

DOI: 10.11779/CJGE202205005

# 斜直交替基坑支护桩现场实测及机理研究

刘畅<sup>1,2</sup>, 马力遥<sup>1</sup>, 郑刚<sup>1,2</sup>, 闫城东<sup>1</sup>, 杨宇航<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 斜直交替基坑支护结构是利用冠梁将交替布置的竖直悬臂桩与倾斜桩连接到一起形成的无支撑支护体系。已有工程实测表明, 斜直交替支护具有较好的抗倾覆和变形控制能力, 然而目前还缺乏从桩身受力的角度对斜直交替支护受力机理进行系统研究。结合天津市某基坑工程进行斜直交替支护桩现场监测, 首次对支护斜桩的桩身受力进行测试和分析, 在此基础上利用 PLAXIS 有限元软件进行数值建模, 对斜桩轴力发挥机理以及斜桩倾斜角度、斜直桩排布形式对支护性能的影响展开研究。结果表明, 斜直交替支护比单排倾斜桩和双排桩支护桩的桩身轴力更大, 斜桩对直桩存在着斜撑效应, 且斜撑效应对支护结构变形的控制效果明显, 斜撑效应的发挥主要来源于斜桩与被动区土体相对位移产生桩侧摩阻力; 同时发现增大斜桩倾斜角度有利于增强斜桩的斜撑效应, 使得支护桩侧移减小, 但同时支护桩的桩身最大正弯矩会增加; 此外, 在用桩量相同的情况下, 不同斜直桩组合及布置形式对支护变形影响较小, 采用一斜两直的布置形式, 能够在降低施工难度的同时减少直桩的受力。

**关键词:** 基坑支护; 斜直交替桩; 机理分析; 桩身轴力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0827-09

**作者简介:** 刘畅(1974—), 女, 副教授, 博士, 主要从事桩基础、基坑工程、地下工程研究工作。E-mail: lcl74@163.com。

## Field measurement and mechanism of inclined and vertical piles in foundation pits

LIU Chang<sup>1,2</sup>, MA Li-yao<sup>1</sup>, ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, YAN Cheng-dong<sup>1</sup>, YANG Yu-hang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The inclined and vertical support for foundation pits is a kind of unsupported support system, which is formed by using the crown beam to connect the vertical cantilever pile and the inclined pile. The measured results of the existing projects show that the inclined and vertical alternate support has better anti-overturning and deformation control capability. However, there is still a lack of systematic research on the mechanism of inclined and vertical alternate support from the perspective of pile stress. Based on the field tests on the inclined and vertical alternate support piles in a foundation pit project in Tianjin, the forces of the inclined pile are monitored and analyzed. On this basis, the numerical modeling is carried out by using the finite element software PLAXIS. The mechanism of the axial forces of the inclined pile and the influences of the inclined angle and the arrangement of the inclined and vertical piles on the supporting performance are studied. The results show that the axial forces of the pile shaft are greater than those of the single-row inclined piles and double-row support piles, and the effect of inclined support is obvious to the deformation control of the support structures. The effect of inclined support is mainly due to the relative displacement of the inclined pile and the soil in the passive area to produce the side friction resistance of the pile. At the same time, it is found that increasing the inclined angle of the inclined pile is conducive to the inclined support of the inclined pile, which makes the lateral displacement of the support pile decrease, but the maximum positive bending moment of the pile shaft will increase at the same time. In addition, under the same amount of piles, different arrangements of inclined and vertical piles have small influences on the deformation of the support. The arrangement of one inclined and two vertical piles can reduce the stress of the vertical pile and the construction difficulty.

**Key words:** foundation pit support; inclined and vertical pile; mechanism analysis; axial force of pile shaft

## 0 引言

随着城市的大规模建设, 基坑工程的数量和规模不断扩大, 面临的周边环境也随之复杂<sup>[1]</sup>。对于大面积基坑的开挖, 传统内支撑或桩锚的支护形式存在造

价高、工期长等问题, 而常用的无支撑支护如放坡、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 项目 (2010CB732106); 国家自然科学基金项目 (51108312)

收稿日期: 2021-03-09

悬臂排桩预留反压土等支护方法也存在支护结构变形较大等问题,仅适用于基坑深度较小的情况<sup>[2]</sup>。

将传统悬臂直桩倾斜一定角度可以形成倾斜桩支护,已有一些学者对倾斜桩支护进行了研究,研究表明倾斜桩支护相比直桩支护能更好地控制基坑开挖产生的桩身变形,并且能优化桩身的受力特性。倾斜桩支护也被应用于一些实际工程当中<sup>[3-8]</sup>。进一步将倾斜桩与直桩通过冠梁进行组合,形成斜直交替支护体系。目前,这种技术已经在几个基坑工程中尝试使用,实践表明其能有效控制支护结构的受力和位移,已有一些学者利用数值模拟和模型试验对倾斜桩与斜直交替桩等支护形式的受力变形特性进行了对比研究,结果表明斜直交替桩的抗变形能力优于单排倾斜桩<sup>[9-13]</sup>。斜直交替支护结构在无支撑支护中有较为明显的优势,但目前针对斜直交替支护的研究大多是对不同支护形式的支护桩桩身位移以及弯矩进行分析对比,对斜桩在支护结构中的受力分析不够深入,缺少对斜桩轴力发挥机制的探讨。对此,本文选取天津市某基坑工程进行斜直交替桩支护结构的现场试验,并结合有限元模拟计算与分析,对斜直交替支护的作用机理进行了探讨,并对不同斜桩倾角以及布桩方式对支护结构受力变形的影响进行了分析。

## 1 现场试验与有限元验证

### 1.1 试验概况

选取天津市津南区某基坑工程开展斜直交替桩支护的现场原位监测,该区域地层自上而下主要为素填土、黏土、淤泥质粉质黏土和粉质黏土,场地土层分布,参数如表1所示。

基坑开挖深度8 m,由于基坑开挖面积达39900 m<sup>2</sup>,周长达805 m,内支撑加排桩的支护形式经济性较差且工期长,宜采用无支撑支护形式,而场地区域的土层性质较差,在基坑开挖范围内存在5.8 m厚的淤泥质粉质黏土层,为了基坑变形控制要求,采用了

上部放坡2.5 m结合斜直交替桩的支护形式。

基坑平面布置如图1所示,东侧采用二级放坡支护,第一级土坡宽6 m,深4 m,留设5 m宽放坡平台,第二级土坡宽8 m,深4 m;基坑北、西、南三侧采用图2放坡+斜直交替预制桩支护的形式,其中放坡2.5 m,斜直交替桩挡土5.5 m,采用375 mm×500 mm预制矩形空心桩,桩长12 m,直桩入土深度6.6 m,相邻直桩与斜桩间距650 mm,斜桩向基坑内倾斜20°,桩顶设置1200 mm×600 mm帽梁连接斜桩及直桩形成整体三角形体系抵抗土压力。

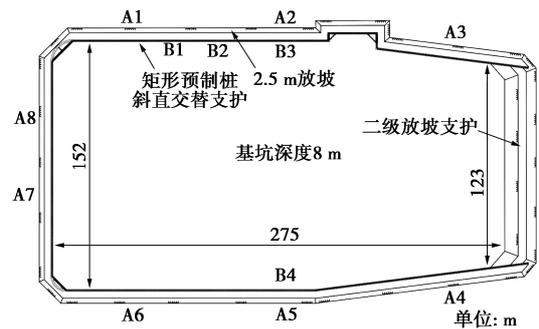


图1 基坑平面及监测布点图

Fig. 1 Plan of foundation pit and layout of monitoring points

现场试验测量主要包括基坑开挖引起的支护桩桩顶和桩身水平位移及桩身轴力,A1—A8为支护桩测斜点,B1—B4为支护桩轴力测点,每个测点包括斜直桩各一根。桩身轴力采用在预制桩空孔内固定焊接有钢筋应力计钢筋,并在孔内灌注混凝土的方式进行测量,测量位置分别对应图3桩身-1,-5.5,-8 m深度。桩身水平位移采用在预制桩空孔内放置测斜管的方法进行测量。

### 1.2 试验结果分析

基坑于2019年12月进行支护桩帽梁的施工,2020年1月10日进行坑内土体的开挖,由基坑中心位置同时向东西方向开挖,至1月19日,上部2.5 m放坡部分开挖完毕,此过程中A2,A5测点的桩顶水

表1 试验场地土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers in test site

土层	层厚 /m	含水率 w/%	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	压缩模量 E <sub>s1-2</sub> /MPa	直剪固结快剪	
						黏聚力 c <sub>cu</sub> /kPa	内摩擦角 φ <sub>cu</sub> (°)
① <sub>2</sub> 素填土	2.4	30.59	18.6	0.94	3.59	20.51	11.72
③ <sub>1</sub> 黏土	1.7	32.87	18.7	0.96	3.91	16.47	12.69
⑥ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	5.8	36.17	18.5	1.03	3.68	14.80	12.94
⑥ <sub>2</sub> 粉质黏土	5.0	29.80	19.2	0.84	4.93	16.99	18.62
⑥ <sub>3</sub> 粉土	0.8	24.74	19.9	0.70	11.73	7.87	31.12
⑦粉质黏土	2.3	23.43	20.1	0.66	5.44	18.82	17.21
⑧ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.5	23.19	20.2	0.67	5.52	22.68	14.16
⑧ <sub>2</sub> 粉砂	3.2	17.26	20.9	0.52	13.68	5.15	35.47
⑨ <sub>1</sub> 粉质黏土	4.0	23.82	20.1	0.68	5.56	21.22	16.41
⑨ <sub>2</sub> 粉砂	5.2	21.67	20.3	0.62	13.27	5.84	32.83
⑩ <sub>2</sub> 粉砂	8.4	21.55	20.2	0.63	14.30	5.64	33.79

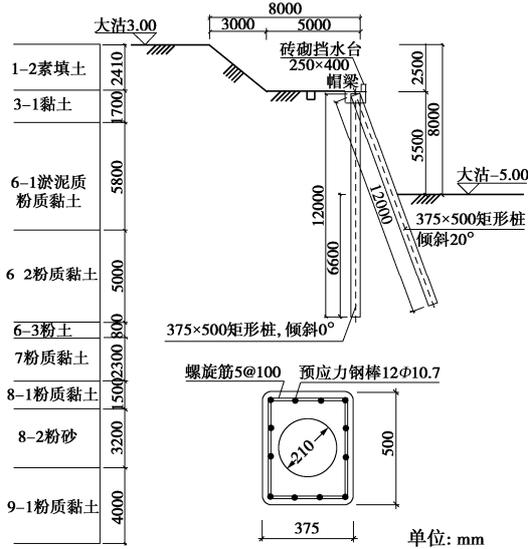


图 2 基坑剖面图

Fig. 2 Profile of foundation pit

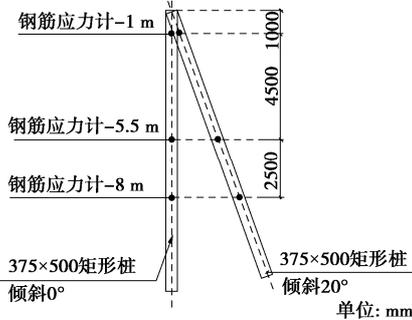


图 3 钢筋应力计位置

Fig. 3 Position of bar stress meters

平位移小幅增加。后续 3 月 9 日—3 月 28 日进行基坑剩余 5.5 m 开挖, 基坑开挖完成时如图 4, 在开挖过程中各测点的桩顶水平位移增量较为明显, 在基坑开挖结束后, 桩顶水平位移逐渐趋于稳定。基坑各测点桩顶水平位移随开挖的变化曲线如图 5 所示, 桩顶最大水平位移为 17 mm。



图 4 20° 斜直交替桩

Fig. 4 Inclined and vertical alternate piles with angle of 20°

整理基坑开挖结束时各测点处支护桩测斜结果如图 6, 斜直交替桩的桩身变形模式不同于传统悬臂排桩支护<sup>[14]</sup>, 直桩和斜桩的最大侧移均发生在距离桩顶 4 m 左右深度处, 与带水平支撑的支护结构变形模式类似。其中 A5 测点处的支护桩变形最大, 直桩最

大侧移为 24.3 mm, 斜桩最大侧移为 22.9 mm, 表明斜直交替支护桩在此基坑中的支护效果较好, 可以有效控制软土基坑的变形。

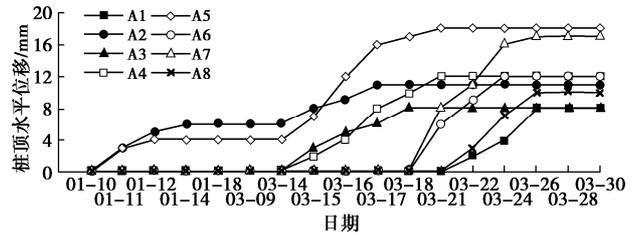


图 5 桩顶水平位移随开挖的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of horizontal displacement at pile top with excavation

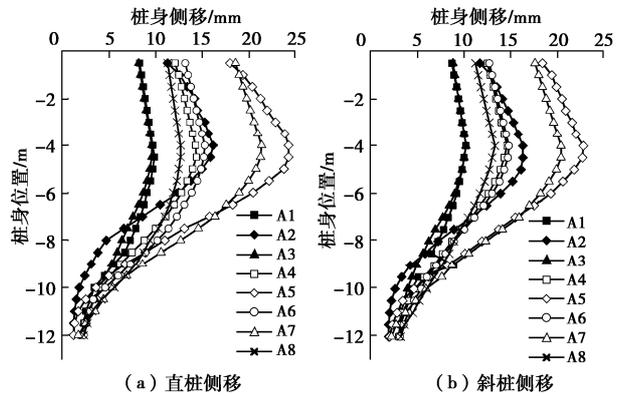


图 6 桩身水平位移曲线

Fig. 6 Curves of horizontal displacement of piles

图 7 是基坑开挖结束时的支护桩桩身轴力曲线。开挖结束时斜直交替支护的直桩受拉, 斜桩受压, 且斜桩所受的压力在坑底以下变化较大, 随深度增加不断减小。

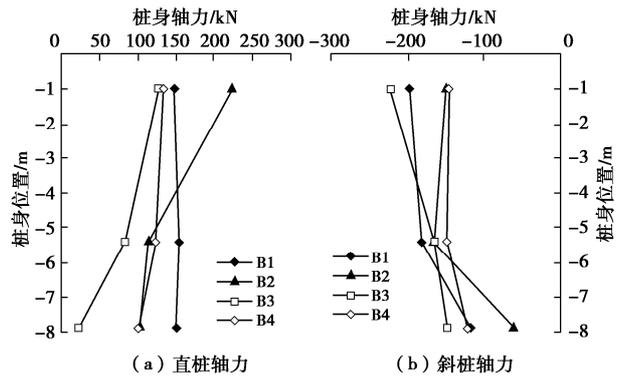


图 7 桩身轴力曲线

Fig. 7 Curves of axial force of pile shaft

### 1.3 有限元建模及参数

采用 Plaxis2D 有限元软件对基坑的开挖过程进行数值分析, 建立图 8 所示平面应变模型, 并按对称性取基坑宽度的一半进行分析。模型左侧边界与支护桩水平距离取为 40 m, 约 5 倍基坑开挖深度。模型侧面边界设置水平向约束, 底面边界设置水平和竖向约束。土体本构模型采用小应变土体硬化模型 (HSS 模型)<sup>[15-16]</sup>, 土层计算参数见表 2。

表2 土体材料计算参数

Table 2 Parameters of soil materials

土层名称	厚度 /m	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$c_{cu}$ /kPa	$\phi_{cu}$ /( $^{\circ}$ )	$E_{50}$ /MPa	$E_{oed}$ /MPa	$E_{ur}$ /MPa	$G_{0ref}$ /MPa
① <sub>2</sub> 素填土	2.4	18.6	20.51	11.72	3.8	3.8	26.6	106.4
③ <sub>1</sub> 黏土	1.7	18.7	16.47	12.69	4.1	4.1	28.7	114.8
⑥ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	5.8	18.5	14.80	12.94	3.8	3.8	30.4	121.6
⑥ <sub>2</sub> 粉质黏土	5.0	19.2	16.99	18.62	5.1	5.1	35.7	142.8
⑥ <sub>3</sub> 粉土	0.8	19.9	7.87	31.12	12.5	12.5	62.5	187.5
⑦粉质黏土	2.3	20.1	18.82	17.21	5.6	5.6	39.2	156.8
⑧ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.5	20.2	22.68	14.16	5.7	5.7	39.9	159.6
⑧ <sub>2</sub> 粉砂	3.2	20.9	5.15	35.47	14.5	14.5	72.5	217.5
⑨ <sub>1</sub> 粉质黏土	4.0	20.1	21.22	16.41	5.7	5.7	39.9	159.6
⑨ <sub>2</sub> 粉砂	5.2	20.3	5.84	32.83	13.9	13.9	69.5	208.5
⑩ <sub>2</sub> 粉砂	13.0	20.2	5.64	33.79	14.8	14.8	74.0	222.0

斜直交替支护桩的直桩按截面等刚度原则等效为板单元模拟，等效厚度取为 328 mm，重度为 25  $\text{kN}/\text{m}^3$ ，弹性模量为 38 GPa，泊松比取 0.2；斜桩采用嵌固式梁单元进行模拟，斜桩与直桩顶部设置为刚性连接模拟帽梁作用。基坑施工过程按照实际施工顺序进行模拟。

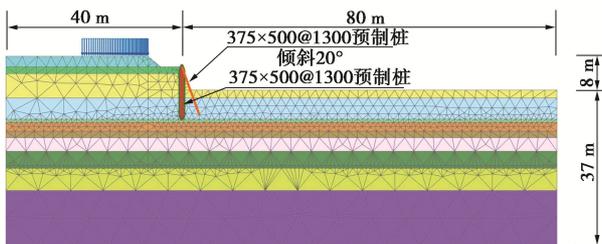
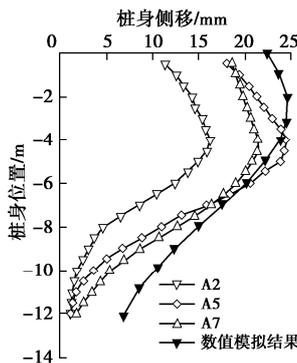


图8 有限元计算模型

Fig. 8 Finite element model

### 1.4 工程实测与数值模拟结果对比分析

图9为基坑开挖结束时，斜直交替支护桩变形和轴力实测值与数值计算结果的对比，数值模型计算的直桩桩身水平位移与现场试验实测结果较为接近，直桩的变形类似于带水平支撑的排桩支护，且计算与实测结果的桩身轴力均为斜桩受压力，直桩受拉力，两种结果规律一致，说明该数值分析方法可靠且适用于进一步建立模型来进行斜直交替支护形式的机理研究。



(a) 直桩桩身侧移

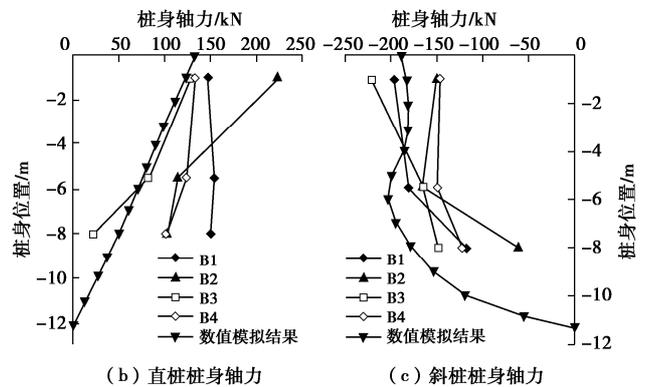


图9 数值模拟结果与实测结果对比

Fig. 9 Comparison between numerical and measured results

## 2 斜直交替支护受力变形规律及作用机理分析

### 2.1 斜直交替支护结构作用机理

目前针对斜直交替支护的研究表明斜直交替支护结构受力机理存在三大支护效应<sup>[7]</sup>，分别是图10所示刚架效应、重力效应和斜撑效应。刚架效应指斜直交替支护桩通过桩顶冠梁连接形成三角形的刚架支护体系，从而提高支护结构的稳定性及抗变形能力；重力效应指支护桩之间的土体可以平衡部分倾覆力矩，提升支护结构的稳定性；斜撑效应是指斜桩通过桩侧摩擦阻力的发挥来传递支撑力，起到类似于斜撑的作用。这三种支护效应的共同作用使得斜直交替支护的稳定性和抗变形能力提高。

### 2.2 斜直交替桩的斜撑效应分析

为了进一步分析斜直交替支护结构的受力变形规律和斜撑效应的作用，将斜直交替支护与单排悬臂支护、单排倾斜桩支护、双排桩支护的桩身变形和受力进行对比，有限元模型尺寸和土层参数仍然采用模拟现场试验的数值模型，保持不同支护形式的单位长度用桩量和桩长不变，如图11所示。其中单排桩支护的桩间距为0.65 m，双排桩支护和斜直交替支护的桩

间距为 1.3 m, 为了保证双排桩支护和斜直交替支护的桩间土范围相同, 双排桩的排距设为 2 m.

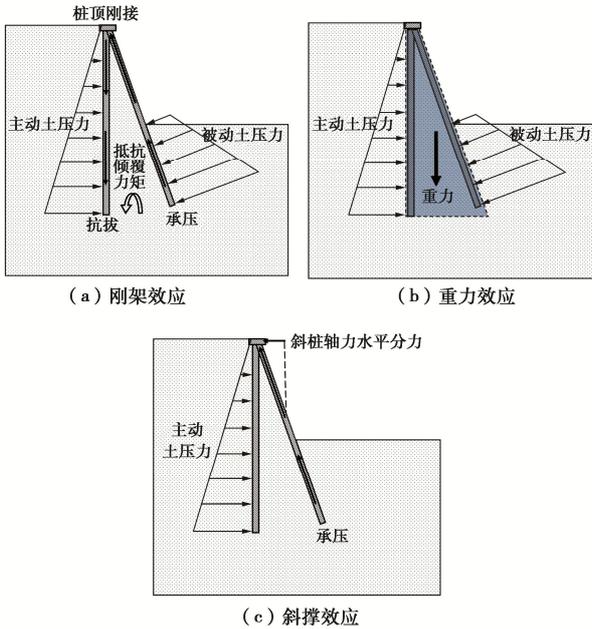


图 10 斜直交替支护作用机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of action mechanism of inclined and vertical alternate support

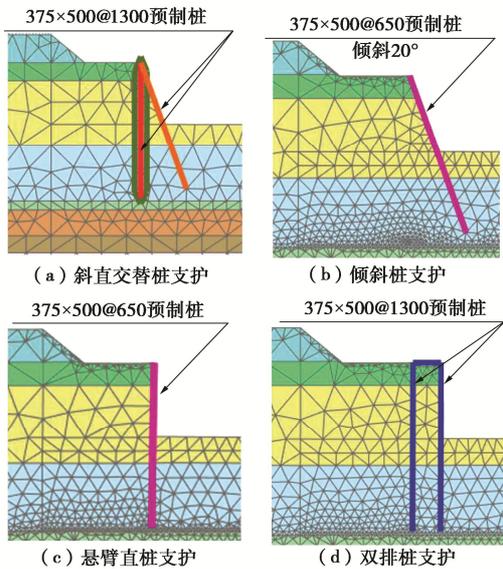


图 11 计算模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of model

将基坑开挖结束时不同支护形式的桩身水平位移和弯矩结果整理至图 12. 单排倾斜桩与悬臂直桩的弯矩只出现在背靠基坑一侧, 而双排桩支护与斜直交替支护的桩身弯矩存在反弯点, 弯矩的分布更类似于带内支撑的排桩支护, 这是由于双排桩支护和斜直交替支护都是通过连梁或冠梁将两排支护桩桩顶刚接, 形成能够抵抗侧向力的刚架, 从而使得支护桩在侧向土压力的作用下产生反弯点.

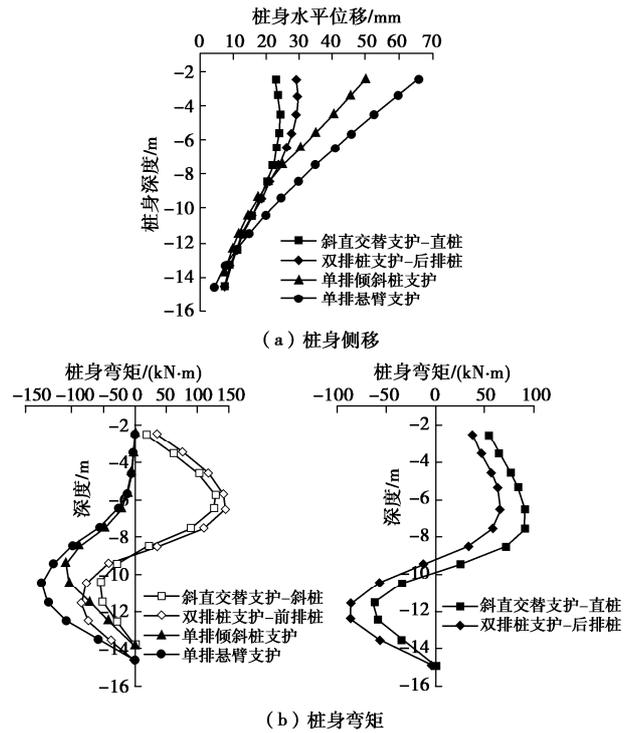


图 12 不同支护形式的桩身侧移和弯矩曲线

Fig. 12 Curves of lateral displacement and bending moment of piles with different support forms

在图 13 不同支护形式的桩身轴力中, 除斜直交替支护直桩和双排桩支护后排桩受拉力外, 其余支护桩桩身均产生轴向压力, 其中单排倾斜桩和悬臂直桩所受轴向压力较斜直交替支护斜桩和双排桩支护前排桩小, 且在桩顶处的轴力接近于 0. 对比双排桩支护和斜直交替支护, 两者均可通过后排桩(直桩)受拉, 前排桩(斜桩)受压形成抵抗支护结构倾覆的力偶<sup>[18]</sup>, 发挥支护结构的刚架效应, 从而提高支护结构的抗变形能力和稳定性; 斜直交替支护的斜桩与直桩均在开挖结束时产生了较大的桩身轴力, 其中斜桩作用在冠梁上的轴力可以在直桩桩顶产生较大的水平分力, 起到水平支撑的作用, 即产生斜撑效应.

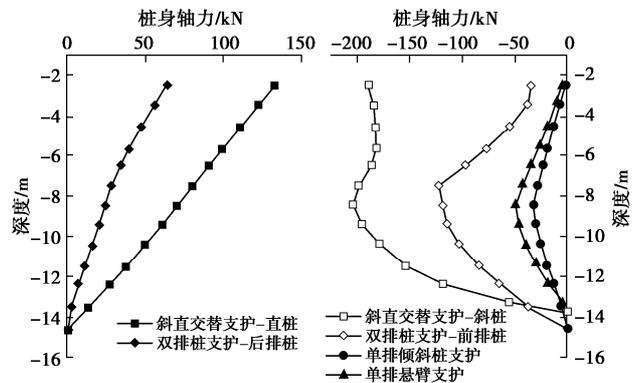


图 13 不同支护形式的桩身轴力曲线

Fig. 13 Curves of axial force of piles with different support forms

斜直交替支护斜撑效应的发挥主要是靠斜桩与开挖面以下土体相对位移产生桩侧摩阻力，由于桩体发挥侧摩阻力需要的桩土相对位移较小，所以斜撑效应能够在支护结构变形较小的时候得以发挥，起到平衡部分主动区土压力的作用。图 14 中斜桩的侧摩阻力还会对桩周土体产生反作用力，此反作用力与坑内土体隆起的方向相反，所以斜撑效应的发挥还能限制坑内土体的隆起，从而减小基坑的整体变形，提高支护结构的整体稳定性。本次数值模拟基坑开挖结束时的斜桩桩顶处轴力为 189.2 kN，相当于提供 64.7 kN 的水平分力，合算到每延米为 49.7 kN/m，斜撑效应的发挥较为明显，此时斜直交替支护的桩身水平位移和坑底隆起最大值均小于其余 3 种支护形式，说明斜撑效应能显著起到减小坑底隆起以及支护结构变形的作用。

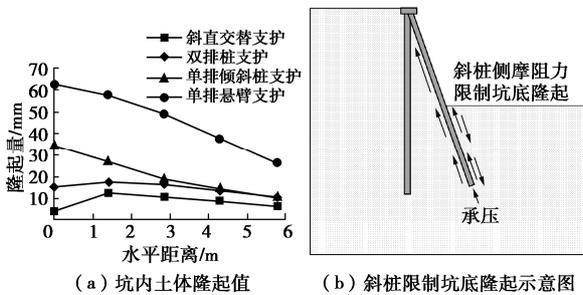


图 14 不同支护形式的坑内土体隆起

Fig. 14 Soil uplift in fondation pit with different support forms

### 3 斜桩轴力发挥机制分析

为了探究斜直交替支护中斜桩轴力的分布规律，在保持有限元模型尺寸不变的前提下建立斜桩桩侧极限摩阻力为 40, 80, 120 kPa 的数值分析模型，分别对应斜桩桩底处土体为淤泥质黏土、粉质黏土和粉砂，另外还补充对比了桩侧极限摩阻力为 0 kPa 时的结果，研究斜桩侧摩阻力的发挥对斜直交替支护桩的影响。

如图 15 当斜桩侧壁完全光滑时，斜直交替支护的变形较桩侧有摩阻力的情况明显增大，桩身的变形模式也近似于悬臂排桩支护的变形模式。对比图 16 中桩侧极限摩阻力为 40, 80, 120 kPa 时的斜直交替桩斜桩的桩身轴力和侧摩阻力，可以看出随着桩侧极限摩阻力的增大，斜桩靠近桩端处的侧摩阻力明显增大。

对比单排倾斜桩与斜直交替桩的轴力可以看出，在桩侧最大摩阻力为 80 kPa 时，斜直交替支护的斜桩最大轴力是单排倾斜桩支护的 3 倍以上，且单排倾斜桩在坑底以上部分的斜桩轴力随深度减小而减小，桩顶处的轴力接近于 0。

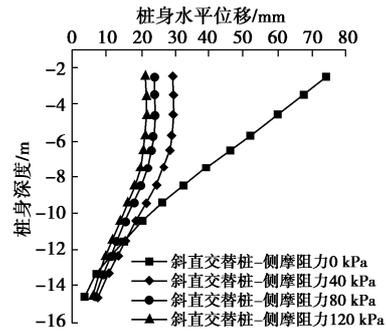


图 15 不同斜桩最大侧摩阻力的直桩桩身侧移图

Fig. 15 Horizontal displacements of piles with different maximum side frictions

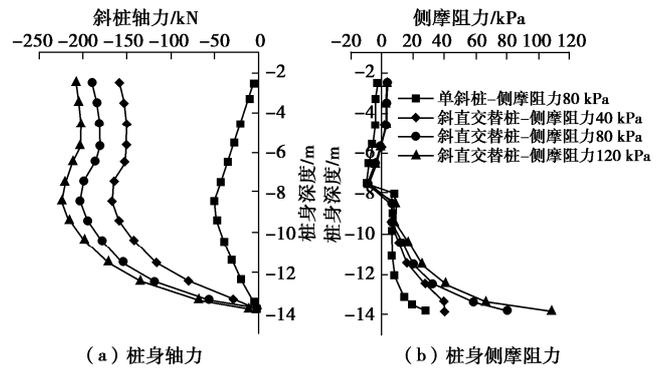


图 16 不同最大侧摩阻力的斜桩桩身轴力与侧阻力

Fig. 16 Axial forces and lateral resistances of inclined pile with different maximum lateral frictions

提取斜直交替支护的斜桩桩身以及周围土体的竖向位移至图 17 (a)，将桩周土体和桩身的竖向位移进行对比，斜桩在-11.5 m 深度以下部分的桩身位移向下，-11.5 m 以上部分的桩身竖向位移向上，这表明斜桩在开挖变形过程中绕-11.5 m 深度处产生顺时针旋转的趋势。斜桩周围土体除了桩底附近后侧土体产生沉降外，其余部分土体均产生向上的位移，斜桩前侧土体在坑底附近处产生较大的隆起。桩后侧土在-5~-8 m 深度处产生相对桩身向下的竖向位移，斜桩在此处受到负侧摩阻力作用。

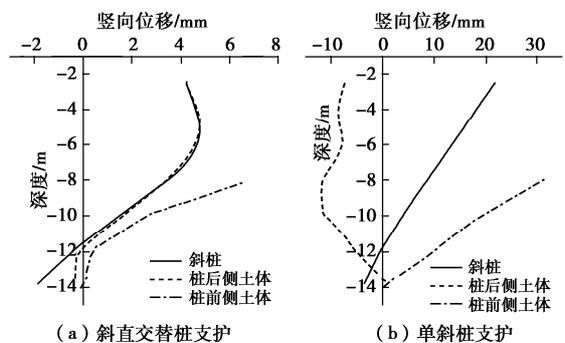


图 17 斜桩与桩周土体的竖向位移

Fig. 17 Vertical displacements of inclined pile and soil around pile  
由图 18, 19 斜直交替支护的土体竖向位移云图和总位移矢量图可看出，直桩桩后侧土体产生沉降变

形, 桩间土体大部分产生回弹, 仅在靠近斜桩桩底处有小部分土体产生沉降, 回弹进一步抑制了围护结构位移。斜桩桩后侧的土体位移与斜桩自身的总位移近乎相同, 所以斜桩轴力的产生的主要原因为斜桩与桩前侧的土体发生相对位移, 影响轴力大小的因素主要有坑底以下土体的桩极限侧阻力和桩土相对位移量。

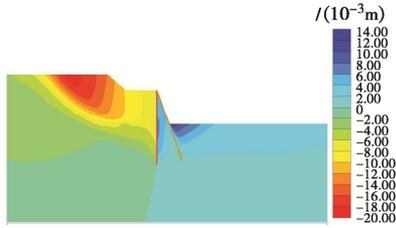


图 18 斜直交替支护的土体竖向位移云图

Fig. 18 Nephogram of vertical displacement of soil mass with inclined and vertical alternate support

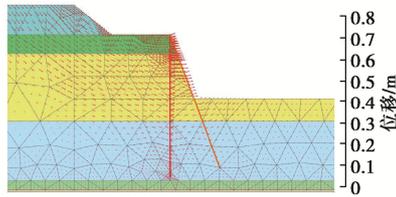


图 19 斜直交替支护的土体总位移矢量图

Fig. 19 Vector diagram of total displacement of soil mass with inclined and vertical alternate support

当采用单排斜桩支护时, 斜桩的桩身轴力在坑底处达到最大值, 提取桩周土体竖向位移至图 17 (b), 图中斜桩后侧土体产生沉降, 前侧土体产生回弹, 这就使得在坑底以上的斜桩产生负摩阻力, 因此在坑底以上部分, 单斜桩支护的斜桩桩身轴力随深度减小而减小。

综上可以得出结论, 斜直交替支护相比单斜桩支护能更有效的发挥斜桩轴向抗压的能力, 利用斜桩的斜撑作用抵抗整个支护体系的变形, 并且坑底土体对应的桩极限侧阻力增大能进一步提高斜桩轴力, 从而更好地发挥斜桩的斜撑作用, 因此实际工程中可以考虑采取提高桩土间摩阻力的措施来充分发挥斜桩的斜撑效应, 以减小斜直交替支护变形。

#### 4 斜直交替支护的参数优化分析

##### 4.1 斜桩倾角对斜直交替支护的影响分析

保持有限元模型尺寸不变, 改变斜桩倾斜角度为 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 探究斜直交替支护不同斜桩倾斜角度的受力与变形规律。

整理基坑开挖结束后支护桩变形和受力结果至图 20 和表 3。斜桩倾斜 10°, 15°, 20°, 25°, 30° 时直桩桩顶水平位移相较于倾斜 5° 时分别减小了 26.6%, 48.6%, 66.2%, 73.9%, 79.4%。当斜桩倾斜

角度小于 20° 时, 直桩桩身最大水平位移出现在桩顶处; 当斜桩倾斜角度大于等于 20° 时, 直桩桩身最大水平位移出现在桩顶以下、坑底以上位置, 且最大位移所在深度随斜桩倾斜角度增大而增大。斜桩倾斜角度的增加能明显减小桩顶水平位移, 但位移的减小速率随斜桩倾斜角度增加而减小。

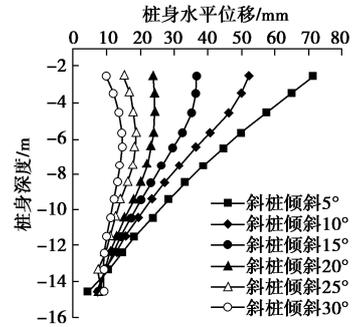


图 20 不同斜桩倾角时的直桩桩身水平位移图

Fig. 20 Horizontal displacements of vertical pile with different inclined angles

表 3 不同斜桩倾角的支护桩桩身最大轴力与弯矩

Table 3 Maximum axial forces and bending moments of support piles with different inclined angles

斜桩倾角/(°)	桩身最大正弯矩/(kN·m)		桩身最大负弯矩/(kN·m)		斜桩最大轴力/kN	直桩最大轴力/kN
	斜桩	直桩	斜桩	直桩		
5	70.4	8.1	-169.3	-164.4	-87.5	73.5
10	116.8	34.4	-117.7	-109.8	-112.9	95.6
15	134.3	74.3	-71.5	-80.7	-151.8	112.0
20	130.0	90.9	-54.2	-62.1	-203.7	133.1
25	92.1	115.6	-40.0	-40.6	-224.1	143.0
30	63.4	150.3	-21.4	-18.7	-235.3	151.1

表 3 中随着斜桩倾斜角度增加, 直桩和斜桩的桩身轴力均逐渐增大, 且斜桩桩身最大压力大于直桩桩身最大拉力。当斜桩倾斜角度小于 20° 时, 随着斜桩倾斜角度增大, 直桩和斜桩的桩身最大负弯矩逐渐减小, 最大正弯矩逐渐增大, 反弯点位置下移至开挖面以下。当斜桩倾斜角度大于等于 20° 时, 直桩的最大负弯矩减小, 最大正弯矩增大, 斜桩的最大负弯矩和正弯矩都逐渐减小, 这主要是因为当斜桩倾角较大时, 嵌固深度减小, 斜桩自身作为支护桩的支护效果减弱, 但由于倾斜角度的增大, 斜撑效应增强。

综合以上桩身变形和内力变化规律可知, 斜直交替支护中斜桩倾斜 20° 是一个较为合理的角度, 此时斜桩起到了斜撑和支护桩的双重作用, 占用基坑内部较小空间的同时起到了较好的变形控制效果, 且此时的支护桩桩身所受正负弯矩分布较为均匀, 能在一定程度上降低工程造价。

##### 4.2 斜直桩排布方式对斜直交替支护的影响分析

采用 Plaxis3D 有限元软件建立图 21 所示不同斜直桩排布方式的数值模型。固定相邻两预制桩间距为

0.65 m, 斜桩倾斜  $20^\circ$ , 土体本构模型采用小应变土体硬化模型, 土层选用天津典型 $\text{C}_2$ 粉质黏土单一土层, 斜直交替支护桩均采用桩单元模拟, 顶部冠梁采用梁单元模拟, 分别计算一斜两直、一斜一直、两斜一直、三斜一直 4 种斜直桩排布方式的桩身内力和变形。

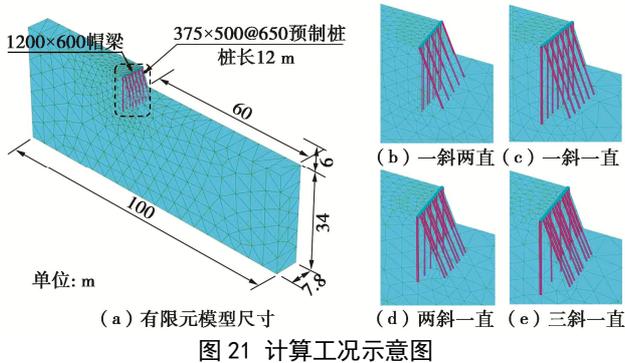


图 21 计算工况示意图

Fig. 21 Schematic diagram of calculation conditions

将计算结果汇总至表 4。4 种排布形式中两斜一直交替支护的直桩桩身水平位移最小, 与桩身变形最大的一斜两直支护相比减小了 4.4 mm (15.9%), 斜直桩排布形式对支护桩的变形存在一定影响但影响较小。将斜桩轴力全部相加并折算成每延米的斜桩轴力, 以衡量不同布置形式的斜撑效应, 由结果可以发现相邻两直桩之间斜桩数量越多, 每延米斜桩轴力越大。三斜一直交替支护的每延米斜桩轴力是一斜两直交替支护的 1.67 倍, 但同时其直桩最大正弯矩是一斜两直交替支护的 1.37 倍, 这是由于三斜一直交替支护的相邻直桩间隔距离较大, 导致斜直桩对桩间土的约束作用减弱, 并且由于直桩数量少, 使得其单根直桩所受最大弯矩大于其余工况下的直桩弯矩, 这也导致三斜一直交替支护的桩身变形控制效果不如一斜一直和两斜一直交替支护。可见在总桩量相同的情况下增加斜桩数量不能明显减小支护结构变形, 反而会增大直桩所受弯矩。因此实际工程中可以优先选用一斜一直的形式, 变形要求松一点时可采用一斜两直的支持形式, 能够在降低施工难度的同时减少直桩的受力。

表 4 不同斜直桩排布形式的桩身受力与变形

Table 4 Stresses and deformations of piles with different arrangements of inclined and vertical piles

斜直桩排布方式	直桩弯矩/(kN·m)		每延米的斜桩轴力/(kN·m <sup>-1</sup> )	直桩最大水平位移/mm
	最大负弯矩	最大正弯矩		
一斜两直	-112.7	125.2	-113.731	27.6
一斜一直	-93.1	136.3	-143.667	24.1
两斜一直	-104.9	149.8	-171.154	23.2
三斜一直	-125.5	171.3	-190.179	25.9

## 5 结 论

(1) 斜直交替支护的斜桩由于倾角的存在, 桩

身轴力的水平分力能在桩顶处为直桩提供水平支撑作用, 产生斜撑效应。斜撑效应的发挥主要是靠斜桩与开挖面以下土体相对位移产生桩侧摩阻力, 使得斜桩能够在支护结构变形较小时产生较大的桩身轴力, 同时斜桩的侧摩阻力还会对桩周土体产生反作用力, 限制坑内土体的隆起, 从而减小基坑的整体变形, 提高支护结构的整体稳定性。

(2) 坑底土体对应的桩极限侧阻力的增大能进一步提高斜桩轴力, 从而更好地发挥斜桩的斜撑作用, 实际工程中可以考虑采取加固开挖面以下土体以提高桩土间摩阻力的措施来充分发挥斜桩的斜撑效应, 以减小斜直交替支护变形。

(3) 斜直交替支护的斜桩倾角对支护结构的变形有显著影响, 当斜桩倾角由  $5^\circ$  增加至  $30^\circ$  时, 斜直交替支护的直桩最大水平位移减少了 56.6 mm, 减小了 79.4%。斜桩倾角越大, 斜桩提供的水平分力越大, 斜直交替支护中的斜撑作用也就越强, 同时随着斜桩倾角增大, 直桩的桩身最大正弯矩增大, 负弯矩减小。斜直交替支护中斜桩倾斜  $20^\circ$  是一个较为合理的角度, 此时斜直交替支护占用较小空间的同时起到了较好的变形控制效果, 且斜桩桩身所受正负弯矩分布较为均匀, 能在一定程度上降低工程造价。

(4) 在总用桩量相同的情况下, 不同斜直桩布置形式的支护结构变形相差较小。斜桩数量越多, 支护的斜撑作用越强, 但同时相邻直桩的距离增大, 斜直桩对桩间土的约束作用降低, 直桩所受弯矩越大。因此实际工程中可以优先选用一斜一直的形式, 变形要求相对宽松时可采用一斜两直的支持形式, 能够在降低施工难度的同时减少直桩的受力。

## 参考文献:

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24. (ZHENG Gang, ZHU He-hua, LIU Xin-rong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24. (in Chinese))
- [2] 陈昆, 闫澍旺, 张智, 等. 不同内支撑支护体系对深基坑开挖变形的影响分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(增刊 1): 1-6. (CHEN Kun, YAN Shu-wang, ZHANG Zhi, et al. Impact analysis of deep foundation pit excavation under different bracing system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(S1): 1-6. (in Chinese))
- [3] 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. (GUO Jian-zhi, CAO Hua-xian. Batter pile

- strutted deep foundation pit[J]. Guangzhou Architecture, 1997, **25**(2): 38 - 41. (in Chinese))
- [4] MAEDA T, SHIMADA Y, TAKAHASHI S, et al. Design and construction of inclined-braceless excavation support applicable to deep excavation[C]// International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, Paris.
- [5] 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. (KONG De-sen, ZHANG Qiu-hua, SHI Ming-chen. Study on the bearing behavior charactersitics of cantilever inclined retaining pile for foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(4): 742 - 747. (in Chinese))
- [6] 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**(增刊2): 408 - 411. (KONG De-sen, ZHANG Qiu-hua, SHI Ming-chen. Numerical simulation of model tests on inclined retaining piles in foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 408 - 411. (in Chinese))
- [7] 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. (KONG De-sen, ZHANG Jie, WANG Shi-quan, et al. Experimental study on stress and deformation characteristics of cantilever inclined retaining pile for foundation pit support[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(1): 160 - 168. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 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**(增刊1): 39 - 45. (ZHENG Gang, BAI Ruo-xu. Behaviors study of inclined single row contiguous retaining piles under horizontal force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 39 - 45. (in Chinese))
- [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**(增刊1): 161 - 164. (DIAO Yu, SU Yi-ming, ZHENG Gang. Numerical study on oblique-straight alternate piles for active support of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 161 - 164. (in Chinese))
- [11] 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**(增刊1): 73 - 76. (WANG En-yu, ZHOU Hai-zuo, ZHENG Gang, et al. Numerical analyses of deformation of inclined pile-retained excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 73 - 76. (in Chinese))
- [12] 刘涛. 倾斜桩在基坑支护中的作用机理和简化计算方法[D]. 天津: 天津大学, 2018. (LIU Tao. The Function Mechanism and Simplified Calculation Method of Inclined Pile in Foundation Pit Support[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [13] 张秋华. 基坑支护倾斜桩的受力变形特性及其影响因素分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2012. (ZHANG Qiu-hua. Analysis of Deformation Characteristics and Influencing Factors of Inclined Pile in Foundation Pit Support[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(5): 758 - 767.
- [15] JARDINE R J, POTTS D M, FOURIE A B, et al. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. Géotechnique, 1986, **36**(3): 377 - 396.
- [16] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊1): 166 - 172. (YIN Ji. Application of hardening soil model with small strain stiffness in deep foundation pits in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 166 - 172. (in Chinese))
- [17] 郑刚, 何晓佩, 周海祚, 等. 基坑斜-直交替支护桩工作机理分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊1): 97 - 100. (ZHENG Gang, HE Xiao-pei, ZHOU Hai-zuo, et al. Working mechanism of inclined-vertical retaining piles in excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 97 - 100. (in Chinese))
- [18] 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**(增刊1): 93 - 98. (XU Yuan, ZHENG Gang, LU Ping. Behaviors of double-row contiguous retaining piles with raking front-row piles under horizontal loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 93 - 98. (in Chinese))