

基坑开挖下倾斜长短组合桩受力及土体位移数值模拟

杜泽轩¹, 汪东林¹, 孙浩²

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 合肥 230000; 2. 安徽水安建设集团股份有限公司, 合肥 230000)

摘要: 利用软件 Midas GTS NX 建立基坑支护模型, 模拟分析基坑开挖过程中不同倾斜长短组合桩支护下, 基坑土体位移及桩身水平位移与弯矩变化的规律; 探讨组合桩桩长分配与长桩倾角对支护效果的影响。结果表明: 基坑开挖过程中, 随着开挖深度的增加, 一定程度地增加长桩倾角能够有效减小土体变形和桩身水平位移, 开挖面以下桩身最大弯矩也随长桩倾角的增加而减小; 在总桩长一定时, 最佳桩长分配受长桩倾角影响存在临界值, 在长桩倾角临界值以下最佳桩长分配受倾角变化影响, 在长桩倾角临界值以上长桩越长支护效果越好。在同一开挖深度下, 桩身水平位移与长桩倾角有关, 长桩倾角在开挖面以上相对于开挖面以下对桩身位移影响更大; 开挖面以下, 部分桩身最大弯矩与桩长成正比。

关键词: 基坑开挖; 基坑支护; 组合桩; 土体位移; 桩身弯矩; 桩身位移; 数值模拟

中图分类号: TU 473.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23079



Numerical Simulation of Force and Soil Displacement of Inclined Long-short Composite Piles under Foundation Pit Excavation

DU Zexuan¹, WANG Donglin¹, SUN Hao²

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230000, China; 2. Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd, Hefei 230000, China)

Abstract: The foundation pit support model was established with the software Midas GTS NX to simulate and analyze the changes of soil displacement of foundation pit, horizontal displacement and bending moment of pile body under different inclined long-short combined pile supports during the excavation process of foundation pit. The influence of pile length distribution of combined pile and inclination angle of long piles on the support effect was explored. The results show that during the excavation process of the foundation pit, with the increase of the excavation depth, increasing the inclination angle of the long pile to a certain extent can effectively reduce the soil deformation and the horizontal displacement of the pile body, and the maximum bending moment of the pile body below the excavation surface decreases with the increase of the inclination angle of the long pile. When the total pile length is constant, there is a critical value for the optimal pile length distribution affected by the inclination angle of the long pile. Below the critical value of the inclination angle of the long pile, the optimal pile length distribution is affected by the change of the inclination angle. Above the critical value of the inclination angle of the long pile, the

收稿日期: 2023-05-19

基金项目: 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目 (2023-YF024; 2023-YF149)

作者简介: 杜泽轩 (1998—), 男, 安徽池州人, 硕士生, 主要研究方向为基坑边坡支护。

通信作者: 汪东林 (1979—), 男, 安徽宣城人, 博士, 教授, 主要研究方向为岩土工程。

引文格式: 杜泽轩, 汪东林, 孙浩. 基坑开挖下倾斜长短组合桩受力及土体位移数值模拟 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):535-544.

longer the long pile is, the better the support effect is. At the same excavation depth, the horizontal displacement of the pile body is related to the inclination angle of the long pile, and the influence of the inclination angle of the long pile on the pile body displacement above the excavation surface is greater than that below the excavation surface. The maximum bending moment of the part pile body below the excavation surface is proportional to the pile length.

Keywords: excavation of foundation pit; support of foundation pit; composite pile; soil displacement; pile bending moment; pile displacement; numerical simulation

随着地下建筑结构的不断增多,基坑工程支护形式日益多样化。工程实践中常见的支护形式包括单排桩支护^[1]、桩锚支护^[2-4]、地下连续墙支护^[5-7]、双排桩^[8]以及多级支护。单排桩支护通常为一排竖直桩,相对于双排桩更有经济优势,但缺乏稳定性。单排桩支护中,如果将部分直桩倾斜一定角度并与其余直桩组合,就形成斜直交替组合桩,斜直交替桩型的支护能力优于全斜桩^[9]。特别是当斜桩和直桩长度不同时,这种组合被称为倾斜长短组合桩,这种长短桩组合形式比全长桩能更大程度地减少成本,增强支护的实用性^[10]。相比普通单排桩,倾斜桩能更有效地承担水平荷载,对于土质较好的浅基坑还能同时起到临时内撑的作用。倾斜桩支护作为1种新型无支撑支护技术,在同等开挖深度下相较其他无支撑支护有更好的支护效果,但目前倾斜桩支护用于实际工程的时间较短,尚未形成成熟的设计方法。因此,对倾斜桩结构的工作性状和支护能力进行研究,对于提升基坑支护结构的安全性和稳定性、优化建筑基坑工程设计有较大的现实意义。

针对倾斜桩的结构设计与作用机理,现有学者多采用数值模拟或模型实验的方法进行研究。在数值模拟方面,郭景琢等^[11]针对工程中常用的斜直组合倾斜桩支护结构,提出1种考虑桩土相互作用的平面杆系有限元倾斜桩设计计算方法,且对软土地区多个斜直组合倾斜桩支护工程实例进行了模拟验证;Wu^[12]为评价双排斜桩墙在深基坑开挖中的受力性能,建立双排斜桩墙的三维数值模型,模拟分析桩倾角、桩径、贯入深度和排距等因素对桩侧桩柱性能的影响;杨征宇等^[13]利用非线性 p - y (土抗力-挠度)曲线法模拟斜桩特性,通过自编计算机程序对斜桩非线性 p - y (土抗力-挠度)曲线进行计算分析,建议工程设计尽量采用负斜桩布置形式。在模型实验方面,郑刚等^[14]运用大型室内模型实验研究多种倾斜桩支护结构的变形及受力特征,发现倾斜桩组合支护结构自身形成1个空间刚架,由于具有自撑、刚架和重力三大效应,变形及内力更小,稳定性更高;孔德森等^[15]采用模型实验的方法,以文献[16]中的

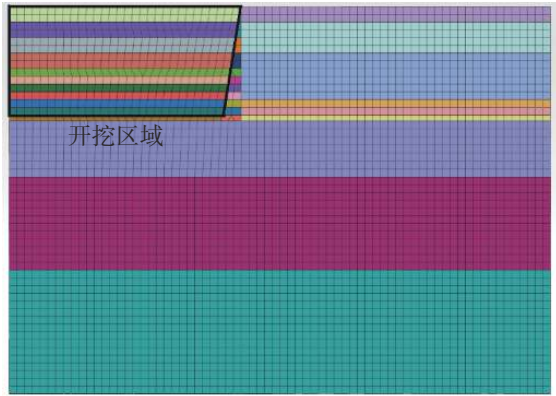
基坑开挖为研究对象,对其在倾斜桩桩顶水平位移、桩身弯矩以及土体沉降进行模拟分析,结果表明在同等条件下,倾斜桩相对于直立桩具有更好的桩体水平位移控制和土体沉降控制能力;王新泉等^[17]也通过模型试验研究竖直桩与不同倾斜角度倾斜桩的承载性能。随着倾斜桩结构设计及作用机理研究的不断深入,部分学者针对不同形式倾斜桩工程应用案例进行研究。张松波等^[18]以武汉某深基坑前排倾斜双排桩无支撑支护设计工程为案例,通过模拟得出前排桩倾斜双排桩优化设计参数,再通过监测数据分析基坑开挖过程中的桩身位移,验证了设计的合理性。周越洲等^[19]结合珠海市某工程项目,利用有限元程序模拟土方开挖过程桩侧不平衡土压力对桩受力和变形的影响,分析桩侧移、倾斜的原因。

综上可看出,现有学者主要针对倾斜桩组合结构与工作机理从理论上进行了模拟研究,对于工程应用的案例研究多为双排或其他倾斜桩组合结构,较少关注倾斜长短组合桩这一结构形式,对于组合桩桩长、桩身倾角等参数的优化设计较少。鉴于此,利用有限元软件模拟土方开挖过程,研究倾斜长短组合桩在改变桩身倾角及桩长情况下的受力变形情况,探讨倾斜组合桩支护性能的一般规律,以期为倾斜长短组合桩的设计与应用推广提供参考依据。

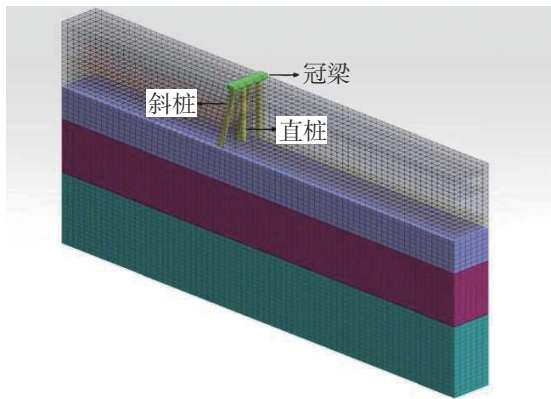
1 模型建立及参数设置

1.1 模型建立

利用有限元软件 Midas GTS NX 建立基坑支护模型,土体部分采用修正摩尔库仑本构,结构部分采用弹性本构。鉴于基坑的对称特性,取1/2基坑建立基坑支护数值模型。为减小边界效应对模拟结果的影响,取基坑模型长度70 m、深度50 m,宽度方向根据桩的个数和桩心间距确定,取6 m。对于模型桩,采用直径0.8 m圆截面,取冠梁矩形截面高(H)1.2 m、宽(B)1 m,均采用梁单元模拟。采用混合网格对土体进行网格划分,共21 252个单元,桩土基坑周围局部加密。土体网格及斜直桩布置如图1。



(a) 土体网格划分



(b) 斜直桩布置

图 1 基坑模型

Fig. 1 Excavation pit model

1.2 参数设置

1.2.1 材料参数

以合肥某地区典型上软下硬地层为基础, 具体土层参数如表 1。

表 1 土层参数

Tab. 1 Soil parameters

土层	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $C/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	弹性模量 E/MPa
杂填土	20.0	10	12	4.50
粉土	18.1	14	15	7.40
粉质黏土	18.5	18	16	9.50
黏土	18.9	22	16	10.70
硬黏土	18.0	30	20	135.00

1.2.2 工况参数

采用 Midas GTS NX 模拟施工工况, 为研究基坑在不同倾斜长短组合桩支护下的最大开挖深度及更精确地模拟基坑开挖时的土体应力变化和支护结构反应, 初始开挖选择每开挖 2 m 深度为 1 个工况, 开挖深度达到 8 m 后将每次开挖深度减小到 1 m, 具体工况参数见表 2。为模拟工程实际中的受力状态, 在工况 2 支护桩施工时清除位移, 减少多余影响因素。

表 2 施工模拟工况

Tab. 2 Construction simulation working condition

工况	施工模拟
工况 1	地应力平衡
工况 2	施工支护桩
工况 3	放坡开挖至第一层(-2.0 m)
工况 4	放坡开挖至第二层(-4.0 m)
工况 5	放坡开挖至第三层(-6.0 m)
工况 6	放坡开挖至第四层(-8.0 m)
工况 7	放坡开挖至第五层(-9.0 m)
工况 8	放坡开挖至第六层(-10.0 m)
工况 9	放坡开挖至第七层(-11.0 m)
工况 10	放坡开挖至第八层(-12.0 m)
工况 11	放坡开挖至第九层(-13.0 m)

1.2.3 支护桩参数

在斜直交替桩总桩长一定的情况下, 对长短桩桩长进行适当分配。设置基坑长短桩总桩长为 28.0 m, 共 2 跨 4 根桩。为比较分析长短组合桩相较于等长桩的支护效果, 设立 1-1~2-5 为长短组合桩组, 3-1~3-5 为等桩长组, 具体支护桩桩长与桩身倾角设计参数如表 3。支护桩桩径均为 1.2 m, 支护桩和冠梁均采用 C35 混凝土, 弹性模量为 31.5 MPa、容重为 22 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 、泊松比 ν 为 0.2。模拟共分为 15 组, 包含等桩长组和长短组合桩组。

表 3 组合桩桩长与桩身倾角分配

Tab. 3 Distribution of pile length and pile inclination for combined piles

编号	长桩		短桩	
	桩长/m	倾角/(°)	桩长/m	倾角/(°)
1-1		0		0
1-2		5		0
1-3	15.0	10	13.0	0
1-4		15		0
1-5		20		0
2-1		0		0
2-2		5		0
2-3	14.4	10	13.6	0
2-4		15		0
2-5		20		0
3-1		0		0
3-2		5		0
3-3	14.0	10	14.0	0
3-4		15		0
3-5		20		0

1.3 模型验证

为验证本文数值模拟模型的合理性, 基于王凯标等^[20]在室内模型实验下的长短桩组合与桩长相

似比,即3组一长一短组合,长桩为70 cm、短桩为60 cm,采用本文的数值模拟方法建立基坑支护模型,模拟分析长桩倾角在 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 下斜直桩的桩顶冠梁水平位移变化情况,并与文献[20]进行对比,结果如图2。由图2可看出:桩顶冠梁水平位移的模拟与实验结果的变化趋势一致,长桩倾角在 $0^\circ\sim 20^\circ$,随长桩倾角的增加,桩顶冠梁水平位移减小;对于未倾斜的组合桩,基坑开挖到一定深度时,桩顶冠梁水平位移均有一个突然增大的增加趋势。由此表明,本文建立的数值模拟模型合理。

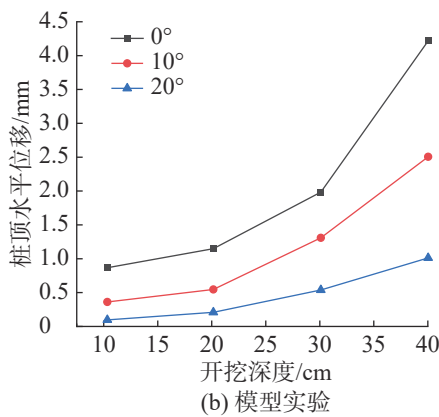
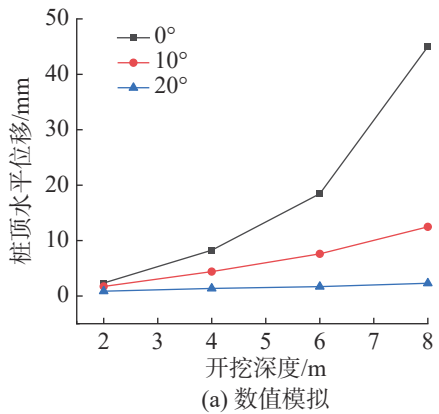


图2 冠梁侧向位移变化曲线模拟值和实验值

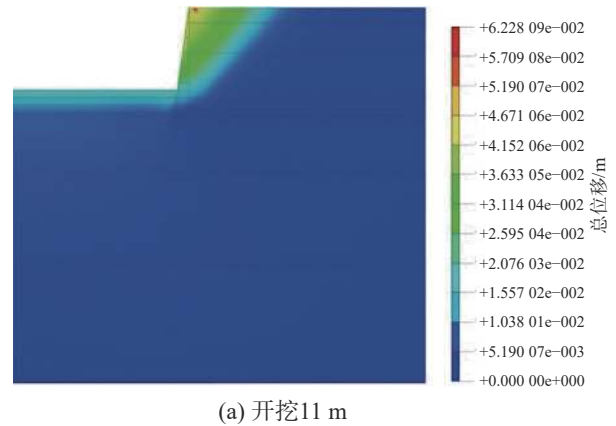
Fig.2 Simulated and experimental values of lateral displacement variation curve of crown beam

2 模拟结果与分析

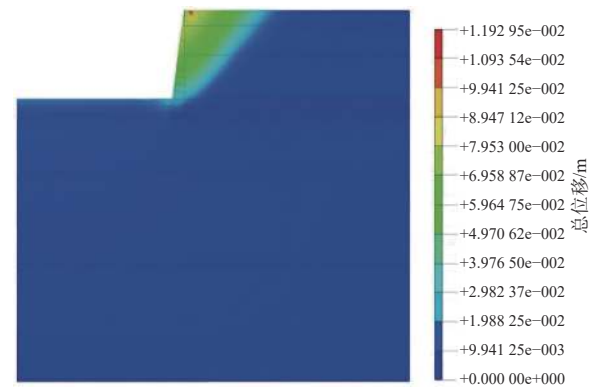
2.1 不同开挖深度土体位移

为研究倾斜长短组合桩结构桩长不等特性下的支护效果,选择长短桩长度比值(15.0/13.0)较大且长桩倾角($10^\circ, 15^\circ$)较大时的组合桩1-3,1-4,模拟分析长短组合桩长度比值一定的情况下,长桩倾角对基坑开挖过程中土体位移的影响。图3,4为在最不利开挖工况(工况9,10),即最后两步开挖11,12 m深度下的倾斜组合桩1-3,1-4支护基坑土体总位移云图。由图3,4可知:开挖深度从11 m增至12 m

时,1-3支护基坑土体的最大总位移从62.3 mm增至119.0 mm,1-4支护基坑土体的最大总位移从7.4 mm增至7.8 mm,说明开挖深度的增加会使基坑土体的总位移增大;开挖11 m时,1-3支护基坑土体最大总位移是1-4的8.4倍,挖至12 m时1-3支护基坑土体最大总位移是1-4的15.2倍,说明长桩倾角增大能显著控制土体变形,且开挖深度越深,变形控制效果越好。



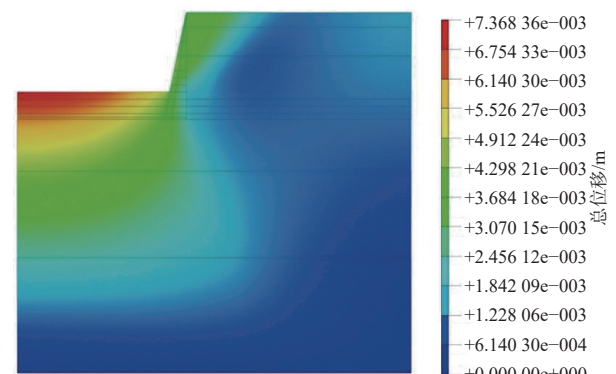
(a) 开挖11 m



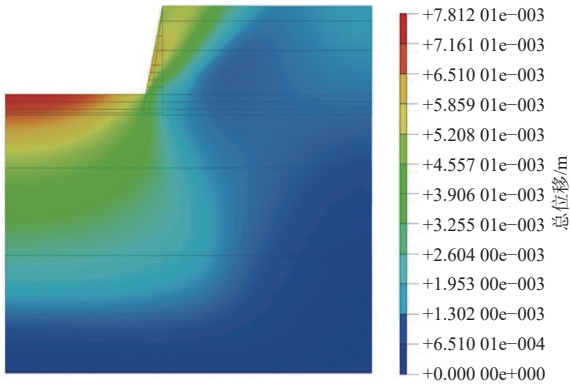
(b) 开挖12 m

图3 不同开挖深度下组合桩1-3支护基坑的土体总位移云图

Fig.3 Displacement contour map of soil mass for foundation pit supported by combined piles 1-3 at different excavation depths



(a) 开挖11 m



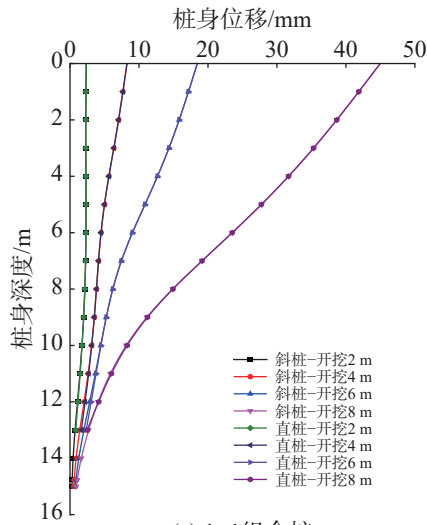
(b) 开挖12 m

图4 不同开挖深度下组合桩 1-4 支护基坑的土体总位移云图
Fig. 4 Displacement contour map of soil mass for foundation pit supported by combined piles 1-4 at different excavation depths

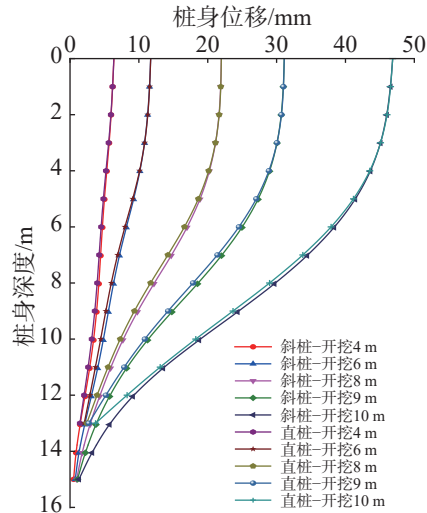
2.2 不同开挖深度桩身位移

2.2.1 桩身水平位移

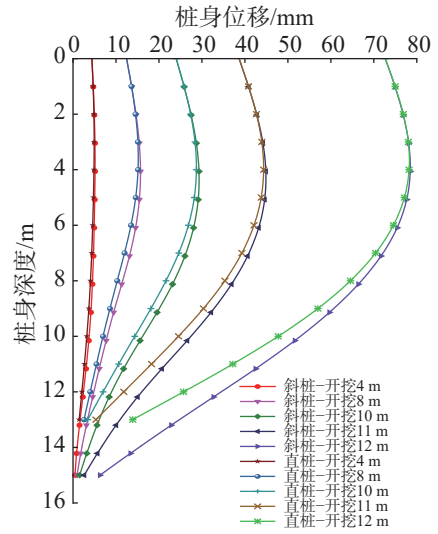
以长桩 15 m、短桩 13 m 为例,分析组合桩在不同桩身倾角及开挖深度下的桩身水平位移,模拟结果如图 5。



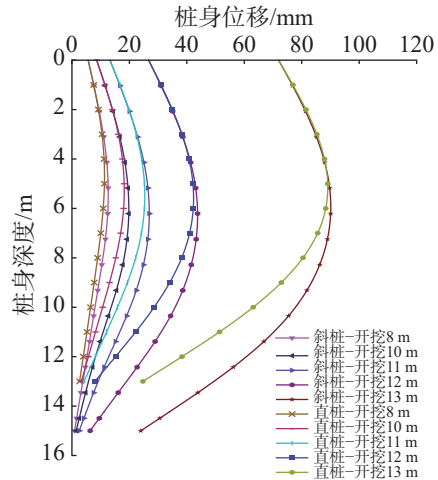
(a) 1-1组合桩



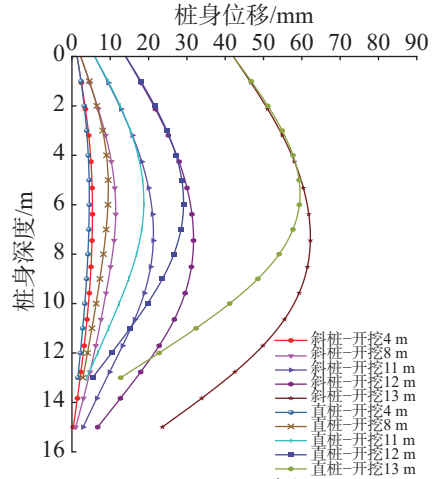
(b) 1-2组合桩



(c) 1-3组合桩



(d) 1-4组合桩



(e) 1-5组合桩

图5 不同开挖深度时桩身水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of pile body under different excavation depths

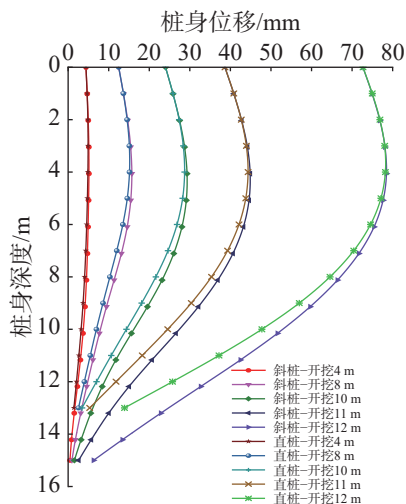
图中斜桩和直桩均采用表 2 所示工况向下开挖到底,右下角为最大开挖深度;部分组合桩最大开挖深度小于表 2 所示的最大开挖深度 13 m,说明该组

支护桩未能满足支护需求;取各组能达到的开挖深度为最大开挖深度,下同。

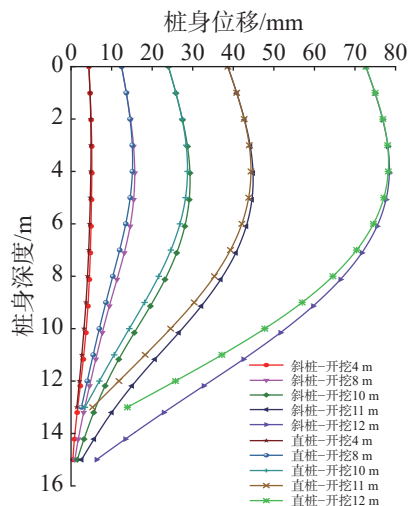
由图5可知:对于1-1,1-2,1-3,1-4,1-5组合桩,对应的长桩倾角分别为 0° , 5° , 10° , 15° , 20° ,对应支护的基坑能够达到的最大开挖深度分别为8,10,12,13,13 m,说明在长短组合桩桩长比值不变的情况下,随长桩倾角的增大,基坑最大开挖深度逐渐增加;但是长桩倾角从 15° 增至 20° 时,基坑最大开挖深度均为13 m,说明长桩倾角对基坑最大开挖深度的影响存在临界值;开挖深度为8 m时,1-1,1-2,1-3,1-4,1-5组合桩中桩身最大水平位移分别为44.9,21.9,15.1,11.3 mm,桩身最大水平位移随长桩倾角增大而减小,说明增大长桩倾角能有效控制桩身最大水平位移。此结论符合模型实验^[20]研究中长桩倾角对冠梁侧向位移和地表沉降的影响趋势。

从图5(b)可看出:1-2组合桩中长桩倾角为 5° 时,桩身水平位移随基坑最大开挖深度的增加逐渐减小,此时斜桩桩底反力水平分力偏小,对桩顶的水平位移限制有限。从图5(d)可看出:当1-4组合桩中长桩倾角为 15° 时,桩身水平位移在桩顶和桩底处偏小,中间处偏大,呈现出“中间大、两头小”的分布特征,说明长桩倾角较大时兼顾斜向支撑功能,与冠梁、直桩共同作用形成空间超静定结构,限制了结构的水平位移。

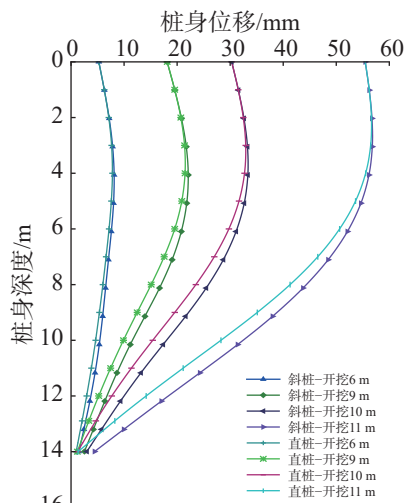
基于图5的分析,长桩倾角 15° 为长桩倾角对基坑最大开挖深度影响的临界值,临界值范围内,随长桩倾角的增大基坑最大开挖深度逐渐增加,故选取长桩倾角为 10° , 15° 时,模拟分析长短组合桩中长短桩长分配对桩身水平位移的影响,结果如图6。



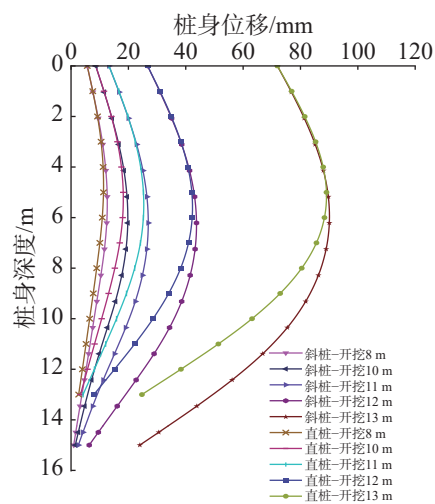
(a) 1-3组合桩



(b) 2-3组合桩



(c) 3-3组合桩



(d) 1-4组合桩

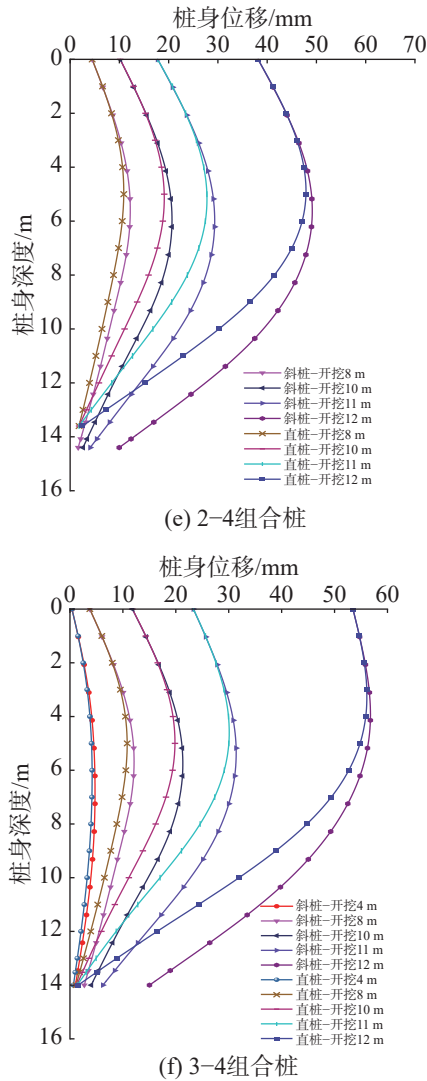


图6 相同倾角不同桩长组合下的桩身水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of pile body of different pile lengths under the same inclination angle

由图 6 可知: 开挖至 11 m 时, 3-3(长短桩分别为 15.0, 13.0 m), 2-3(长短桩分别为 14.4, 13.6 m), 1-3 最大桩身位移为 56.8, 40.6, 44.9 mm, 说明在长桩倾角为 10°时, 桩体支护效果随长短桩比值的增加先增强后减弱; 开挖至 12 m 时, 3-4, 2-4, 1-4 最大桩身位移为 56.8, 49.0, 43.8 mm, 说明长桩倾角为 15°时, 桩体支护效果随长短桩比值的增加而增强。由此可知, 在总桩长一定的情况下, 支护桩最佳桩长分配受倾角影响存在临界值, 当倾角小于临界值时最佳桩长分配受倾角变化影响, 当倾角在临界值以上时桩越长支护效果越好。

以开挖 8 m 深度为例, 不同长桩倾角下斜桩和直桩桩身水平位移 (D) 曲线如图 7。由图 7 可知: 在开挖面 8 m 以下, 不同长桩倾角下不同长短桩组合

的桩身水平位移基本相同; 在开挖面 8 m 以上, 倾角为 5°时斜桩和直桩在 3 种桩长分配下桩身位移 $D_{3-2} > D_{2-2} > D_{1-2}$; 倾角为 15°时, 斜桩和直桩在 3 种桩长分配下桩身位移 $D_{3-4} > D_{2-4} > D_{1-4}$, 说明长短组合桩形式在桩身水平位移控制效果上优于等长桩; 长桩倾角由 5°增至 15°时, 桩身 8 m 以上部分位移明显减小, 说明桩身水平位移与长桩倾角有关, 且改变长桩倾角在开挖面以上相对于开挖面以下对桩身位移的影响更大。

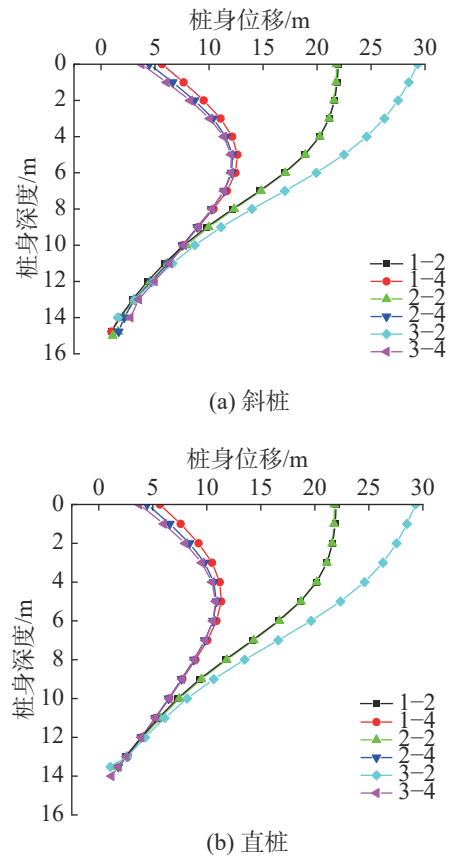


图7 不同倾角和桩长下的桩身水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of pile body under different inclinations and pile lengths

2.2.2 桩身最大位移

选择长桩倾角为 5°和 15°时不同桩长分配组合 (1-2, 2-2, 3-2; 1-4, 2-4, 3-4), 模拟研分析不同开挖深度下桩体最大位移, 结果如图 8。由图 8 可知, 开挖深度大于 2 m 后, 长桩倾角为 5°时组合桩的最大桩身位移相较 15°组大; 长桩 15.0 m、短桩 13.0 m (1-2, 1-4) 时, 1-2 桩身最大位移为 46.9 mm, 1-4 桩身最大位移为 19.8 mm, 长桩倾角由 5°增大至 15°, 桩身最大位移降幅为 57.8%, 此时支护桩位移变形明显减小。

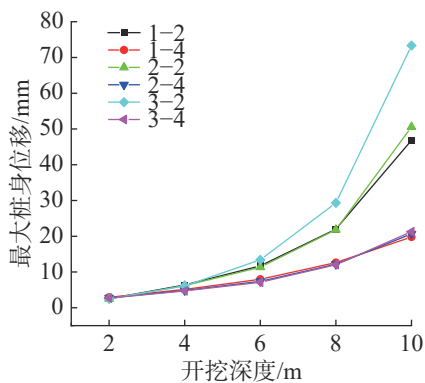
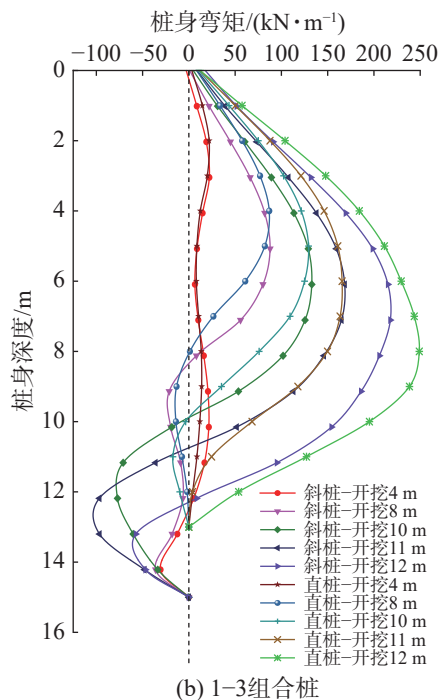


图8 不同开挖深度下的最大桩身位移

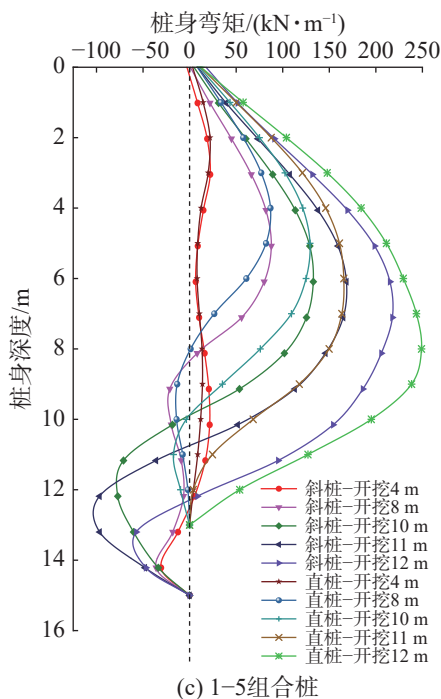
Fig. 8 Maximum displacement of pile body under different excavation depths

2.3 不同桩长分配下桩身弯矩

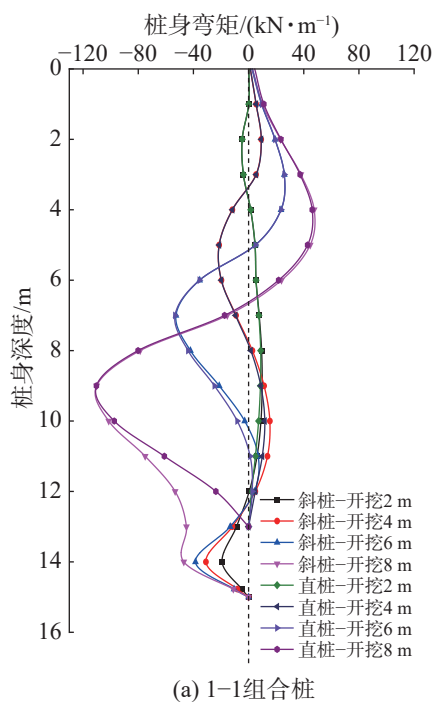
为了研究不同开挖深度下倾斜长短组合桩的桩身弯矩变化规律,选取长短桩长度比值(15.0/13.0)较大、长桩倾角分别 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 时组合桩(1-1, 1-3, 1-5)桩身弯矩 M 的模拟结果如图9,不考虑弯矩正负。由图9可知:在桩长分配和长桩倾角相同时,开挖面以上组合桩最大桩身弯矩随着开挖深度的增加而增加;在开挖面以下时,以开挖8 m为例,1-1, 1-3, 1-5斜桩和直桩的桩身最大弯矩 $M_{1-1} > M_{1-3} > M_{1-5}$,此时增大倾角能够减小桩身最大弯矩。



(b) 1-3组合桩



(c) 1-5组合桩



(a) 1-1组合桩

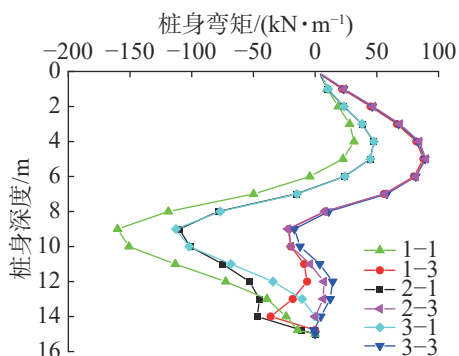
图9 不同开挖深度时的桩身弯矩

Fig. 9 Bending moment of pile body at different excavation depths

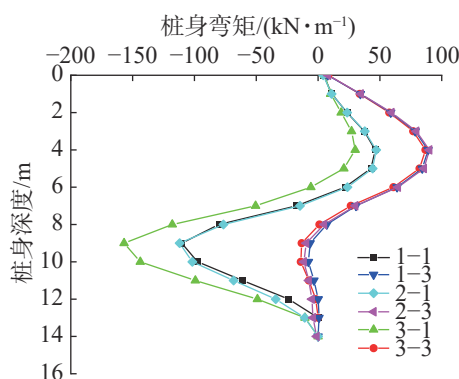
为了研究不同倾角下斜桩、直桩桩身弯矩变化规律,以开挖深度8 m为例,模拟分析长桩倾角为 $0^\circ, 10^\circ$ 下组合桩桩身弯矩 M ,结果如图10,不考虑弯矩正负。由图10可知:长桩倾角 0° 时,在开挖面8 m以上时,总桩长一定但桩长分配不同时斜桩与直桩桩身最大弯矩相差不大,在开挖面8 m以下时,长桩的最大弯矩 $M_{1-1} > M_{2-1} > M_{3-1}$,短桩桩身最大弯矩 $M_{3-1} >$

$M_{2-1} > M_{1-1}$; 倾角为 10° 时, 在 8 m 开挖面以下长桩桩身最大弯矩依次为 $M_{1-3} > M_{2-3} > M_{3-3}$, 短桩桩身最大弯矩 $M_{3-3} > M_{2-3} > M_{1-3}$ 。由此可见, 在开挖深度相同时, 开挖面以下部分桩身最大弯矩与桩长成正比。

综上所述认为: 倾斜长短组合桩结构相对于等长桩结构拥有更好的支护效果, 对于实际基坑支护设计, 建议采用长短倾斜组合桩支护, 可通过调整长短组合桩桩长分配和桩身倾角有效控制基坑的变形。



(a) 长桩(开挖深度8 m)



(b) 直桩(开挖深度8 m)

图10 不同倾角和不同桩长下的桩身弯矩

Fig. 10 Bending moment of pile body under different angles and lengths

3 结论

使用数值模拟方法, 模拟分析倾斜长短组合桩在总桩长相同的前提下, 基坑开挖过程中土体位移及支护结构水平位移和桩身弯矩的变化规律, 探讨通过合理分配桩长和调整长桩倾角优化基坑开挖支护效果, 得到的主要结论如下:

1) 随着基坑开挖深度的增加, 土体位移不断增大, 此时增加组合桩倾角有助于控制土体变形, 且在开挖深度越深时效果越明显。

2) 倾斜长短组合桩结构相对于等长桩结构可增加基坑的最大开挖深度, 且长桩倾角越大, 对桩顶

水平位移的限制越大, 有利于提升基坑的稳定性。但增大长桩倾角对于限制桩身水平位移存在临界值, 在倾角小于临界值时, 改变长桩倾角有助于控制桩身变形; 在临界值以上时, 增加桩长有更好的支护效果, 在实际工程中需要通过实验确定该倾角临界值以得出最优支护形式。

3) 在基坑开挖面以下, 增大长桩倾角有助于减小桩身最大弯矩, 同时在长桩倾角相同时, 桩长越长, 对控制桩身最大弯矩越不利。

基坑开挖过程中, 倾斜长短组合桩结构相对于等长桩结构拥有更好的支护效果, 对于实际基坑支护设计, 建议采用长短倾斜组合桩支护, 可通过调整长短组合桩桩长分配和桩身倾角有效控制基坑的变形。本文研究对于具体工程实践具有指导意义。

参考文献:

- [1] 李松, 马郎, 郭运, 等. 双排桩与单排桩组合多级支护结构在深大基坑中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5):103-109.
- [2] LIU L, WU R, CONGRESS S S C, et al. Design optimization of the soil nail wall-retaining pile-anchor cable supporting system in a large-scale deep foundation pit[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(7):2251-2274.
- [3] SALEEM M. Application of numerical simulation for the analysis and interpretation of pile-anchor system failure[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2016, 9(6):689-707.
- [4] XU X, HUANG Y. Parametric study of structural parameters affecting seismic stability in slopes reinforced by pile-anchor structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 147:106789.
- [5] ZHUANG H Y, YANG J, CHEN S. Seismic performance of underground subway station structure considering connection modes and diaphragm wall[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 127:105842.
- [6] HAN R B, XU C S, LIU D. Static pushover test of spring-underground structure system for seismic performance analysis of underground structure[J]. *Engineering Structures*, 2022, 271(4):114936.
- [7] ZHUANG H, WANG R, SHI P, et al. Seismic response and damage analysis of underground structures considering the effect of concrete diaphragm wall[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 116:278-288.
- [8] 陈林靖, 余其凤, 郑俊. 复合荷载作用下坡顶面双排桩设计要素数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5):1-10.
- [9] 刘伟煌. 基坑开挖下单排悬臂倾斜长短组合桩模型试验与数值模拟[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.

- [10] 刁钰, 苏奕铭, 郑刚. 主动式斜直交替倾斜桩支护基坑数值研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1):161-164.
- [11] 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]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 153-163.
- [12] WU Y B, YE J B, GE H B, et al. Numerical investigation of dual-row batter pile wall in deep excavation, mechanics of advanced materials and structures[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021, 28(17):1965268.
- [13] 杨征宇, 杨剑, 王天慧, 等. 输电塔基础斜桩非线性 p - y 曲线 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 104-108.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 夏琴, 石峰, 张红彬, 等. 某明挖车站基坑开挖过程监测与数值模拟 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4):388-395.
- [17] 王新泉, 陈永辉, 安永福, 等. 塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4):834-842.
- [18] 张松波, 赖国梁, 宋志, 等. 深基坑无支撑支护前排倾斜双排桩设计与应用分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1):228-234.
- [19] 周越洲, 李重阳, 李国清, 等. 软土地基倾斜桩竖向承载力研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8):274-281.
- [20] 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.

责任编辑: 闫芳芳