

DOI: 10.7672/sgjs2026130055

深大基坑多排桩支护结构数值分析与工程实践*

周世宗¹, 黄泽航², 周书东¹, 何春保², 张益¹, 郭凌峰³

(1. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东 东莞 523809; 2. 华南农业大学水利与土木学院, 广东 广州 510150;
3. 华南理工大学海洋科学与工程学院, 广东 广州 510150)

[摘要] 以东莞市某深大基坑工程为依托, 采用数值模拟方法研究多排桩支护结构变形规律, 分析多排桩结构形式及排距对位移控制的影响, 并通过实测数据进行验证。结果表明, 阶梯型多排桩具有良好的抗侧移能力, 桩身变形呈“上大下小”的分布特征, 桩顶附近位移最大。非阶梯型多排桩各排桩位移均较大, 同种工况下非阶梯型多排桩桩身最大水平位移为 38.57mm, 阶梯型为 13.68mm, 非阶梯型比阶梯型增大约 64%。桩身最大水平位移随排距增加而逐渐减小, 但位移减小的幅度随着排距的增大而减弱。数值模拟结果与实测数据基本一致, 证明数值模拟方法能有效预测多排桩支护结构的变形规律。

[关键词] 基坑; 支护; 多排桩; 排距; 位移; 数值模拟; 监测

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0055-07

Numerical Analysis and Engineering Practice of Multi-row Pile Retaining Structures for Deep and Large Foundation Excavation

ZHOU Shizong¹, HUANG Zehang², ZHOU Shudong¹, HE Chunbao²,
ZHANG Yi¹, GUO Lingfeng³

(1. Dongguan Institute of Building Research Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523809, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510150, China;
3. School of Marine Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510150, China)

Abstract: Based on a deep and large foundation excavation project in Dongguan City, this paper employed numerical simulation methods to investigate the deformation patterns of multi-row pile retaining structures. It analyzed the effects of structural configurations and row spacing on displacement control and validated the findings using field measurement data. The results indicate that stepped multi-row piles exhibit excellent lateral displacement resistance, with pile body deformation showing a distribution pattern of “greater at the top and smaller at the bottom,” and the largest displacement occurring near the pile cap. In non-stepped multi-row pile systems, displacements in each row were relatively large. Under identical loading conditions, the maximum horizontal displacement of the pile shaft in the non-stepped system was 38.57mm, compared to 13.68mm in the stepped system, representing an approximately 64% increase in the non-stepped system. The maximum horizontal displacement of the pile body gradually decreases with increasing row spacing, but the rate of decrease slows as the row spacing increases. The numerical simulation results are generally consistent with the measured data, demonstrating that the numerical simulation method can effectively predict the deformation patterns of multi-row pile retaining structures.

Keywords: foundation excavation; supports; multi-row piles; row spacing; displacement; simulation; monitoring

* 国家自然科学基金(12302502)

[作者简介] 周世宗, 高级工程师, 国家一级注册建造师, E-mail:

1435520237@qq.com

[收稿日期] 2025-12-04

0 引言

随着中国城市化快速发展, 城市地下空间开发不断向深层、复杂环境推进^[1], 基坑工程面临着地

下管线复杂、场地空间受限等多重挑战。支护结构作为基坑工程的核心组成部分,其受力合理性与变形控制能力直接决定工程安全。多排桩支护体系因具备空间刚度大、水平抗侧移能力强等优势,在深大基坑、软土地区基坑中得到广泛应用。

Martin 等^[2]采用数值模拟分析得出双排桩在抗滑过程中能够显著控制变形并优化内力分布,表明采用该结构是一种高效的位移控制措施。刘根华等^[3]通过三维有限元分析方法,模拟局部双排桩支护基坑开挖工况,分析结果表明双排桩的设计方案能有效保证基坑的安全性和稳定性。欧孝夺等^[4]、董妍^[5]采用有限元数值模拟结合实测的方法,探讨了双排桩关键设计参数的影响。

部分学者对“h”阶梯型双排桩进行研究,揭示了其变化特征与剪力受力特点,季璇等^[6]、杨卓等^[7]采用有限元软件 MIDAS GTS NX 模型结合工程实例,模拟“h”阶梯型双排桩支护过程,分析了双排桩受力情况,并证明在控制水平位移方面“h”阶梯型双排桩优于单排桩锚支护。李发雄^[8]分析了“h”型桩基坑支护结构的受力变形特征,用极限分析上限法推导基坑的安全系数计算公式,结合实际工程,表明阶梯型桩具有较好的支护效果。黄致兴等^[9]介绍了“h”阶梯型双排桩在工程实践中的成功应用,提出此类支护结构能更好满足支护结构安全的要求。

李东海等^[10]采用三排桩进行支护,通过桩体的变形监测与数值模拟,总结多排桩围护结构的变形规律和影响因素。张欢等^[11]提出三排桩的受力计算公式,并利用有限元软件 ABAQUS 对三排桩的多种因素进行数值模拟,获取其变化规律。结果表明,三排桩结构的刚度和承载力比双排桩更大,并且三排桩结构更加稳定。印长俊等^[12]通过建立杆系有限元模型,分析不同排距与桩径下三排桩的内力与变形规律。

目前对深基坑双排桩支护结构的研究成果较为丰富,但对于多排桩研究成果则相对匮乏。本文以东莞市某深大基坑多排桩支护工程为例,通过建立三维有限元模型,研究多排桩支护结构变形规律并分析多排桩结构形式及排距对支护结构变形的影响,为其他类似多排桩支护工程的设计与计算提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

本项目深基坑位于东莞市南城国际商务区核心位置,如图 1 所示。基坑面积约 72 350m²,基坑周

长为 1 290m,基坑开挖深度 15.0~29.23m,采用明挖法施工。基坑安全等级为一级,设计使用年限为 2 年。基坑东北侧紧邻西平西城际车站及其区间隧道,为减小基坑开挖过程对城际车站及隧道结构的不利影响,该区段采用阶梯型 4 排桩+桩间连接板支护方案。

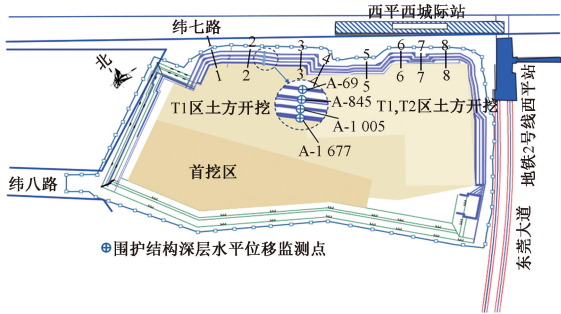


图 1 基坑平面及监测点布置

Fig. 1 Plan view of the foundation excavation and monitoring points layout

本文选取 2—2 剖面作为研究对象,该剖面开挖深度为 15.8m。其支护结构如图 2 所示,第 2,3,4 排桩均采用 $\phi 1\ 000@1\ 200$ 钻孔灌注桩,桩长分别为 21.8、13.8、9.5m;第 1 排桩采用 $\phi 1\ 200@1\ 600$ 荤桩+ $\phi 1\ 000@1\ 600$ 素桩咬合桩,实桩长约 33.7m,按最小桩长 22m 与进入中风化岩最小 1m 双控;各排桩排距均为 5 000mm。冠梁尺寸均为 1 000mm $\times$ 800mm,腰梁尺寸均为 1 000mm $\times$ 1 200mm,连系梁尺寸均为 800mm $\times$ 800mm $@6\ 000$ mm。

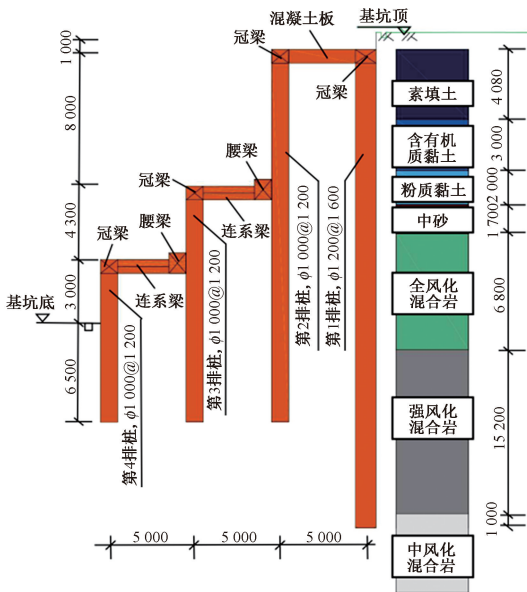


图 2 2—2 支护剖面

Fig. 2 Cross-section of the retaining structure at section 2—2

1.2 工程地质条件

根据地质勘察报告,基坑开挖范围内土体自上而下主要为素填土、含有机质黏土、粉质黏土和中砂,下伏基岩为震旦系混合岩,风化程度分为全风化、强风化、中风化 3 个风化层。全风化混合岩呈褐红色,含有石英及黏性土,为极软岩,岩体极破碎;强风化混合岩呈褐黄色,属软岩,岩体极破碎;中风化混合岩呈浅青灰色,岩体较破碎,节理裂隙发育。土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil					
地层	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	泊松比	压缩模量/ MPa
①素填土	19.0	12	10	0.32	4
②含有机质黏土	17.5	10	8	0.42	3
③粉质黏土	18.5	15	15	0.30	5
④中砂	20.5	—	32	0.26	—
⑤全风化混合岩	20.0	25	30	0.25	14
⑥强风化混合岩	21.0	20	33	0.23	18
⑦中风化混合岩	25.0	—	40	0.27	—

2 数值模拟

2.1 模型建立及计算参数

采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立三维模型,确定模型范围时,为了降低边界效应的影响,模型边界区域与基坑距离至少为 3 倍基坑深度。本模型尺寸为 97.2m×43.2m×50m(长×宽×高)。为兼顾计算精度和效率,将有限元土体及结构网格尺寸均设为 1m。整体支护结构有限元计算模型如图 3 所示。

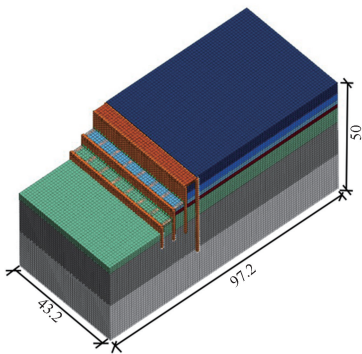


图 3 三维有限元模型(单位:m)

Fig.3 Three-dimensional finite element model (unit: m)

模型中岩土体的本构模型采用修正莫尔-库伦模型。排桩间连系板采用板单元模拟,排桩采用植入梁单元模拟,冠梁、腰梁及桩间连系梁均采用梁单元模拟,以上支护结构均采用各向同性的线弹性本构模型,相关模型结构材料参数如表 2 所示。

表 2 模型结构材料参数

Table 2 Material parameters of the structural model			
名称	弹性模量/ MPa	重度/ (kN·m ⁻³)	泊松比
冠梁	3.25×10 ⁴	24	0.2
腰梁	3.00×10 ⁴	25	0.2
连系梁	3.00×10 ⁴	25	0.2
连系板	3.00×10 ⁴	25	0.2
桩体	3.25×10 ⁴	24	0.2

2.2 模拟工况

如表 3 所示,为研究阶梯型多排桩结构变形规律,本文数值模拟将采用分步开挖、分步施作支护的方式将基坑施工分为以下 5 个阶段进行模拟。Stage0 为初始阶段,未进行开挖,对初始应力场进行平衡后激活桩体;Stage1 模拟基坑自地表开挖 1.0m,并激活第 1、2 道冠梁以及之间的连系板;Stage2 模拟基坑开挖至 5m;Stage3 模拟基坑继续开挖至 8.5m,期间激活第 1 道腰梁、第 2 道冠梁及第 1 排连系梁;Stage4 模拟基坑开挖至 12.8m,激活第 2 道腰梁、第 4 道冠梁及第 2 排连系梁;Stage5 模拟基坑开挖至坑底,坑底深度为 15.8m。为研究多排桩排距对支护结构位移控制效果的影响,模拟同种工况下(Stage5)阶梯型多排桩不同排距(1,3,5,7m)的位移。为研究多排桩结构形式对支护结构位移控制的效果,模拟同种工况下(Stage5 工况)阶梯型多排桩与非阶梯性多排桩的位移。

表 3 多排桩模拟施工工况

Table 3 Simulated construction stages for the multi-row pile system			
桩型	工况	基坑深度/m	支护布置情况
阶梯型	Stage0	0	桩体
	Stage1	1.0	第 1、2 道冠梁;连系板
	Stage2	5.0	—
	Stage3	8.5	第 1 道腰梁;第 3 道冠梁; 第 1 排连系梁
	Stage4	12.8	第 2 道腰梁;第 4 道冠梁; 第 3 排连系梁
	Stage5	15.8	不同排距 1、3、5、7m
非阶梯型	Stage0	0	桩体
	Stage1	1.0	第 1~4 道冠梁;连系梁
	Stage5	15.8	—

3 计算结果分析

3.1 阶梯型多排桩结构变形规律分析

如图 4 所示,根据数值模拟结果,随着基坑深度逐渐增大,多排桩结构及周围土体的水平位移也逐渐增大,且变形范围不断扩展。位移最大区域出现于第 1、2 排桩中上部靠近桩顶位置,第 3、4 排桩位

移较小。在最终开挖工况下(Stage5)第1~4排桩最大位移分别为13.19、13.68、8.75、7.02mm,均小于30mm,符合GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》一级基坑位移控制要求规定,这表明该支护形式能有效控制基坑位移,适用于周边环境复杂、对基坑变形控制要求严格的工程。

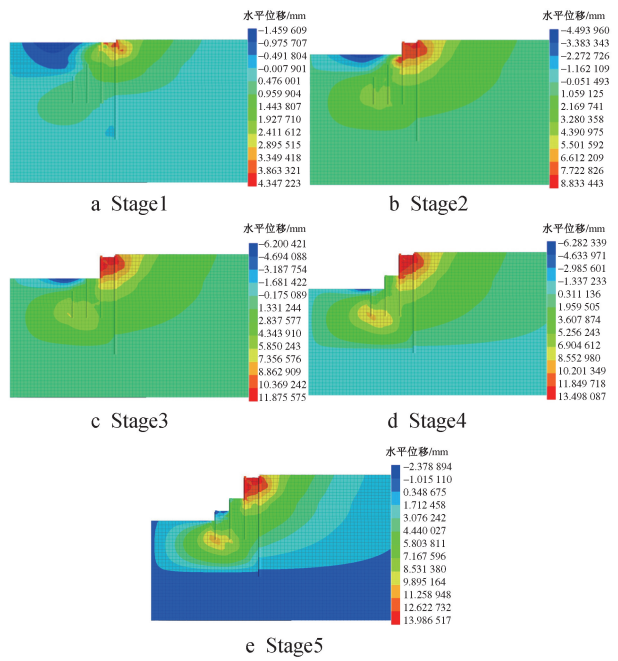


图 4 整体水平位移云图

Fig. 4 Cloud map of overall lateral displacement

第1排桩最大水平位移与第2排桩接近,并且其桩长最长以及在整个基坑开挖过程中暴露时间最长,选择其作为分析对象。各开挖工况第1排桩水平位移如图5所示。根据表3和图5,各分步开挖深度为1,4,4.5,4.3,3m,对应第1排桩桩顶水平位移依次为3.74、8.15、11.11、12.69、13.19mm,最大位移增量分别为4.41、2.96、1.58、0.50mm。第3级支护(Stage2和Stage3)桩顶水平位移增速最大,第3级支护和第4级支护(Stage4和Stage5)桩顶水平位移增速越来越小。第2级支护实际为双排桩支护,第3级支护和第4级支护实际为3排桩支护和4排桩支护,第3级和第4级桩相对于第2级桩起到“墩”的作用,后续开挖过程中第3,4排桩对第1,2排桩的位移增长起到限制作用。这表明在较大开挖深度下,阶梯型多排桩结构具有良好的抗侧移能力,通过多排桩的协同作用,结构能有效分散侧向土压力,减少整体位移。

由图5可知,在各开挖工况下,第1排桩桩身变形曲线逐渐呈“勺”形,桩身中上部水平位移随开挖深度的增加而快速增长,桩身中下部位移变化趋势

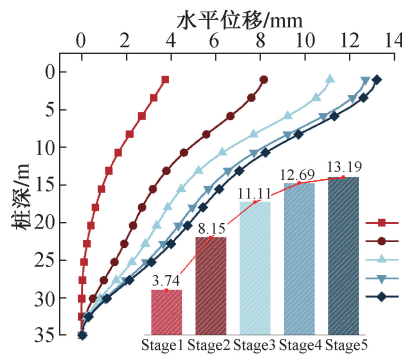


图 5 各开挖工况第 1 排桩水平位移

Fig. 5 Lateral displacement of the first-row piles under different excavation stages

较平缓,桩身变形呈“上大下小”的分布特征,并且开挖深度越大,该特征越明显。多排桩支护结构变形监测宜重点关注桩身中上部位移。

3.2 多排桩结构形式对比分析

为比较阶梯型多排桩与非阶梯型多排桩对基坑位移控制的效果,采用数值模拟方法对2种多排桩结构形式在最终开挖阶段工况(Stage5)下桩身水平位移进行对比分析。非阶梯型多排桩结构剖面如图6所示,其中第1排桩桩长与阶梯型第1排桩相同,第2~4排桩桩长与阶梯型第2排桩相同,各排桩桩间距与阶梯型相同。

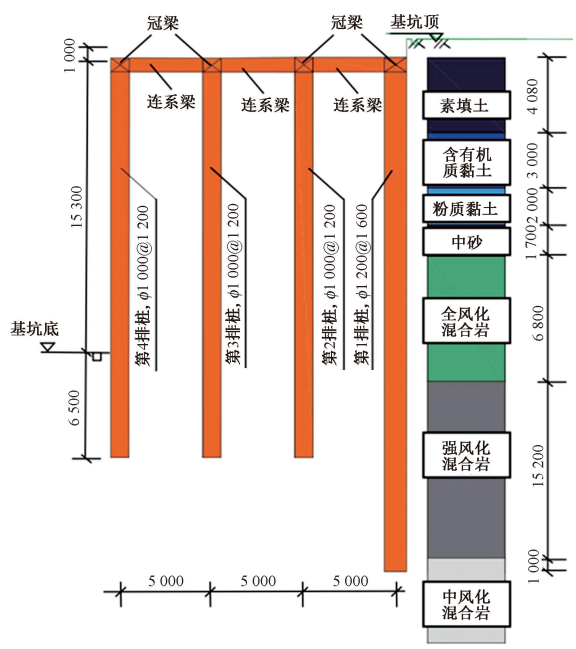


图 6 非阶梯型多排桩结构剖面

Fig. 6 Structural cross-section of the stepped multi-row pile system

如图7所示,非阶梯型多排桩基坑的侧向变形主要集中于各排桩中上部,位移带沿桩顶方向呈弧

形扩展,整体变形较大。非阶梯型多排桩各排桩的位移均较大并且差异较小,第1~4排桩最大位移分别为38.57,37.52,36.60,36.88mm。而根据图4e,阶梯型多排桩的基坑侧向位移较为分散,整体变形较小。原因是非阶梯型多排桩各排桩侧向土压力均较大,导致各排桩位移较大,而阶梯型多排桩的结构布置方式可有效卸去侧向土压力,减缓了第3,4排桩的受力集中,使第3,4排桩位移较小。

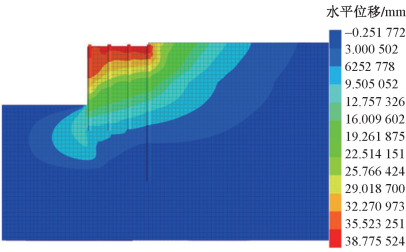


图7 非阶梯型多排桩整体水平位移云图

Fig. 7 Overall lateral displacement cloud map of the non-stepped multi-row pile system

如图8所示,阶梯型多排桩的第1,2排桩水平位移沿桩身变化幅度不大,而非阶梯多排桩第1,2排桩水平位移随着桩深减小出现大幅度增长。非阶梯型多排桩桩身最大水平位移为38.57mm,阶梯型多排桩为13.68mm,非阶梯型多排桩比阶梯型最大水平位移增大约64%。以上分析表明阶梯型多排桩在变形控制方面比非阶梯型多排桩具有明显优势。

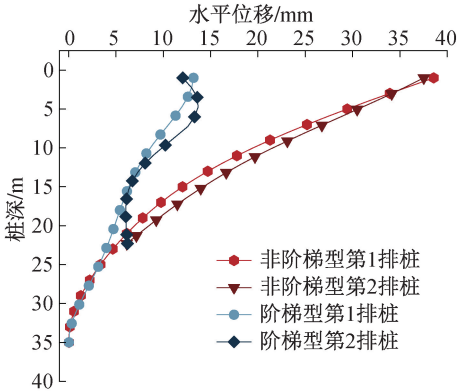


图8 第1,2排桩水平位移

Fig. 8 Lateral displacement curves of the first and second rows of piles

3.3 阶梯型多排桩排距对比分析

4种阶梯型多排桩排距工况在基坑开挖完成时的水平位移云图如图9所示。阶梯型多排桩在不同排距工况下,位移场分布大体一致,最大水平位移均出现在第1,2排桩顶附近。排距由1m逐渐增大至7m时,高位移区的面积整体呈减小趋势,说明排

距增大能有效控制变形影响范围,适当增大多排桩排距有利于减小多排桩的整体位移。

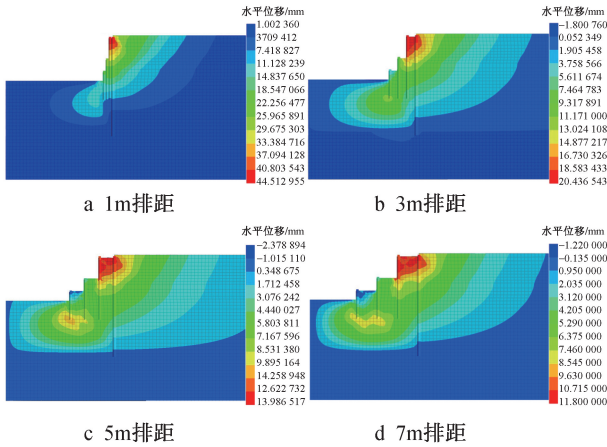


图9 不同排距工况下整体水平位移云图

Fig. 9 Overall lateral displacement cloud map under different pile spacing conditions

如图10所示,选取第1排桩为研究对象,1m排距工况桩身最大位移为44.04mm;当排距增大至3m时,桩身最大位移为19.75mm,相比于1m排距工况减少24.29mm,减幅约55.15%;当排距增大到5m时,桩身最大位移为13.19mm,相比于3m排距工况减少6.56mm,减幅约33.21%;当排距增大到7m时,桩身最大位移为11.15mm,相比于5m排距工况减少2.04mm,减幅约15.46%。

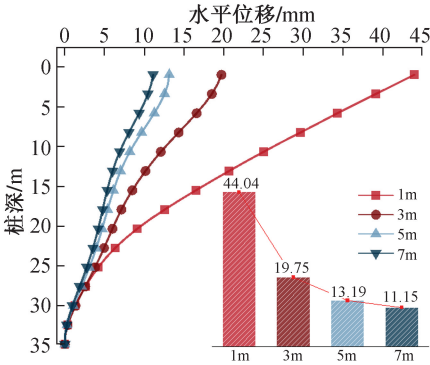


图10 不同排距下水水平位移曲线

Fig. 10 Lateral displacement curves of rear pile under different pile spacing conditions

以上分析表明,阶梯型多排桩排距对桩身水平位移影响显著。随着排距的增大,多排桩水平位移逐渐减小,原因是多排桩与周围土体共同作用的有效范围扩大,从而提升支护结构的整体刚度,减少水平位移。但其位移减小效果同步递减,无限度增加排距对位移控制作用有限。本工程设计综合考虑基坑及周边环境变形控制要求及施工空间条件等因素,选取5m作为阶梯型多排桩排距是合理的。

4 工程应用及监测数据分析

本项目邻近城际轨道侧采用阶梯型 4 排桩支护结构,现场施工应用如图 11 所示。根据现场监测数据,基坑开挖至坑底后,支护桩最大水平位移为 18.13mm,周边建筑物沉降最大值为 5.32mm,城际轨道隧道结构沉降最大值为 3.25mm,均远小于设计允许值,证明该支护结构能充分保证基坑及周边环境的安全,并且相对于采用内支撑等支护形式,该支护结构能为后续主体结构施工提供更大的施工空间,有效加快施工进度。



图 11 阶梯型 4 排桩现场

Fig. 11 Site construction of step-type four-row pile

为及时获取开挖过程中围护结构变形情况,对桩体深层水平位移进行监测。2—2 支护剖面桩身共布置 4 个深层水平位移监测点,具体支护桩编号为 A-69,A-845,A-1005,A-1677。选取最终开挖阶段(Stage5)桩身位移监测数据进行分析。如图 12 所示,第 1 排桩(A-69)监测的桩身最大水平位移为 15.29mm,模拟值桩身最大水平位移为 13.19mm;如图 13 所示,第 2 排桩(A-845)监测的桩身最大水平位移为 18.13mm,模拟值桩身最大水平位移为 13.68mm;如图 14 所示,第 3 排桩(A-1005)监测的桩身最大水平位移为 3.62mm,数值模拟桩身最大水平位移为 3.60mm;如图 15 所示,第 4 排桩(A-1667)监测的桩身最大水平位移为 3.81mm,数值模拟桩身最大水平位移为 3.62mm。数值模拟计算结果与监测值接近,并且各排桩水平位移沿桩身的发展趋势均基本一致,证明了数值模型的准确性较好。

5 结语

本文以东莞市某阶梯型多排桩支护深大基坑为工程背景,选取典型支护剖面建立三维有限元模型,分析多排桩结构变形规律以及排桩结构形式和排距对变形控制效果的影响。同时,把数值模拟结果与现场监测数据进行对比,得到主要结论如下。

1) 阶梯型多排桩在较大开挖深度下具有良好的抗侧移能力,位移最大区域集中于第 1,2 排桩桩顶附近。桩身水平位移沿深度呈“上大下小”的分

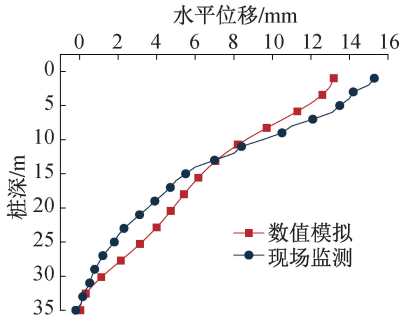


图 12 第 1 排桩水平位移曲线

Fig. 12 Lateral displacement curve of the first row of piles

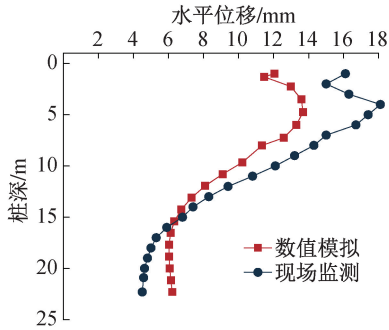


图 13 第 2 排桩水平位移曲线

Fig. 13 Lateral displacement curve of the second row of piles

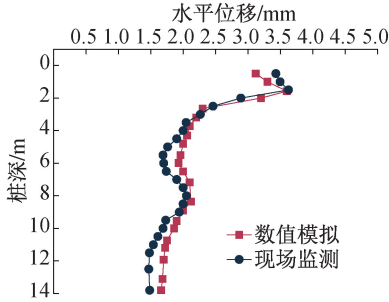


图 14 第 3 排桩水平位移曲线

Fig. 14 Lateral displacement curve of the third row of piles

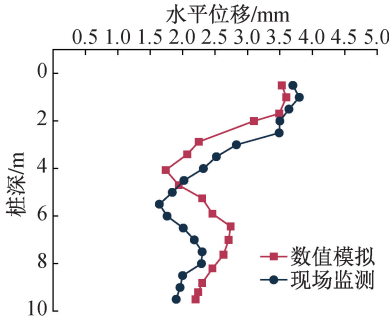


图 15 第 4 排桩水平位移曲线

Fig. 15 Lateral displacement curve of the forth row of piles

布特征,开挖深度越深该特征越明显。基坑监测应重点关注桩身中上部位移。

2) 相对于阶梯型多排桩,非阶梯型多排桩各排

桩位移均较大。非阶梯型多排桩支护结构桩身最大水平位移为 38.57mm,阶梯型多排桩最大水平位移为 13.68mm,前者比后者增大约 64%。阶梯型多排桩在变形控制方面比非阶梯型多排桩有明显优势。

3) 不同排距工况下,阶梯型多排桩桩身水平位移差异较大。排距由 1m 增大至 7m 时,桩身最大水平位移逐渐减小,但位移减小的效果逐渐递减。多排桩排距选择应综合考虑位移控制要求及施工空间条件。

4) 阶梯型多排桩桩身水平位移模拟计算结果与监测结果趋势基本一致,验证了数值模拟结果的可靠性。

5) 本文深基坑采用四排桩结构形式,而此类多排桩缺乏完善的理论分析和设计计算方法。本研究结合数值模拟及工程实践,为类似深基坑多排桩支护工程的理论分析及设计提供参考。

参考文献:

[1] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):123-127.
FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation[J]. Construction technology,2025,54(9):123-127.

[2] MARTIN G R,CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement [J]. Computers & structures, 2005, 83 (8/9): 588-598.

[3] 刘根华,郑伟锋,邓高. 某深基坑地下连续墙+双排桩复合支护形式的施工过程仿真分析[J]. 建筑技术开发,2012,39(7):29-31.
LIU G H, ZHENG W F, DENG G. Simulation analysis of construction process of composite support form of diaphragm wall and double-row piles in a deep foundation pit [J]. Building technique development,2012,39(7):29-31.

[4] 欧孝夺,谭智杰,罗方正,等. 设计参数对深基坑双排桩支护结构影响的数值分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(7):2873-2878.
OU X D, TAN Z J, LUO F Z, et al. Numerical analysis of influence of design parameters on the double-row pile support structure of deep foundation pit [J]. Science technology and engineering,2021,21(7):2873-2878.

[5] 董妍. 软土深基坑双排桩支护结构的变形性状分析[J]. 建筑结构,2017,47(23):86-91.

DONG Y. Analysis of deformation behavior of double-row piles supporting structure in soft-soil deep foundation pit[J]. Building structure,2017,47(23):86-91.

[6] 季璇,高全臣,杨卓,等. H 型双排桩支护结构三维数值模拟分析与工程应用[J]. 施工技术,2016,45(7):70-73.
JI X, GAO Q C, YANG Z, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis and application for support structure of H-double piles[J]. Construction technology,2016,45(7):70-73.

[7] 杨卓,高全臣,王洪波,等. h 型双排桩技术在临高层建筑基坑工程中的应用及分析[J]. 科学技术与工程,2015,15(23):198-202,207.
YANG Z,GAO Q C,WANG H B,et al. Application and analysis for double-row h-piles technology in foundation pit closed to high buildings [J]. Science technology and engineering, 2015, 15 (23):198-202,207.

[8] 李发雄. h 型桩基坑支护结构变形特征和稳定性分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2022.
LI F X. Deformation characteristics and stability analysis of H-shaped pile foundation pit supporting structure [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2022.

[9] 黄致兴,张兴杰,王涛,等. 多排桩支护技术在超大深基坑工程中的应用研究[J]. 广东土木与建筑,2024,31(8):85-89.
HUANG Z X, ZHANG X J, WANG T, et al. Research on the application of multi-row pile support technology in super large and deep foundation pit engineering[J]. Guangdong architecture civil engineering,2024,31(8):85-89.

[10] 李东海,王梦恕,杨广武,等. 多排桩防护既有地铁隧道数值模拟与监测分析[J]. 现代隧道技术,2014(S1):357-362.
LI D H, WANG M S, YANG G W, et al. Numerical simulation and monitoring analysis of multi-row pile protection for an existing metro tunnel [J]. Modern tunnelling technology, 2014 (S1): 357-362.

[11] 张欢,程涛,陈合龙,等. 深基坑多排桩支护结构的研究进展[J]. 湖北理工学院学报,2018,34(5):46-51.
ZHANG H,CHENG T,CHEN H L,et al. Research progress of the multi-pier supporting structure in deep foundation pit[J]. Journal of Hubei Polytechnic University,2018,34(5):46-51.

[12] 印长俊,龚家兴,肖京湘. 基于弹性支点法的三排微型钢管桩支挡结构内力与变形研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(11):2725-2733.
YIN C J,GONG J X,XIAO J X. Research on internal force and deformation of retaining structure with three-row-mini-piles based on elastic subgrade method[J]. Journal of railway science and engineering,2019,16(11):2725-2733.