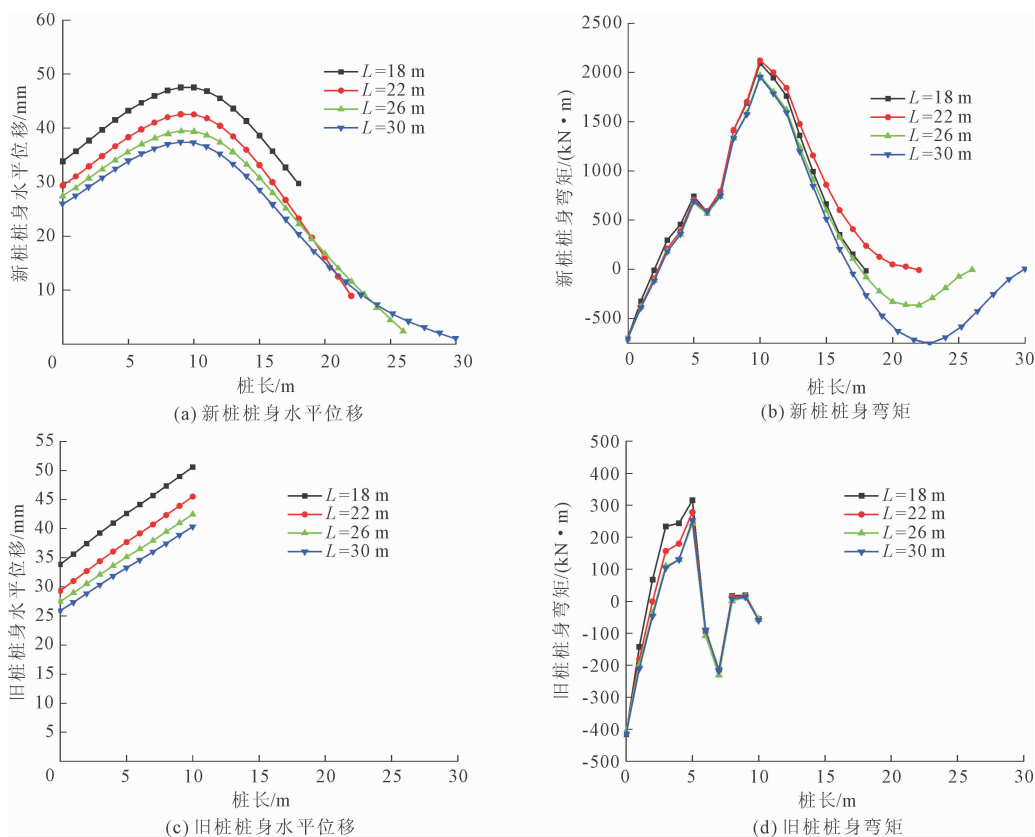


图9 等直径短排桩组合桩身位移和弯矩

由图9可知,当新旧桩直径均为1.2 m,旧桩桩长为10 m,新桩桩长从18 m增加到30 m时,旧桩桩身水平位移与弯矩均有不同程度的变化。由图9(a)、图9(c)可以看出,设置新桩分别为18 m、22 m、26 m、30 m时,新桩最大水平位移从47.5 mm减小到37.4 mm,减小了21.2%;旧桩最大水平位移从50.6 mm减小到40.3 mm,减小了21.2%。由图9(b)、图9(d)可以看出,新旧桩最大弯矩变化不明显。综上所述,短桩桩底在基底以上时,增加新桩桩长,旧短桩依然出现明显的踢脚变形,这时应该考虑增大新桩的直径或采取其他措施防止旧桩踢脚变形破坏。在基坑底部附近,桩底在基底以上的长度10 m的旧桩发生了踢脚变形,与新桩形成了明显的位移差。从整体受力情况来看,较长的新桩承担了主要的弯矩,最大弯矩约为旧短桩的7倍,可以认为桩底在基底之上的旧桩不作为受力构件,需要采取措施防止桩底在基底之上的旧桩发生踢脚破坏影响

整个围护结构的安全。

新旧桩直径统一为1.2 m,旧桩长度固定为10 m,旧桩桩底在基坑之上,旧桩间插入新桩,改变新桩桩长,取新桩桩长 L 分别为18 m、22 m、26 m、30 m进行组合计算分析,此时的桩身位移和弯矩计算结果如图9所示。

整个围护结构的安全。

3.2 新桩直径的影响

取新旧桩长度均为26 m,旧桩直径1.2 m,旧桩间插入新桩,取新桩桩径分别为0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m进行组合计算分析。获取不同直径等长桩组合桩身位移和弯矩数据如图10所示。

由图10可知,新桩直径的变化对于桩身水平位移与弯矩均有不同程度的影响。由图10(a)和图10(c)可以看出,新桩桩径从0.8 m依次增加到1.6 m,新桩最大水平位移从38.8 mm减小到32.4 mm,减小了16.5%,旧桩最大水平位移从37.8 mm减小到32.9 mm,减小了13.0%。此时,新桩单桩的体积从桩径0.8 m时的13.06 m³增加到桩径1.6 m时的52.25 m³,单桩体积即单桩的水泥用量增加了39.19 m³,增加了约3倍,从成本考虑单纯增加桩径性价比较差,成本较高。由图10(b)和图10(d)可以看出,新桩最大弯矩从461 kN·m增加到2 378

$\text{kN} \cdot \text{m}$, 旧桩最大弯矩从 $1\,613\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 减小到 $981\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 。综上分析可得, 改变新桩桩径对不同直径的等长新旧排桩桩后土拱效应的影响很大, 随着新桩桩径变大, 新桩承担的弯矩越来越大及承担的桩

后土压力越来越大, 当旧桩直径较小, 挡土能力较弱时, 选择相对较大直径的新桩, 可以减小旧桩所承受的土压力。

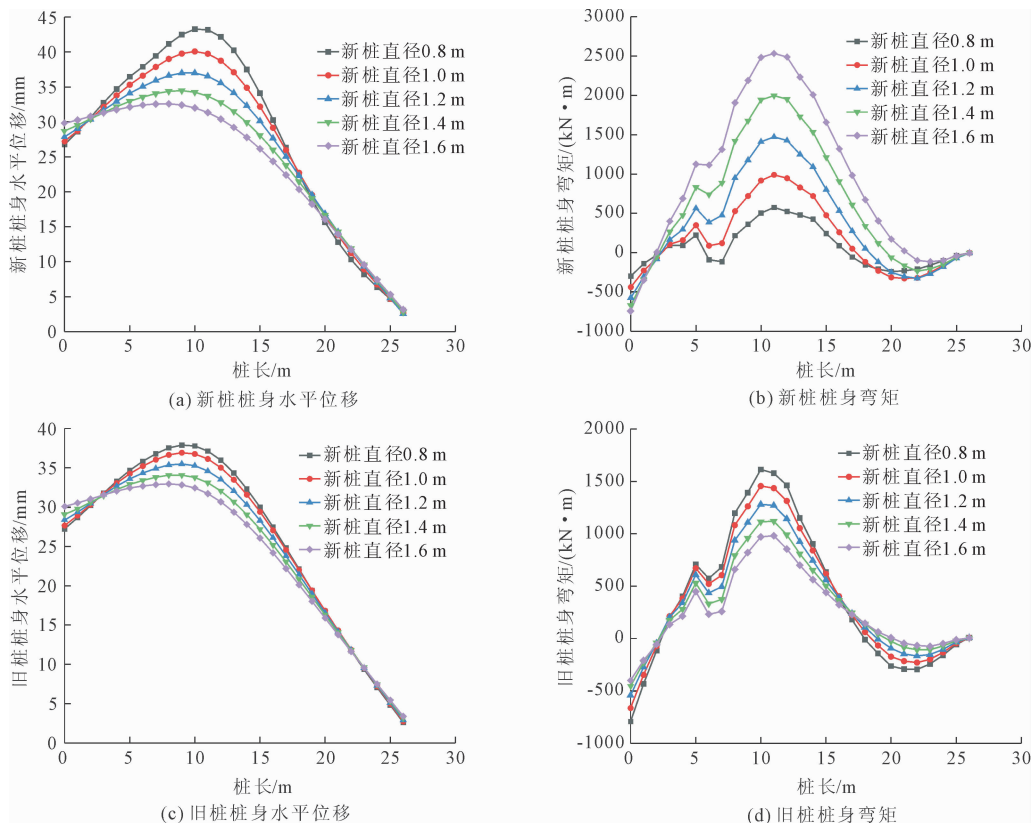


图 10 不同直径等长桩组合桩身位移和弯矩

新桩体积增量与位移增量变化曲线如图 11 所示, 根据图 11 可知, 新桩直径从 $0.8\ \text{m}$ 增加至 $2\ \text{m}$ 、新桩桩长从 $18\ \text{m}$ 增加至 $30\ \text{m}$ 时, 体积增量与位移增量之间的变化关系。随着新桩直径从 $0.8\ \text{m}$ 增加至 $2\ \text{m}$ 、新桩桩长从 $18\ \text{m}$ 增加至 $30\ \text{m}$ 时, 新桩位移变形随着体积的增加而减小, 此外, 根据两条曲线的斜率分析, 新桩桩长曲线的斜率更大, 即变形减小速度更快, 因此, 综上可以分析出, 在保证其他条件一致时, 新桩桩长的变化对于位移变形更加显著, 所以在实际工程中可以通过改变桩长来达到降低变形的目的。

图 10 和图 11 分析可知, 改变新桩直径会显著改变新旧桩之间的刚度比, 从而严重影响土拱效应强度与分担模式, 新桩直径增大, 土拱效应分担模式改变。① 随着新桩直径增大 ($0.8\ \text{m} \rightarrow 1.6\ \text{m}$), 新旧桩刚度差异减小, 新桩承担的弯矩急剧增加 ($461\ \text{kN} \cdot \text{m} \rightarrow 2\,378\ \text{kN} \cdot \text{m}$), 同时旧桩承担的弯矩显著减小 ($1\,613\ \text{kN} \cdot \text{m} \rightarrow 981\ \text{kN} \cdot \text{m}$)。这表明新桩直

径增大使其分担更多土压力, 削弱了旧桩作为单一“拱脚”的主导作用, 土拱效应模式从“旧桩主导”向“双桩协同”转变。② 成本性价比考量: 虽然增大新桩直径能减小位移: 新桩位移减小 16.5% , 旧桩位移减小 13.0% , 但单桩混凝土体积剧增 (约 3 倍), 成本增大。

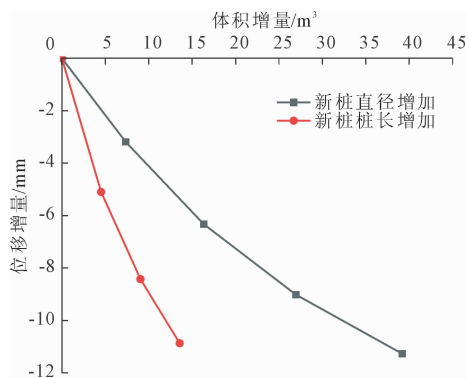


图 11 新桩体积增量与位移增量变化曲线

4 结 论

(1) 新旧组合排桩中,桩间显著的刚度差异(主要源于桩径差异)导致位移差,诱发强土拱效应。直径较大的旧桩作为主要“拱脚”,承担了大部分土压力和更大的弯矩(可达新桩3.5倍),其桩后形成高应力区;小直径新桩位移相对较大,其后形成低应力松动区。土拱效应改变了桩后土压力原始分布,显著影响桩身内力和变形。应重点监测高应力旧桩和位移差区域的稳定性。

(2) 桩长变化对土拱效应强度影响较弱。等比例增加新旧桩桩长(18 m→30 m)可使最大水平位移显著降低23.6%,但对桩身最大弯矩影响甚微(仅减小6.9%)。当新桩桩长增加而旧桩为短桩(桩底在基底之上)时,长新桩承担主要弯矩(约为短旧桩7倍),短旧桩易发生踢脚变形,需特别加固或采取其他措施防止其破坏影响整体稳定。临界桩长(约26 m)对优化设计有参考价值。

(3) 新桩直径变化显著影响土拱效应分担模式。增大新桩直径可减小位移(新桩减16.5%,旧桩减13.0%),但会强烈改变土压力分担:新桩弯矩急剧增加,旧桩弯矩明显减小,土拱效应模式由“旧桩主导”向“双桩协同”转变。然而,直径增大导致单桩混凝土体积剧增(约3倍),单纯增加桩径的性价比差。此外,增加桩长在减小位移方面(单位体积增量对应的位移减小量)比增大桩径更有效。因此,在刚度差异允许的范围内,调整桩长是更经济的控制变形手段。新桩直径的选择需综合考虑对土拱分担模式、变形控制及成本的影响。

参考文献:

[1] Li Mingguang, Wang Jianhua, Chen Jinjian, et al. Responses of a newly built metro line connected to deep excavations in soft clay [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017,31(6):04017096.

[2] 李镜培,张凌翔,肖建庄,等.黏土地基中新旧混合群桩承载和变形的非线性分析方法[J].*建筑结构学报*,2019,40(12):113-118.

[3] 申永江,杨明,项正良,等.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.

[4] 杨涛,吉映竹,杨欢.悬浮刚-柔性长短桩复合地基固结解析解[J].*建筑结构学报*,2020,41(11):176-183.

[5] 郭尤林,赵明华,彭文哲.基于改进应变楔模型的固体-散体串联组合桩鼓胀变形及沉降分析[J].*岩土工程学报*,2019,41(11):2149-2155.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Xu Changjie, Ding Haibin, Luo Wenjun, et al. Experimental and numerical study on performance of long-short combined retaining piles [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020,20(3):255-265.

[9] Liu Wei, Yang Xiaohua, Zhang Shasha, et al. Analysis of deformation characteristics of long-short pile composite foundation in salt lake area, iran [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019:5976540.

[10] 袁聪聪,袁宗义,詹刚毅,等.砂土地层悬臂倾斜长短桩支护性能模型试验研究[J].*隧道建设(中英文)*,2022,42(4):664-671.

[11] 刘春峰,朱怀龙,胡文韬.坑中坑围护结构优化分析[J].*矿冶工程*,2022,42(6):40-45,49.

[12] 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.

[13] Liu Zizhen, Yan Zhixin, Wang Xiaogang, et al. Effect of the inclined pile-soil arch in a soil landslide reinforced with anti-sliding piles [J]. *Natural Hazards*, 2021,106:2227-2249.

[14] Zhang Sifeng, Li Chao, Qi Hui, et al. Soil arch evolution characteristics and parametric analysis of slope anchored anti-slide pile [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021,25(11):4121-4132.

[15] 刘鹏,马迎春,胡正涛,等.基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力分析[J].*水利与建筑工程学报*,2022,20(5):102-108.

[16] 陈龙,刘成禹,林雪彬,等.考虑桩后及桩侧土拱间相互作用的合理桩间距[J].*水利与建筑工程学报*,2018,16(6):12-17,31.

[17] Hsieh P G, Ou C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998,35(6):1004-1017.