

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.003

基坑开挖对管桩竖向承载性状影响研究

杨庆光, 肖 森, 刘 峰, 柳 雄

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对基坑开挖引起管桩挤土效应的弱化, 以及挤土效应弱化对管桩承载性质影响问题, 开展了室内模型试验, 并通过对模型试验进行数值建模, 验证了数值模型的可靠性。在此基础上, 从桩长、桩间距、桩侧摩阻力系数对开挖卸荷影响下管桩基础承载性状的影响展开研究。结果表明: 开挖卸荷对管桩承载特性造成较大影响, 极限承载力对应桩顶沉降量提高 54.5%; 数值计算发现, 卸载前后极限荷载所对应最大沉降差率为 9.52%, 满足工程精度要求, 验证了所提数值模型的可靠性; 数值计算结果表明, 随桩长提高, 最大桩身轴力位置不断上升, 而中性点位置却不断下降; 桩间距越小, 开挖卸荷对桩身轴力影响越大, 而对负摩阻力影响越小; 摩阻力系数为 0.3 时, 摩阻力系数对桩身轴力及桩侧摩阻力发挥敏感度最高。

关键词: 承载性状; 挤土效应; 侧摩阻力; 管桩; 基坑开挖

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0019-07

引文格式: 杨庆光, 肖 森, 刘 峰, 等. 基坑开挖对管桩竖向承载性状影响研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 19-25, 78.

Research on the Influence of Foundation Pit Excavation on the Vertical Bearing Characteristics of Pipe Piles

YANG Qingguang, XIAO Sen, LIU Feng, LIU Xiong

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the weakening of the soil squeezing effect caused by the foundation pit excavation and the influence of the this weakening on bearing characteristics of the pipe piles, indoor model experiments have been conducted, with the reliability of the numerical model verified through numerical modeling of the model experiment, followed by a study on the influence of pile length, pile spacing, and pile lateral friction coefficient on the bearing characteristics of pile foundations under excavation unloading on the former basis. The results show that excavation unloading has a significant influence on the bearing characteristics of pipe piles, with the ultimate bearing capacity corresponding to a 54.5% increase in pile top settlement. Numerical calculations have found that the maximum settlement difference rate is 9.52% corresponding to the ultimate load before and after unloading, which meets the engineering accuracy requirements, thus verifying the reliability of the proposed numerical model. The numerical calculation results show that as the pile length increases, the maximum axial force position of the pile body keeps rising, while the neutral point position continues to decline. The smaller the distance between piles, the greater the influence of excavation and unloading on the axial force of the pile body, and the smaller the influence on negative frictional resistance. With the friction coefficient being 0.3, the sensitivity of the friction coefficient to the axial force of the pile

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2024JJ7152); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (23A0424); 湖南省大学生创新创业训练计划基金资助项目 (湘教通 [2024] 118 号 3705)

作者简介: 杨庆光, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为桩土相互作用, E-mail: yqg1210@hut.edu.cn

body and the lateral friction of the pile reaches the highest point.

Keywords: bearing characteristic; soil squeezing effect; lateral frictional friction; pipe pile; foundation pit excavation

1 研究背景

管桩作为一种常见的预制桩,已经被广泛应用土木工程相关领域。但是,管桩施工存在着显著的挤土效应,使其与桩身承载性状之间存在重要联系。然而,开挖卸荷降低了管桩桩侧挤土效应,影响到管桩承载性状,而目前开挖卸荷对管桩承载性状的影响方面的研究相对较少。

到目前为止,国内外学者针对基坑开挖卸荷对桩基础承载性状问题已经开展了广泛的研究。国外 Leung C. F.^[1] 和 Ong D. E.^[2] 等通过对实际工程和模型试验方法观测发现,基坑导致了坑底工程桩上浮,对桩身承载性状造成影响。国内的俞建霖^[3]、张治国^[4] 和李镜培^[5] 等专家也在实际工程中发现,基坑开挖会对桩基础承载性状造成影响,甚至出现桩身质量问题。基于此,A. S. Alawneh 等^[6] 对砂土地基中桩身抗拔极限承载力进行了模型试验,研究了砂土密度、成桩方法、桩径、桩表面粗糙程度以及桩端类型对抗拔极限承载力的影响;Leung C. F. 等^[7] 使用离心模型试验研究了无支护基坑开挖对相邻桩体的影响,得出桩身的变形和弯矩会随着基坑开挖面与桩的距离的增大而减小的结论;刘义等^[8] 通过现场试验方法,采集桩身纵向受力钢筋的应力来反演桩身弯矩,分析了支护桩桩身弯矩在施工过程中的发展规律。此外,Zheng G. 等^[9] 采用有限元方法、对超深基坑开挖,坑底隆起对桩产生的作用问题开展了系统研究。Lee C. J. 等^[10] 模拟分析了基坑内单桩和群桩在开挖过程中的受力特性;徐枫等^[11] 采用有限元软件对基坑开挖时工程桩的性状进行了分析,针对不同工况、不同桩土接触条件、不同位置的工程桩进行试验。刘畅等^[12] 建立了二维有限元模型,对不同桩长、桩距、开挖深度与开挖半径对坑底工程桩单桩承载力的影响进行了分析。曾亚武等^[13] 对某基坑进行了开挖隆起的数值模拟,考虑接触面单元模拟土体与围护结构的相互作用,得到了不同开挖阶段的地表沉降。

尽管国内外许多学者针对基坑开挖卸荷对桩基础承载性状影响问题开展了深入系统的研究,但是上述研究大多局限于灌注桩。由于管桩在施工工艺上与灌注桩截然不同,基坑开挖卸载对施工挤土效应产生巨

大影响,因此直接将已有的成果应用于基坑开挖卸载下管桩基础设计显然不合理。

本文首先通过室内模型试验,模拟基坑开挖卸荷对管桩承载性状的影响,探讨开挖卸荷对管桩基础承载性状的影响规律;在此基础上,通过数值模拟的方法,从桩长、桩间距、桩侧摩阻力系数对开挖卸荷后管桩基础承载性状影响的角度,系统分析开挖卸荷对管桩承载性状的影响,研究成果对基坑开挖下管桩基础设计具有一定的借鉴意义。

2 模型试验研究

2.1 试验方案布置

为研究基坑开挖对管桩群桩基础承载性状的影响,开展了室内管桩基础模型试验研究。本次试验采用株洲本地红黏土,通过晒干、过筛、配水和保湿等流程制备。通过室内直剪试验,确定试验用土物理力学参数如表 1 所示。

表 1 桩土材料参数

Table 1 Pile soil material properties

名称	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	含水率 /%	重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	摩阻力系数
土	29.2	23.1	14.6	18.9	9.2	0.50	0.3
桩	-	-	-	25.0	20.0	0.15	0.3

考虑到本研究对象为管桩,为了更明显地观测到开挖卸荷影响下模型桩桩身应变变化,本次模型桩选用实心木桩(见图 1),采用先填土后压入的方式成桩。模型桩桩身直径为 40 mm,桩长为 0.8 m,并按图 2 所示进行布置。本次模型试验在自制 1.0 m $\times$ 1.0 m $\times$ 1.0 m 的模型箱中进行,采用分层填筑压实方法,进行土方填筑,土方填筑高度为 0.9 m,模型桩入土深度为 0.7 m。本次试验通过对在填筑土体表面同一平面上设置的 A、B 两块可分离式钢板(见图 2),并采用砝码均匀堆载和卸载的方式,模拟基坑开



图 1 木质模型桩

Fig. 1 Wooden model piles

挖卸荷过程。

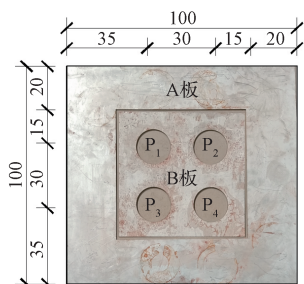
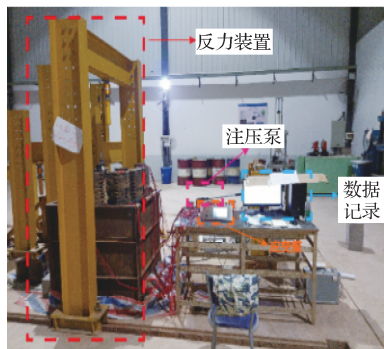


图2 模型桩布置图

Fig. 2 Model pile layout diagram

基于试验土体重度, 本次模型试验 A、B 板上加载量均取 18.9 kPa, 通过 A 板、B 板 (不包括桩孔面积) 的实际面积, 换算两块压板上部加载体质量, 确定砝码个数。此外, 为提高试验可比性, 降低试验失误, 本次模型试验共开展了两根开挖前模型桩 (P_1 和 P_2) 和两根开挖后模型桩 (P_3 和 P_4) 试验研究, 并通过在桩顶加载的方式, 开展开挖前后各桩单桩竖向承载试验。

本次模型试验的试验装置如图 3 所示。



a) 模型试验布置



b) 单桩静荷载试验

图3 基坑开挖模型试验

Fig. 3 Foundation pit excavation model test

具体试验过程如下: 1) 通过在 A、B 板上同步增加砝码的方式, 通过提高 A 板板底压力的方式模

拟开挖前基坑底面以上土方竖向压力; 2) 根据模型桩布置方案, 完成模型桩沉桩试验; 3) 对模型桩施加竖向荷载; 4) 根据开挖卸载方案, 通过有序移除 B 板上的砝码方式模拟基坑开挖过程。

2.2 试验结果分析

图 4 为卸载前后静压桩桩顶荷载 - 沉降曲线, 由图可知, 卸荷前后静压桩荷载 - 沉降曲线均为陡降型, 根据《建筑桩基基础设计规范》(JGJ94) 取值方法, 可以确定静压桩卸载前后的极限承载力均为 3 600 N。尽管采用规范法确定的卸载前后管桩极限承载力大小并没有发生变化, 但是卸荷前后管桩对应沉降量存在一定的差异, 特别是达到极限荷载之后, 差异更大。如 P_1 和 P_3 管桩, 当桩顶荷载达到极限荷载时, 对应桩顶沉降量分别为 0.11 mm 和 0.17 mm, 开挖卸荷使管桩桩顶沉降量相比卸荷前提高了 54.5%, 沉降增量较大, 说明基坑开挖卸荷对管桩承载特性造成较大影响, 不容忽视。

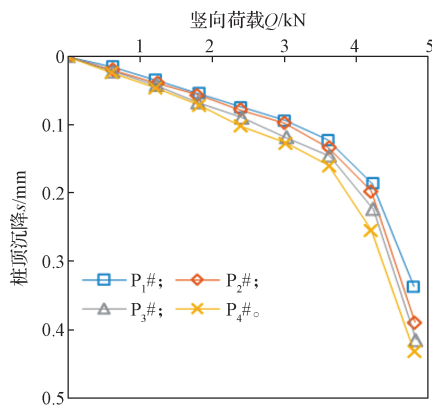


图4 模型试验的荷载 - 沉降曲线

Fig. 4 Load-settlement curves of the model test

3 基坑开挖卸荷影响因素分析

3.1 有限元模型验证

为验证数值模型的可靠性, 通过对模型试验进行有限元建模, 模拟开挖卸荷对管桩承载性状的影响。有限元模型长 × 宽 × 高为 2 m × 2 m × 2 m, 基坑开挖深度为 1 m, 管桩直径为 40 mm, 有限元网格单元均采用实体单元模拟 (C3D8)。桩体与土体物理力学参数如表 1 所示。桩土接触面采用 ABAQUS 有限滑动硬接触模型, 其中界面法向为硬接触, 切向采用罚函数, 摩阻力系数取 0.3。选用 Hex 六面体单元非减缩积分, 以及结构化网格划分技术进行网格划分。通过地应力平衡和生死单元相结合的方法模拟开挖卸荷。数值计算与模型试验结果对比如图 5 所示, 由图可知, 采用数值计算方法确定的开挖前后竖向承

承载力极限值与模型试验结果基本一致,但卸载前后1#和3#桩极限承载力试验值与计算值之间分别存在8.56%和9.52%的差异,最大沉降差率仅为9.52%,满足工程精度要求,从而验证了本文数值模型建模方法的可靠性。

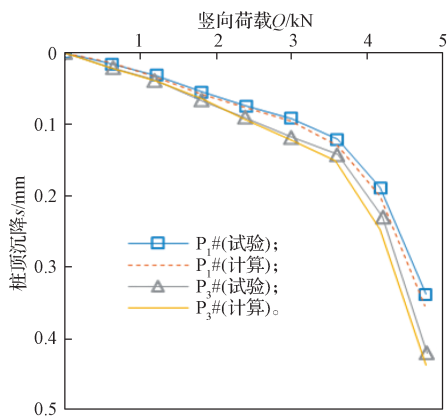


图5 试验与计算荷载-沉降曲线

Fig. 5 Experimental and computational load settlement curves

3.2 承载性状影响因素分析

基于上述数值建模方法,并以实际工程为参考,选取长 $\times$ 宽 $\times$ 高为100 m $\times$ 100 m $\times$ 100 m空间进行建模,基坑开挖深度为10 m,桩长为10 m,桩基半径为0.25 m,建立基坑开挖对管桩承载性状影响数值计算模型(见图6),深入研究桩长、桩距和界

面摩阻力系数对基坑开挖卸荷对管桩桩身轴力及桩侧摩阻力发挥影响。

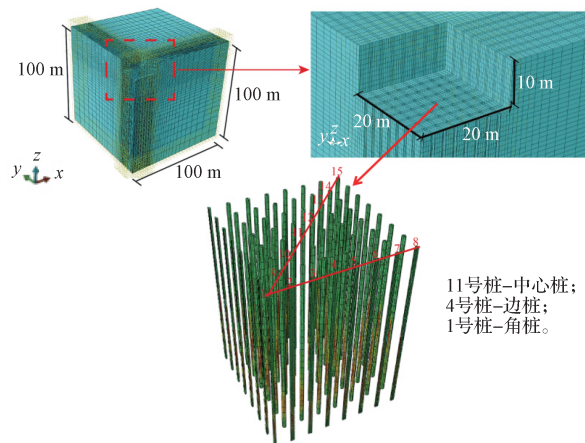


图6 基坑开挖数值模型

Fig. 6 Numerical model of the foundation pit excavation

3.2.1 桩长影响

图7为不同桩长情况下桩身轴力沿桩长分布曲线。由图可知,不同位置处最大桩身轴力随桩长变化而变化,随桩长提高,不同位置处桩身最大轴力差值分别达31.6, 143.7, 255.1 kN。此外,以中心桩为例,当桩长由10 m提高到20 m时,最大桩身轴力位置距桩顶位置分别为18.3, 23.1, 26.5 m, 相对桩端均有一定程度的上升。

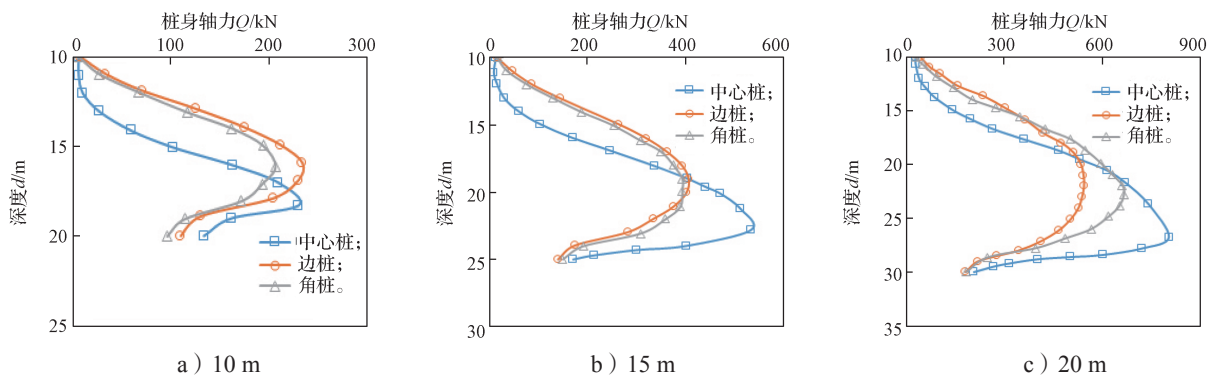


图7 不同桩长桩身轴力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of pile shaft load at different pile lengths

图8为不同桩长下桩侧摩阻力分布曲线。由图可知,不同桩长管桩桩侧摩阻力分布规律大致相同。受开挖卸荷引起的土体回弹影响,管桩上部出现了负摩阻力区,且负摩阻力呈现先增大后减小,并反向增大的变化趋势。随着桩长增加,中心桩的负摩阻力最大值也不断提高,由10 m时的44.36 kPa上升至20 m时的73.7 kPa,充分说明了桩越长,管桩施工挤土效应越明显,开挖卸荷引起的回弹也越大,从而负摩阻力影响也越明显。此外,从图中还可以看出,桩长10 m时,中性点的位置由大到小依次为中

心桩、边桩、角桩;桩长为15 m时,中性点的位置由大到小依次为中心桩、边桩、角桩;而桩长为20 m时,中心桩、边桩及角桩三者中性点位置相差较小,这表明中心桩、边桩、角桩中性点的位置逐渐接近,但是随着桩长增加,中性点的位置却不断下降。

3.2.2 桩距影响

图9为桩长 $D=15$ m时,不同桩间距的桩身轴力分布曲线。受开挖卸荷影响,不同桩间距时中心桩浅部范围桩身轴力小于边桩和角桩桩身轴力,但是达到一定深度后,中心桩桩身轴力逐渐超过边桩

和角桩。此外,由图可知,对于中心桩,桩间距由 $4D$ 增大到 $5D$,桩身轴力的最大值增量为 71.0 kN ,而桩间距由 $5D$ 增大到 $6D$,桩身轴力的最大值为 10.4 kN ,说明桩间距越小,开挖卸荷对桩身轴力的影响越大,因此在坑内管桩设计时,合理选择桩间距十分重要。

图10为桩长为 15 m 时不同桩间距的桩侧摩阻

力分布曲线。由图可知,不同桩间距时桩身侧摩阻力的分布规律大致相同,呈现出负向先增大,再减小,并逐渐向正向增大的趋势。其中心桩负摩阻力沿桩长方向先低于边桩和角桩,并逐渐向高于边桩和角桩发展。此外,随桩间距增大,中心桩与角桩最大负侧摩阻力差分别为 $14.1, 20.7, 21.8\text{ kPa}$,从而进一步说明桩间距对管桩摩阻力发挥存在重要影响。

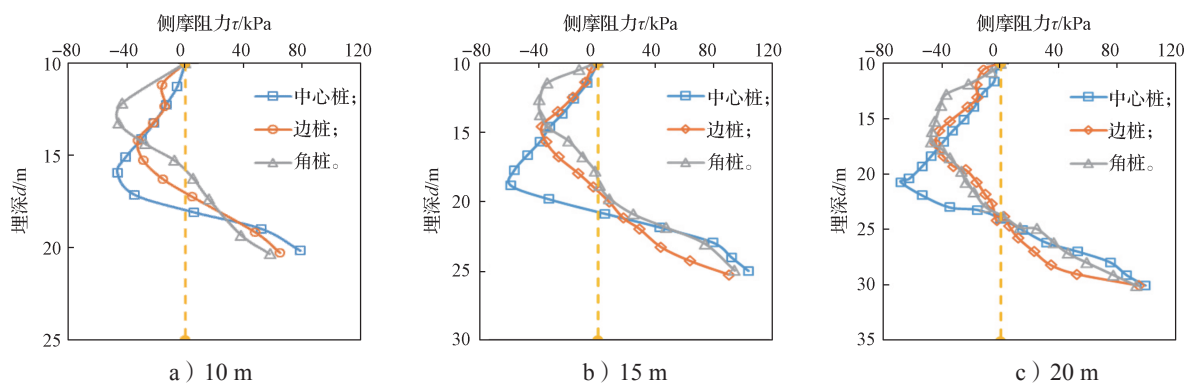


图8 不同桩长时桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of pile lateral friction resistance at different pile lengths

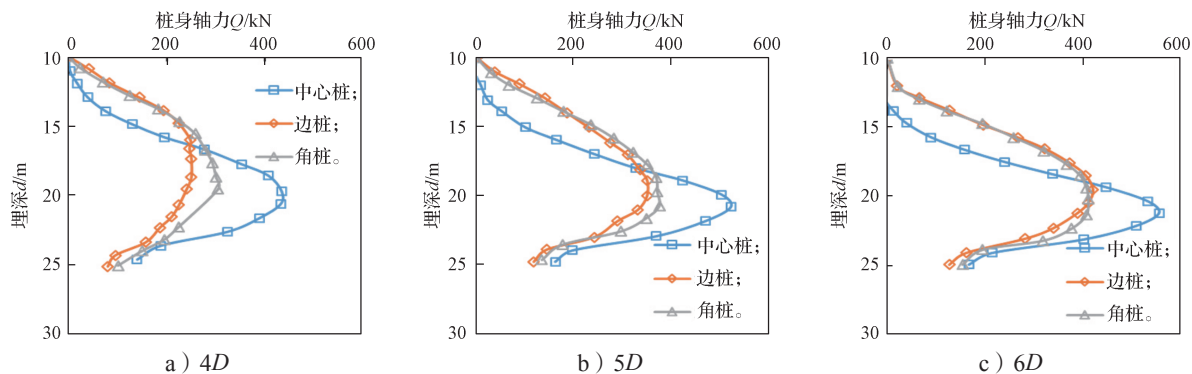


图9 不同桩距时桩身轴力分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of pile shaft load at different pile spacing

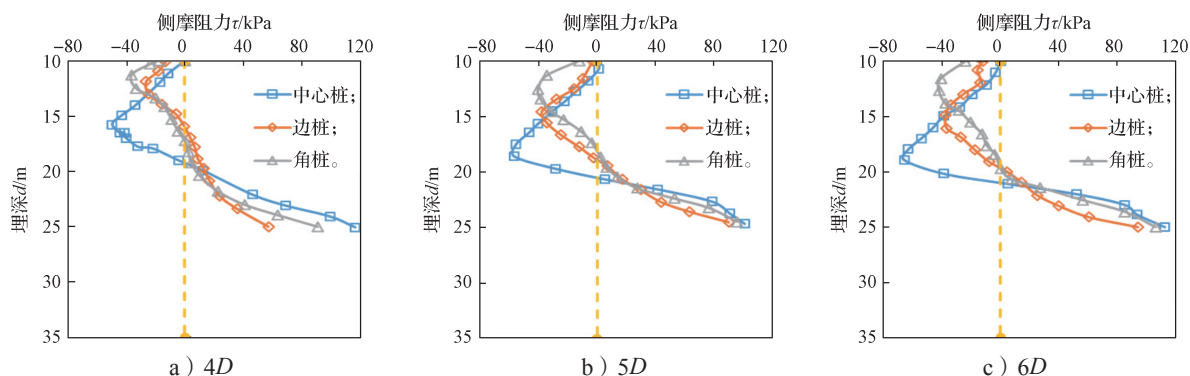


图10 不同桩距下侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of lateral frictional resistance at different pile spacing

3.2.3 界面摩阻力影响

图11为不同界面摩阻力系数影响下桩身轴力分布曲线。由图可知,随桩土界面摩阻力系数增大,各位置处管桩桩身轴力逐渐增大。以中心桩为例,随着

摩阻力系数由 0.1 提高至 0.4 ,桩身轴力最大值分别为 $169.73, 373.42, 561.18, 618.56\text{ kN}$ 。此外,从中心桩桩身轴力最大值可以看出,随着摩阻力系数的提高,桩身最大轴力增量表现为先增大后降低的趋势,

当摩阻力系数为 0.3 时, 桩身轴力增量最大, 表明此时摩阻力系数敏感度最高, 从而说明数值计算过程中, 摩阻力系数取值对开挖卸荷影响下管桩承载性状的影响十分明显, 需要谨慎选取。

图 12 为开挖卸荷影响下不同摩阻力系数桩侧摩阻力分布曲线图。由图可知, 随着摩阻力系数增大, 不同位置处管桩桩侧负摩阻力表现为负向先增大, 再减小, 并逐渐向正向增大的趋势。以中心桩为例, 随着摩阻力系数增加, 负摩阻力最大值由 19.4, 42.4, 66.4, 78.3 kPa 不断提高。此外, 从负摩阻力最大值增量可以看出, 摩阻力系数由 0.2 增大到 0.3, 负摩阻力最大值增量最大, 达到 24.0 kPa, 进一步验证了此时摩阻力系数敏感度最高的结论。

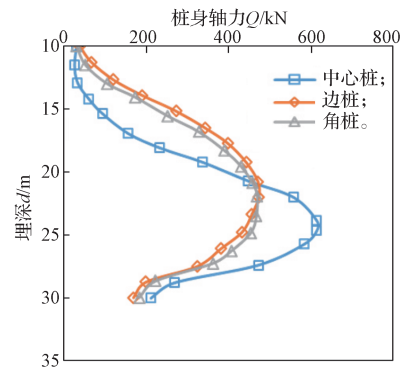
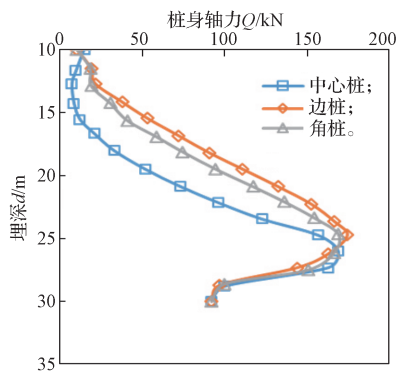
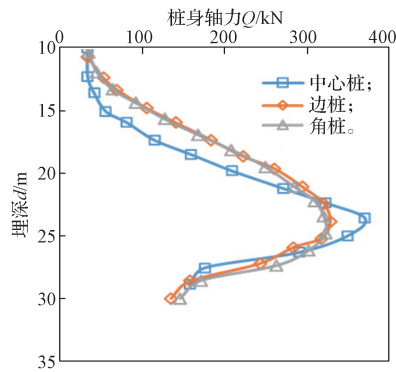
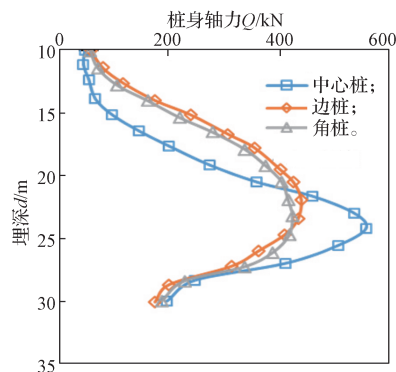
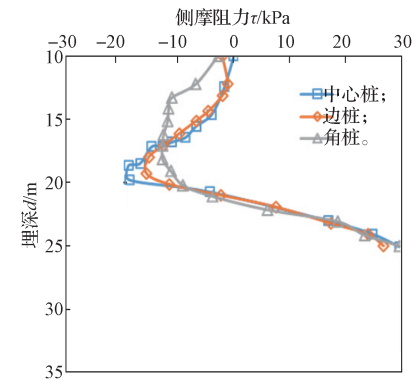
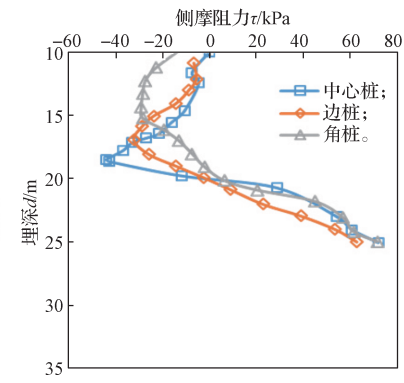
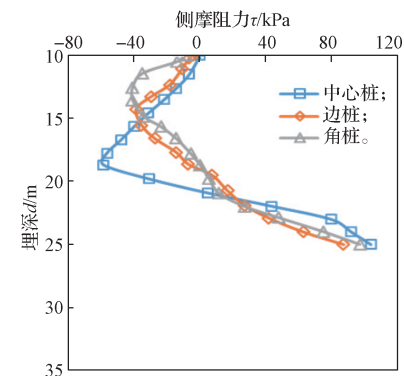
d) $\mu=0.4$

图 11 不同摩阻力系数下桩身轴力分布曲线
Fig. 11 Distribution curves of pile shaft load under different friction coefficients

a) $\mu=0.1$ b) $\mu=0.2$ c) $\mu=0.3$ a) $\mu=0.1$ b) $\mu=0.2$ c) $\mu=0.3$

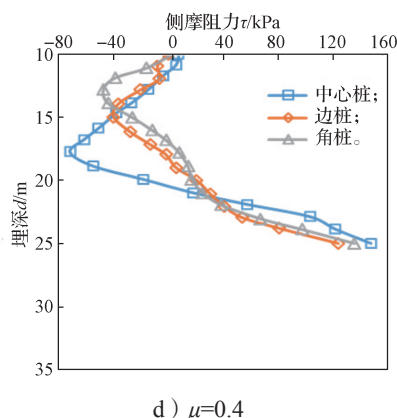


图 12 不同摩阻力系数下桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 12 Distribution curves of pile lateral friction under different friction coefficients

4 结论

本文针对基坑开挖卸荷对管桩承载性状影响问题开展了模型试验, 并通过对模型试验进行数值建模, 验证了数值模型的可靠性。在此基础上, 从桩长、桩间距、桩侧摩阻力系数对开挖卸荷后管桩基础承载性状影响开展深入研究, 得到如下结论:

1) 由模型试验荷载-沉降曲线可知, 开挖卸荷对管桩承载力极限值影响较小, 但极限承载力对应桩顶沉降量提高 54.5%, 表明开挖卸荷对管桩承载特性造成较大影响, 对开挖卸荷影响的管桩基础设计不容忽视;

2) 通过对模型试验进行数值模拟, 结果表明, 数值计算结果与试验结果吻合度较高, 开挖前后竖向承载力极限值与实测结果保持一致, 而卸载前后极限荷载所对应最大沉降差率为 9.52%, 满足工程精度要求, 验证了本文数值模型的可靠性;

3) 结合实际工程, 从桩长、桩距、桩土界面摩阻力系数对开挖卸荷影响下管桩的承载性状进行数值分析, 结果表明: 随桩长提高, 最大桩身轴力位置不断上升, 而中性点位置却不断下降; 桩间距越小, 开挖卸荷对桩身轴力影响越大, 而对负摩阻力影响越小; 摩阻力系数为 0.3 时, 摩阻力系数对桩身轴力及桩侧摩阻力发挥敏感度最高。

参考文献:

[1] LEUNG C F, ONG D E, CHOW Y K. Pile Behavior Due to Excavation-Induced Soil Movement in Clay. II: Collapsed Wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 45-53.
[2] ONG D E, LEUNG C F, CHOW Y K. Behavior of Pile

Groups Subject to Excavation-Induced Soil Movement in very Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1462-1474.

[3] 俞建霖, 过 锦, 周佳锦, 等. 考虑空间效应的均质地基内撑式基坑开挖对邻近桩基影响分析 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 140-152.

YU Jianlin, GUO Jin, ZHOU Jiajin, et al. Analysis of Lateral Deformation of Adjacent Pile Induced by Braced Excavation Considering Spatial Effect in Ground of Homogeneous Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 140-152.

[4] 张治国, 徐 晨, 宫剑飞. 考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 846-856.

ZHANG Zhiguo, XU Cheng, GONG Jianfei. Influence of Tunneling on Deflection of Adjacent Piles Considering Shearing Deformation of Foundation and 3D Effects of Lateral Soils Beside Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 846-856.

[5] 李镜培, 王 笑. 考虑降水的基坑开挖卸荷对坑底桩的影响 [J]. 工程勘察, 2011, 39(9): 5-8.

LI Jingpei, WANG Xiao. Research on Effect of Dewatering and Excavation on Pile[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(9): 5-8.

[6] ALAWNEH A S, MALKAWI A I H, AL-DEEKY H. Tension Tests on Smooth and Rough Model Piles in Dry Sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 746-753.

[7] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of Pile Groups Subject to Excavation-Induced Soil Movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 58-65.

[8] 刘 义, 朱武卫, 杨 焜, 等. 坑中坑基坑内坑支护桩弯矩发展规律 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13085-13093.

LIU Yi, ZHU Wuwei, YANG Kun, et al. Bending Moment Development Law of Supporting Pile in "Pit-in-Pit" Foundation Pit[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 13085-13093.

[9] ZHENG G, DIAO Y, NG C W W. Parametric Analysis of the Effects of Stress Relief on the Performance and Capacity of Piles in Nondilative Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(9): 1354-1363.

[10] LEE C J, ALTABBA A A, BOLTON M D. Development of Tensile Force in Piles in Swelling Ground[J]. Soft Soil Engineering. Oxfordshire: Routledge, 2017: 345-350.

[11] 徐 枫, 魏建华, 吴 超. 基坑开挖对坑内工程桩影响的数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5 (增刊 2): 1503-1506, 1517.

(下转第 78 页)