

DOI: 10.11779/CJGE2019S1025

基坑斜-直交替支护桩工作机理分析

郑刚^{1,2}, 何晓佩^{1,2}, 周海祚^{1,2}, 王恩钰^{1,2}, 杨石飞³, 魏建华³

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学土木工程系, 天津 300072;

3. 上海勘察设计院(集团)有限公司, 天津 300072)

摘要: 在基坑工程中, 可将部分竖直悬臂支护桩倾斜一定角度后形成倾斜桩, 利用冠梁连接交替布置的竖直悬臂桩与倾斜桩可形成基坑斜-直交替支护体系。已有工程实测表明, 基坑斜-直交替支护桩具备良好的抗倾覆和变形控制能力; 然而, 目前尚缺乏对其工作机理的认识。提出了基坑斜-直交替支护桩的3个工作机理效应, 即: 刚架效应、斜撑效应和重力效应。以支护结构变形和坑外土体沉降为评价标准, 对3项效应进行分析。结果表明: ①由于冠梁的连接作用, 斜桩与直桩形成一个整体刚架体系, 可有效减小桩身和土体变形; ②斜桩侧壁摩擦是斜桩对直桩支撑力发挥的关键因素, 若斜桩侧壁光滑, 基坑斜-直交替支护桩的支护能力与悬臂直桩几乎相同; ③斜直桩桩间土与支护体系形成一个整体, 可一定程度提高支护体系抵抗基坑变形的能力。

关键词: 斜-直交替支护桩; 机理分析; 刚架效应; 斜撑效应; 重力效应

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0097-04

作者简介: 郑刚(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

Working mechanism of inclined-vertical retaining piles in excavations

ZHENG Gang^{1,2}, HE Xiao-pei^{1,2}, ZHOU Hai-zuo^{1,2}, WANG En-yu^{1,2}, YANG Shi-fei³, WEI Jian-hua³

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

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Tianjin 300072, China)

Abstract: In excavation engineering, an inclined-vertical retaining pile system can be formed by connecting the cantilever piles and the inclined piles. The previous case histories indicate that the inclined-vertical retaining piles have the advantage in overturning resistance and deformation control. However, the insight into the working mechanism of inclined-vertical retaining piles is limited. Three mechanisms are proposed in this investigation, that is, frame effect, supporting effect, and gravity effect. Taking the deformation of retaining structures and the ground settlement as the criteria, the contribution of these work mechanisms is analyzed. The results indicate that (1) The formed frame system can significantly decrease the structural deformation and ground settlement. (2) the side friction in inclined piles is vital to the supporting effect on the cantilever piles. (3) the soil between the inclined and vertical piles has a limited effect on the structural deformation.

Key words: inclined-vertical pile; mechanism analysis; frame effect; supporting effect; gravity effect

0 引言

近年来, 伴随着地下工程的大量兴建, 基坑施工成为地下空间开发的重要技术。通常, 基坑工程中的支护方式有内支撑结构、桩锚结构、放坡明挖、悬臂支护等。其中, 内支撑^[1]与桩锚支护形式施工复杂, 工期较长。而放坡明挖与悬臂支护形式适用基坑深度较小, 且变形较大。

因此, 在软土地区, 快速、经济、安全的基坑支护措施成为基坑工程的关注重点。若将传统的竖直悬臂结构进行一定角度的倾斜, 可形成倾斜支护桩; 进一步, 若利用冠梁将倾斜桩与悬臂直桩进行连接, 可

形成基坑斜-直交替支护体系。目前, 这种技术已经在天津仁恒海和院、环欧等基坑工程中得到应用。该支护体系能省去水平支撑, 经济效益显著, 加快施工速度, 并且可以有效地减小支护结构土压力, 控制桩身受力与位移^[2-3]。同时, 已开展的模型试验证明了倾斜桩抗倾覆能力和抗变形能力优于悬臂直桩, 斜-直交替布置的单排桩工作性能要优于倾斜单排桩^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708405; 41630641); 国家重点研发计划(2017YFC0805407); 天津市科技计划项目(16YDLSJF00040)

收稿日期: 2019-04-30

***通讯作者:** (E-mail: zhzrobby@163.com)

斜-直交替支护技术虽有十分明显的支护优势,然而,目前缺乏对基坑斜-直交替支护桩抗变形能力机理的解释,限制了此项技术在基坑工程中的应用和发展。对此,本文结合有限元分析和工程实测结果对斜-直交替支护技术的作用机理进行了探讨,并提出了斜-直交替支护技术的 3 个作用机理。

1 工程实测和数值验证

本文选取了位于天津红咸里基坑工程进行有限元数值验证,基坑平面图如图 1。*A—A* 剖面处基坑深度为 4.9 m,采用了放坡+倾斜桩支护的形式。倾斜桩为预制空心矩形桩,桩长 12 m,混凝土强度等级为 C80,倾斜角度为 8°。桩顶用帽梁连接,其混凝土强度等级为 C30。倾斜桩施工完成时在该区段布置桩身位移监测测点,测点位置详见图 1,其中测点 PHC11、PHC12 为剖面 *A—A* 支护形式所对应的测点。该测点处基坑宽度为 85 m,按照该剖面支护形式建立数值模型。

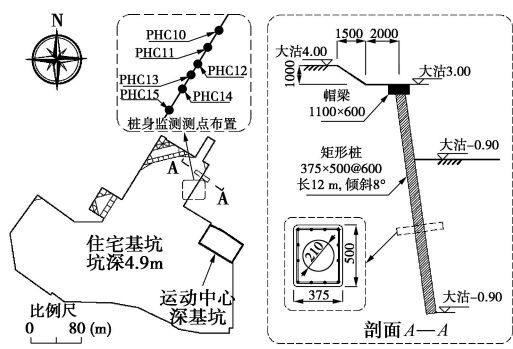


图 1 平面图与测点布置

Fig. 1 Cross-section and layout of monitoring points

采用有限元软件 Plaxis^{3D[5]}对倾斜桩支护进行数值分析。建立平面应变模型,并按对称性取基坑宽度的一半进行分析。模型高度、模型左侧边界与支护桩水平距离均取为 25 m,约 5 倍基坑开挖深度^[6]。模型顶面为自由面;模型 4 个侧面法向位移约束;模型底面每个方向位移均约束^[7]。土体本构模型采用小应变土体硬化模型(HSS 模型)^[8]。土层参数见表 1。冠梁重度为 25 kN/m³,弹性模量为 30 GPa,泊松比取 0.2。支护桩按截面等刚度原则^[9]等效为 8 节点弹性板单元模拟,等效厚度取为 370 mm,重度为 25 kN/m³,弹性模量为 38 GPa,泊松比取 0.2。计算模型剖面图如图 2。基坑施工过程按照以下施工顺序进行模拟:①生成初始地应力;②生成板单元、梁单元;③降水至基坑底部;④开挖至-1 m 埋深处;⑤开挖至-2.95 m 埋深处;⑥开挖至-4.9 m 埋深(坑底)处。

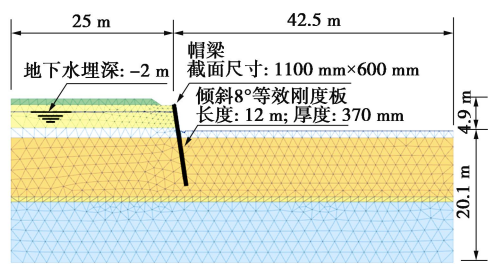


图 2 剖面 *A—A* 数值模型

Fig. 2 Numerical model of cross-section *A—A*

表 1 土体物理力学参数表

土层参数	土层编号					
	① ₂ 素填土	③ ₁ 黏土	④ ₁ 黏土	⑥ ₁ 粉 质黏土	⑦粉质 黏土	⑧ ₁ 粉 质黏土
厚度/m	0.94	3.5	1.5	9.0	0.8	4.26
泊松比 ν	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18.88	18.61	19.42	19.24	20.36	20.64
$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	3.8	4.2	4.8	6.0	5.7	5.8
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	5.7	6.3	7.2	6.0	5.7	5.8
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	30.4	33.6	38.4	24.0	45.6	46.4
$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$	65	63	76	72	109	104
c / kPa	20	16.45	18.06	13.74	15.86	13.87
$\phi / (^{\circ})$	8	12.52	11.27	21.19	9.49	13.54

图 3 为开挖至坑底时,测点 PHC11、PHC12 处桩身水平变形的实测数据与数值分析结果的对比。数值模型计算的桩身位移与现场实测结果非常接近,证明该数值分析方法可靠且适用于进一步建立典型计算模型来进行斜-直交替支护形式的机理研究。

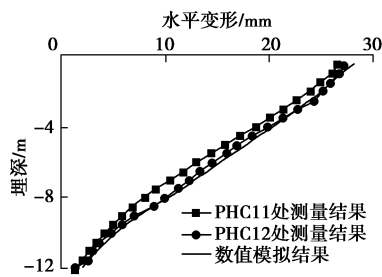


图 3 桩身水平变形对比

Fig. 3 Comparison between calculated and measured horizontal displacements of piles

2 有限元模型建立

为说明斜-直交替桩的工作机理,假设基坑开挖深度为 6 m,宽度为 40 m。地下水位为-2 m,选取天津典型的⑥₁粉质黏土进行单一土层建模,支护桩采用混凝土强度等级为 C80 的预制空心矩形桩,桩长 15 m,截面尺寸为 375 mm×500 mm,空心直径为 210 mm,桩中心距为 600 mm,根据等刚度原则换算板厚为 496 mm,斜桩与直桩的夹角为 20°。冠梁强度等

级为 C35, 弹性模量为 31.5 GPa, 泊松比为 0.2, 截面尺寸为 1100 mm×600 mm。模型尺寸长 100 m, 宽 1.2 m, 高 40 m, 如图 4 所示。桩土界面折减系数为 0.65。

本文将探讨斜-直交替支护桩的 3 种作用机理, 即: 通过对比有无冠梁存在分析刚架效应, 对比斜桩与土体接触面粗糙程度分析斜撑效应, 调整斜-直桩中间土体重度以进行重力效应分析。

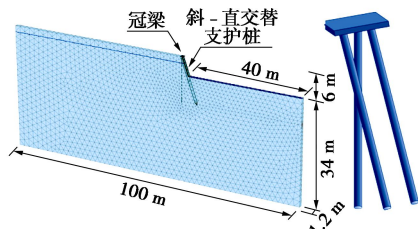


图 4 有限元数值计算模型

Fig. 4 Finite element numerical model

3 作用机理分析

3.1 刚架效应

图 5 为有无冠梁连接时桩身变形和土体沉降关系图。可以看出, 当冠梁取消后, 斜直桩桩顶变形不协调, 直桩变形大于斜桩; 与有冠梁连接工况相比, 直桩最大变形增大 213%, 斜桩最大变形将增大 125%。说明斜-直交替支护桩可有效减小桩身变形。冠梁取消后, 斜、直桩的变形模式由类似带支撑的“内凸式”转变为“悬臂式”^[11], 此时, 斜、直桩的相互作用消失, 地表沉降也显著增加, 无冠梁较有冠梁时增大 146%。斜-直交替支护桩通过桩顶冠梁的连接, 形成一个共同抵抗土体变形的刚架体系。桩体与冠梁间不能发生相对转动, 从而在桩顶处产生一定的初始弯矩。在此三角形刚架支护体系中, 斜桩倾斜一定角度后, 相较于直桩减小了自身的桩身受力, 增强了抗倾覆稳定性, 具有更强的抵御桩后土体变形的支护能力。同时, 斜桩对于直桩也起到了一定的支撑作用, 从而进一步控制直桩的变形。因此, 在此刚架结构中, 冠梁的连接对于斜直桩相互作用能力的发挥是至关重要的。

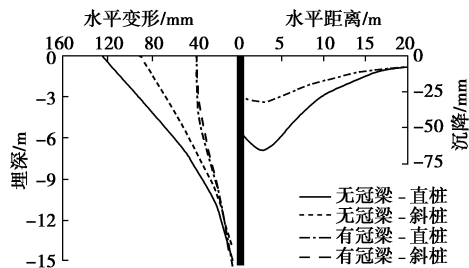


图 5 有无冠梁的斜直桩水平变形与桩后沉降图

Fig. 5 Lateral displacements of piles and ground settlements for cases of with and without connection of top beam

3.2 斜撑效应

图 6 对比分析了不同斜桩侧壁粗糙程度对于桩身变形和土体沉降的影响。由图可知, 当斜桩侧壁光滑时, 斜桩底部的嵌固作用将减小, 底部变形增大, 并且斜桩桩身变形大于直桩。斜、直桩的变形模式均由“内凸式”转变为“悬臂式”, 桩体的最大变形增大 200%, 说明当斜桩侧壁摩擦未发挥时, 其对直桩的支撑作用将明显减弱, 进而影响整体的支护能力。斜桩侧壁光滑后, 地表沉降也显著增加, 斜桩侧壁光滑较粗糙时增大 155%。在整个支护体系中, 斜桩对直桩起到斜撑的作用, 而斜桩侧摩阻力的约束正是传递此支撑力的关键因素。因此, 斜桩侧摩阻力的发挥可以提高支护体系的整体稳定性和抗变形能力。斜桩光滑时, 桩体变形值和土体沉降值与无冠梁时基本相等, 说明当斜桩摩擦不能发挥时, 斜桩的支护作用基本消失, 基坑支护形式类似悬臂直桩支护。

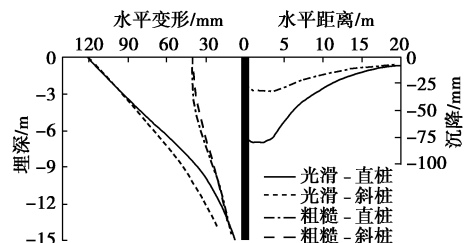


图 6 不同斜桩粗糙度的斜直桩水平变形与桩后沉降图

Fig. 6 Lateral displacements of piles and ground settlements under different roughness of inclined piles

3.3 重力效应

图 7 所示对比了斜-直桩体之间土体重度对结构变形和坑外沉降的影响。为避免数值不收敛, 取 $\gamma = 1 \text{ kN/m}^3$ 近似模拟土体为无重介质。当土体为无重介质时, 桩身变形与坑外土体沉降的模式较基本工况不变, 但斜、直桩的最大水平位移增大 7.5%, 坑外土体最大沉降值增大 10%。说明桩间土的存在起到了限制基坑变形的作用, 该部分土重会起到抵抗倾覆的作用, 提升支护结构整体的抗变形能力。桩间土的存在会给坑内被动区土体提供更大的竖向力, 此竖向力与坑内土体隆起变形方向相反, 进而限制坑内隆起与坑外沉降变形。从而减小基坑的整体变形, 提高支护结构的整体稳定性。

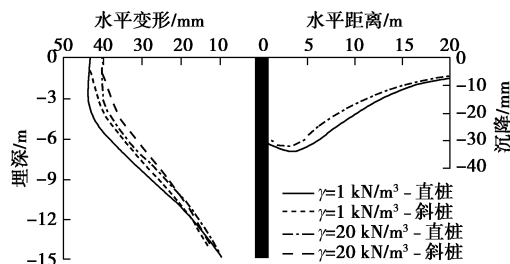


图 7 不同桩间土重的斜直桩水平变形与桩后沉降图

Fig. 7 Lateral displacements of piles and ground settlements under different soil gravities between inclined piles and vertical piles

4 结 论

本文针对目前基坑斜-直交替桩的工作机理,揭示了三大支护效应。主要得出以下结论:

(1) 斜-直交替支护桩形成一个三角形刚架支护体系,此支护结构可提高整体稳定性和支护能力。冠梁的存在是此刚架效应发挥的重点,实现斜直桩的协调变形与相互作用力的传递。而冠梁连接刚度对于此刚架体系作用的发挥影响不明显。

(2) 当斜桩光滑时,斜桩对于直桩的支撑作用将不会发挥,从而由类支撑的“内凸式”变形模式转变为“悬臂式”。因此,斜桩侧壁摩擦是整个支护体系斜撑效应发挥的关键。

(3) 斜直桩中间部分土体与刚架体系形成一个整体共同抵抗土压力和土体变形,通过桩间土重来限制坑内隆起变形,从而提高支护结构抵抗变形的能力。

(4) 在 3 种作用机理中,刚架效应是斜撑效应发挥的前提。通过冠梁的连接,斜桩的支撑力作用在直桩上,而斜桩侧壁摩擦决定了此支撑力的大小。刚架效应保证此作用的存在,斜撑效应保证此作用最大程度的发挥。

参考文献:

- [1] 陈 昆, 闫澍旺. 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. 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))
- [2] 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. Paris, 2013: 2051 - 2054.
- [3] SEO M S, IM J C, KIM C, et al. A study on the applicability of retaining wall using batter piles in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**: 1195 - 1212.
- [4] 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))
- [5] PLAXIS B V. PLAXIS 3D tutorial manual[M]. Anniversary ed. Delft: Plaxis Bv, 2010.
- [6] HSIEH P G, OU C Y, SHIH C. A simplified plane strain analysis of lateral wall deflection for excavations with cross walls[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 2012, **49**(10): 1134 - 1146.
- [7] GOH A T C, ZHANG F, ZHANG W, et al. A simple estimation model for 3D braced excavation wall deflection[J]. Comput Geotech, 2017, **83**: 106 - 113.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] CHEN R, MENG F, LI Z, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2016, **58**: 224 - 235.
- [11] CLOUGH G W, O' ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings of the Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE. New York, 1990: 439 - 470.

(责编: 黄贤沙)