

砂土地基钢格构斜向支撑桩 基坑支护实例分析

许磊, 陈俊辉, 王颖, 熊晓亮
(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 本文以杭州市塘栖镇某基坑为例, 基坑开挖范围内以粉砂性土为主, 基坑采用 PC 工法组合钢管桩或拉森钢板桩作为围护体, 局部降板区域采用斜向支撑桩。斜向支撑桩预施工解决了常规斜支撑土方二次开挖和底板二次浇筑的问题, 可大大节省工期。同时相对于水平支撑可创造大量坑内施工空间, 减少钢筋混凝土用量, 降低工程造价。但是本工艺处于发展阶段, 在实际项目中应用较少, 此工艺依据的设计机理及施工可靠性尚不明确。本文结合工程实例, 分别从斜向支撑桩的施工参数、斜向支撑桩节点、施工工艺、实际施工过程中存在的问题等多方面进行阐述。通过启明星深基坑软件计算和 Plaxis 二维数值模拟, 并结合基坑监测数据验证斜向支撑桩在砂土地基中的可靠性。斜向支撑桩的使用可为类似砂土地基基坑设计、施工提供参考。

关键词: 砂土地基; 钢格构; 斜向支撑桩; 基坑; 支护结构; 双排桩; 数值分析

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0255-07

Case analysis of foundation pit supporting with steel lattice oblique piles in sandy soil

XU Lei, CHEN Jun-hui, WANG Ying, XIONG Xiao-liang
(Hangzhou Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The project studied in this work is located in Tangqi Town, Hangzhou City, and the excavation range of the foundation pit is dominated by silty soil. The PC construction method combined steel pipe piles or Larsen steel sheet piles are used as the enclosure for the foundation pit, and oblique support piles are used in the local slab lowering area. The pre-construction of the oblique support piles solves the problems of secondary excavation of conventional oblique support earthwork and secondary pouring of bottom plates, which can greatly save the construction period. At the same time, compared with the horizontal support, it can create a lot of construction space in the pit, and reduce the amount of reinforced concrete, and also reduce the project cost. However, this process is under the development stage and it is rarely used in actual projects. The design mechanisms and construction reliability of this process are still unclear. Combined with engineering examples, this paper expounds the construction parameters of the inclined support piles, the nodes of the inclined support piles, the construction technology, and the problems existing in the actual construction process. Combined with the monitoring data of the foundation pit, the reliability of the inclined support pile in the sand foundation is verified by the calculation of the Venus deep foundation pit software and the two-dimensional numerical simulation of Plaxis. The use of oblique support piles can provide reference for the design and construction of foundation pits on similar sandy soils.

Key words: sand foundation; steel lattice; oblique support piles; foundation pit; support structure; double row piles; numerical analysis

0 引言

在基坑工程中, 基坑支护通常采用设置竖向支护结构加水平支撑的形式。但是对于大面积基坑,

水平支撑的布置会限制施工空间, 且支撑的施工和拆除也会增加成本, 导致工期延长, 造成一定的资源浪费和环境污染^[1]。因此许多基坑工程支护或加固时会采用斜抛撑替代水平支撑的形式, 斜抛撑一

一般采用钢管、型钢或钢格构, 该种支护形式方便坑内土方开挖, 减少造价, 应用及结构受力特点已有较多研究^[2-4]。相比传统的支撑体系, 斜支撑范围需预留施工缝, 增加了一道盆边土方开挖, 基础底板必须二次浇捣^[5]。另外, 斜抛撑盆式开挖基坑的变形具有明显的阶段性, 斜抛撑架设前围护墙顶水平位移会不断增加, 对周边环境有一定影响^[6], 仅适用于基坑挖深较小或土体自稳性较好的情况。近年来, 将悬臂竖直桩倾斜一定角度形成斜桩, 斜桩与直桩通过冠梁进行组合, 形成斜直交替支护的体系, 已经应用于多个基坑项目中, 研究表明斜直交替桩由于有斜桩的斜撑效应, 因此抗变形能力优于单排桩^[7-8]。但该支护形式的直桩和斜桩协同受力情况不太明确, 类似于悬臂双排桩结构, 变形控制能力不如桩撑支护体系。结合斜抛撑支护体系和斜直交替桩支护体系的优点, 一种新的桩撑支护形式, 即斜向支撑桩开始应用于基坑支护工程中。

斜向支撑桩是在传统排桩支护的基础上, 通过向基坑内斜向搅拌植入预制桩体, 并在基础底板以下桩体四周通过高压旋喷或强制搅拌注浆的两种方式形成水泥搅拌加固体, 最终形成排桩、斜撑桩、基底土体共同抵抗基坑外土压力的三角形稳定支护体系。

植入预制桩体通常可采用预制方桩、钢格构、型钢、钢管等多种类型。其中预制方桩、钢管和型钢刚度较大, 但存在地下室底板防水施工较为复

杂、型钢整体重量较大、吊装困难等缺点。钢格构虽刚度较小, 但具有质量轻、可分段吊装且对接简易、地下室底板防水和施工简便等优点。

本文以某砂土地基基坑工程为实例, 采用钢格构斜向支撑桩工艺作为支撑体系, 结合监测数据分析砂土地基斜向支撑桩的可靠性, 对类似工程有重要指导意义。

1 工程概况

本工程位于杭州市塘栖镇, 拟建多幢3~4层合院建筑群及两层配套用房。总用地面积约4.1万m²。整体设置一层地下室, 局部底板降板区域挖深较深, 工程桩采用管桩, 开挖面积约12460m², 基坑周长约860m, 基坑大面积开挖深度约5.20m, 局部降板区域开挖深度约8.30m。基坑南侧为已建道路, 基坑东侧、西侧为待建道路, 基坑北侧为京杭大运河沿河绿化。基坑南侧距离已建道路最近约2.8m, 距离现有最近的电力管约3.8m, 距离给水管约6.5m。基坑与周边环境关系详见图1。

本工程涉及基坑开挖土层主要为①杂填土、②粉质黏土夹粉土、③₁砂质粉土、③₂砂质粉土、③₃砂质粉土夹粉砂。基坑开挖范围内以砂性土为主, 砂性土普遍厚度约18.0m, 该场地典型土层分布情况如表1所示。

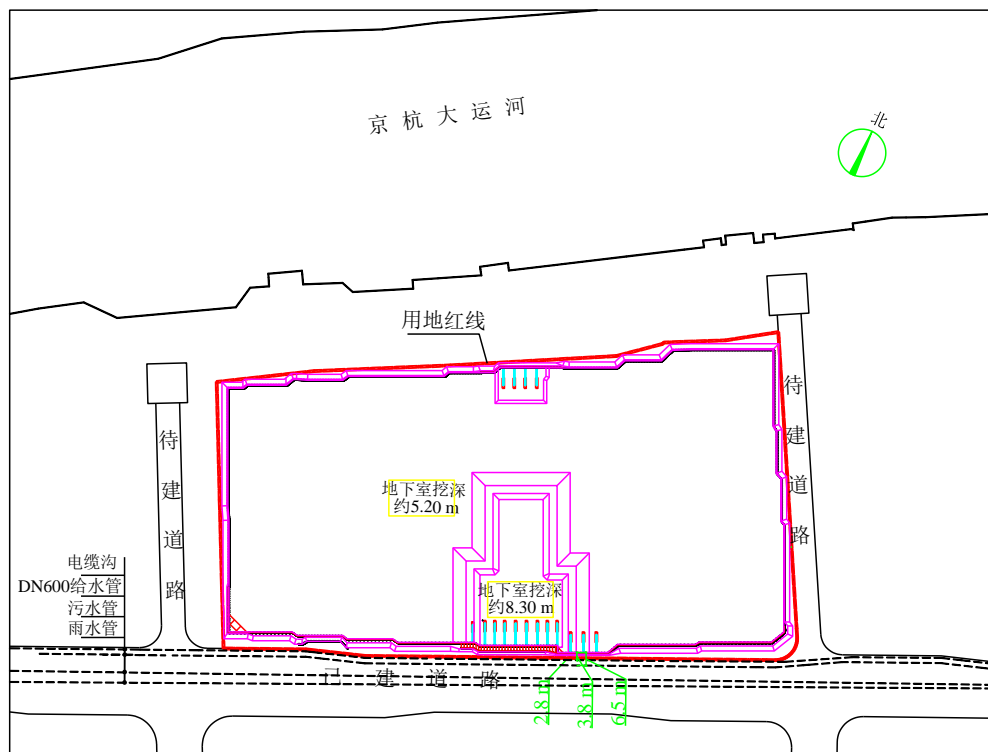


图1 基坑总平面图

Fig. 1 General plan of the foundation pit

表1 土层物理力学性质指标一览表
Table 1 Physical and mechanical properties of soil

层号	土层名称	重度 γ (kN/m ³)	水平渗透 系数平均值 k_h /(cm/s)	垂直渗透 系数平均值 k_v /(cm/s)	固结快剪标准值		压缩 模量 E_s /MPa	三轴试验 割线刚度 E_{50} /MPa	侧压试验 切线刚度 E_{oed} /MPa	卸载 模量 E_{ur} /MPa
					黏聚力 c_k /kPa	内摩擦角 ϕ_k (°)				
①	杂填土	18.0*	—	—	10.0*	10.0*	3.0	3	3	15
②	粉质黏土 夹粉土	19.0	1.3×10^{-4}	8.9×10^{-5}	14.5	12.3	5.1	5	5	25
③-1	砂质粉土	19.4	2.7×10^{-4}	2.2×10^{-4}	6.5	24.0	8.4	8	8	40
③-2	砂质粉土	19.3	3.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}	7.4	24.2	8.6	9	9	45
③-3	砂质粉土 夹粉砂	19.2	2.7×10^{-6}	2.2×10^{-6}	6.0	25.0	8.5	9	9	45

注: 表中*号为经验取值, $G_0=2.5E_{ur}$; $\gamma_{0.7}=2.0 \times 10^{-4}$ MPa。

2 基坑设计方案

常规基坑支护形式包括放坡开挖、土钉墙围护结构和支锚(内撑或拉锚)式围护结构。放坡开挖是最为经济的围护形式, 具有施工速度快、土方开挖方便等优点, 在条件许可的情况下应优先选用^[9]。本工程基坑开挖面积大、局部降板基坑深度深, 降板区域南侧为已建道路及市政管线, 基坑施工对已建道路下管线保护要求高, 且四周场地狭小, 不具备大放坡开挖的条件。若采用大面积水平支撑或斜

支撑, 围护成本高且施工工期较长。综合以上因素, 既要保证基坑周边建筑物的安全, 又要争取在最短时间内完成施工。考虑到本工程的特点以及斜向支撑桩的优势, 经方案比选, 该工程采用钢格构斜向支撑桩工艺作为支撑体系。

2.1 基坑支护

本工程一层地下室常规区域采用PC工法组合钢管桩或拉森钢板桩悬臂桩。局部降板区域采用PC工法组合钢管桩+斜向支撑桩的支护形式。坑外设深井控制性降水, 坑内设深井进行疏干降水。基坑斜向支撑桩剖面图详见图2。

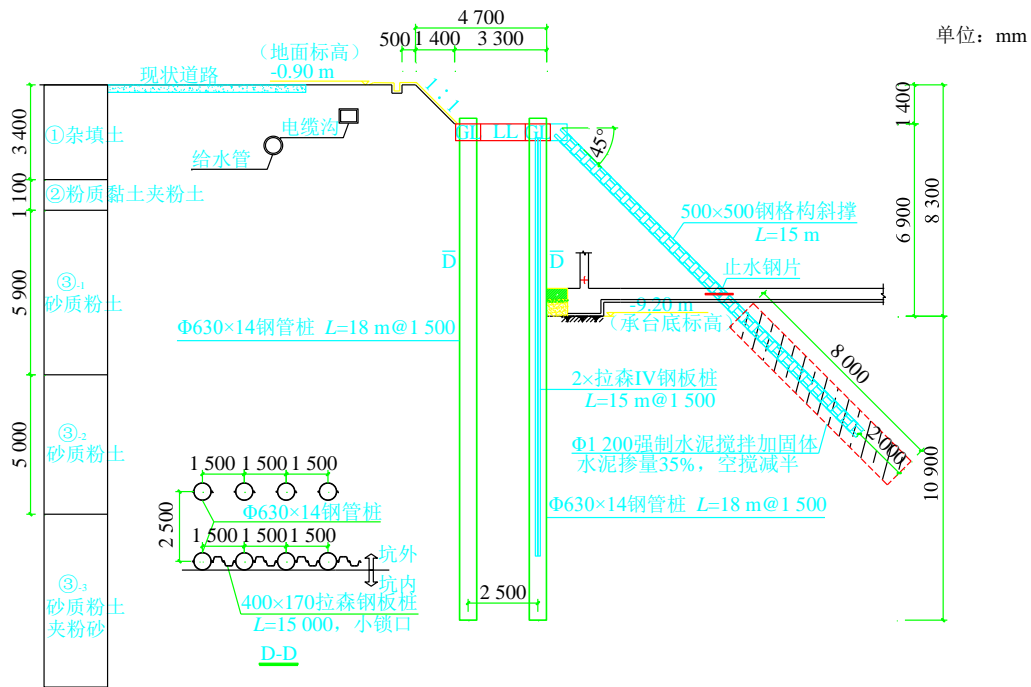


图2 典型斜向支撑桩支护剖面图
Fig. 2 Typical support profile of oblique support piles

2.2 地下水处理

本工程场地地下水分布复杂,主要赋存有两层地下水,即浅部孔隙潜水以及深层承压水。浅部孔隙潜水含水丰富且渗透性强,易产生管涌、流砂等现象。本工程地下室深度一般,不受承压水影响。本工程主要考虑浅部孔隙潜水的影响并采取针对性措施。

针对浅部孔隙潜水,本工程坑内采用简易深井进行疏干降水,疏干降水深度控制在每层开挖面以下 1.0m 位置,简易深井间距为 15~20m。坑外采用简易深井进行控制性降水,坑外常规位置降水深度控制在地表下 4.0 m,局部降板区域降水深度控制在地表下 6.0 m,简易深井间距为 15~18 m。深井总数量共 160 口。

2.3 钢格构斜向支撑桩参数及节点

钢格构斜向支撑桩:支撑段 8 m,持力段 6 m,总长度 14 m,内置 500 mm×500 mm 钢构柱,下倾角度 45°,搅拌土体直径 1 200 mm。钢格构斜撑角钢和缀板钢材为 Q235B,角钢接头应采用剖口熔透

焊,各接头应错开 500 mm,缀板与角钢应采用围焊,钢格构两端均与端板焊接,焊缝高度 8 mm,焊缝等级为三级。各段钢格构间端板采用 M24×75 螺栓连接,螺栓等级为 10.9 级。斜向支撑桩钢格构对接及端板做法详见图 3~4。斜向强制水泥搅拌体注浆材料采用 PO 42.5 水泥,水泥掺入量为 35%,水灰比为 0.5~0.7。斜向支撑桩钢格构与地下室底板需设置止水钢板,止水钢板做法详见图 5。钢格构斜向支撑照片详见图 6。

2.4 钢格构斜向支撑桩施工工艺

钢格构斜向支撑桩施工顺序:施工准备→土方开挖→测量定位/标高控制/复核→反力架施工→滚轮架安装→安装角度调整托架→安装搅拌及推进装置→格构柱焊接并吊装就位→水泥桶及拌浆系统就位→启动搅拌装置(反转缩小搅拌头直径)→启动供浆系统→启动推进系统推进至设计标高→搅拌系统正转扩大搅拌头→供浆搅拌→回收钻杆→下一根桩施工。

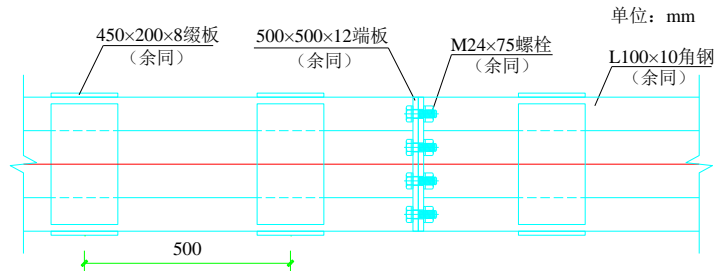


图 3 斜向支撑桩钢格构对接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of oblique support pile steel lattice docking

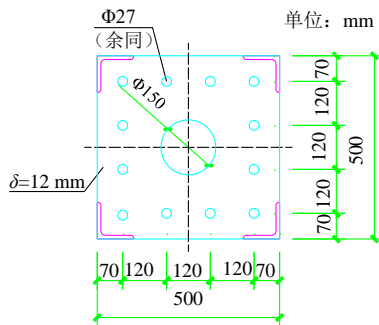


图 4 斜向支撑桩钢格构端板详图

Fig. 4 Detailed drawing of steel lattice end plate for oblique support piles

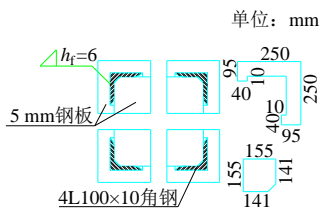


图 5 斜向支撑桩底板处止水钢板详图

Fig. 5 Detailed drawing of water stop steel sheet at the bottom plate of oblique support pile



图 6 斜向支撑桩照片

Fig. 6 Photo of oblique support piles

3 理论计算、数值分析及监测情况

3.1 启明星剖面计算

本工程采用同济启明星深基坑设计计算软件对双排 PC 工法组合钢管桩结合一道斜向支撑桩支护剖面进行计算,其中计算考虑冠梁刚度,冠梁截面为 3 600 mm×600 mm,冠梁混凝土等级为 C30,平面计算长度考虑 50 m,等效冠梁刚度为 2.15 MN/m²,斜向支撑桩刚度选取 2.443 MN/m²。计算得超前斜

撑轴向力标准值为 631.5 kN/m, 计算得前排桩最大水平位移为 38.0 mm, 其余内力计算结果详见图 7。

考虑到软件计算采用的斜向支撑桩刚度取值较小, 斜向支撑桩刚度通过启明星软件采用弹性支点刚度系数进行复算。计算得前排桩最大水平位移为 18.4 mm。

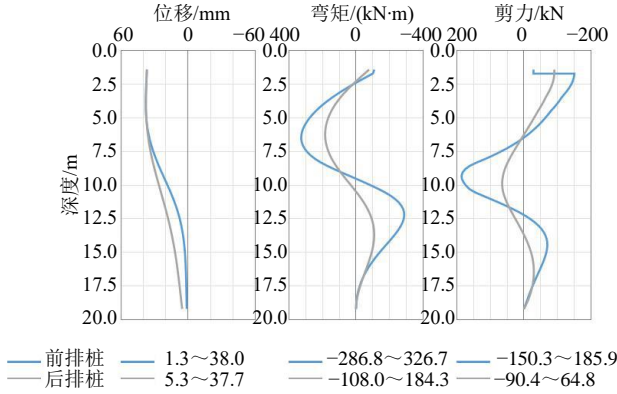


图 7 启明星内力变形计算结果

Fig. 7 Calculation results of internal force and deformation by Venus

3.2 斜向支撑桩单桩承载力验算

斜向支撑桩桩体部位呈水泥搅拌式圆柱体, 与常规竖向桩基存在的主要区别是施工角度不同, 其单桩的极限承载力计算模型与常规桩基类似, 本工程采用桩基技术规范中的公式作为斜向支撑桩的单桩极限承载力进行验算。计算公式如下:

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + \alpha p_{sk} A_p \quad (1)$$

式中: u 为桩身周长; q_{sik} 为用静力触探比贯入阻力值估算的桩周第 i 层土的极限侧阻力; l_i 为桩周第 i 层土的厚度; α 为桩端阻力修正系数; p_{sk} 为桩端附件的静力触探比贯入阻力标准值 (平均值); A_p 为桩端面积。

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + \alpha p_{sk} A_p = 3.768 \times (3.6 \times 32 + 5.6 \times 36) + 0.75 \times 300 \times 1.13 = 1\,448 \text{ kN}$$

$$R_a = 0.5 Q_{uk} = 724 \text{ kN}$$

3.3 斜撑桩支撑刚度验算

支撑式支挡结构的弹性支点刚度系数通过对支撑结构整体进行线弹性结构分析得出, 计算宽度内弹性支点刚度系数可按下式计算:

$$K = \frac{\alpha_R E A b_a}{\lambda l_0 s} \quad (2)$$

式中: λ 为支撑不动点调整系数, 本次计算取 1.0; α_R 为支撑松弛系数, 对不预加轴向压力的钢支撑, 取 0.8~1.0; E 为支撑材料弹性模量; A 为支撑截面面积; l_0 为受压支撑构件长度; b_a 为挡土结构计算

宽度, 对单根支护桩, 取排桩间距; s 为支撑水平间距。

$$K = (0.8 \times 2 \times 10^8 \times 77.2 \times 10^{-4} \times 1.5) / (1.0 \times 8.5 \times 5) = 4.36 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

3.4 有限元数值分析验证

采用 Plaxis 岩土有限元分析软件建立二维有限元小应变硬化模型 (HSS) 进行土体模拟, 本工程开挖范围主要为砂土, 计算类型采用排水条件, 模型参数详见表 1。计算结果详见图 8。

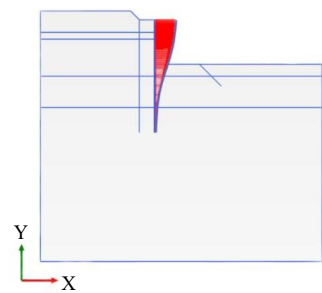
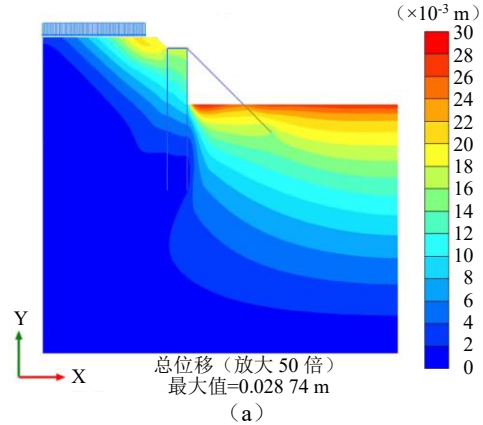


图 8 二维有限元数值分析位移图

Fig. 8 Displacement contour by Plaxis 2D finite element numerical analysis

根据以上计算结果, 二维有限元数值分析得出基坑围护体最大变形值为 16.8 mm, 坑底隆起量为 28.7 mm。

3.5 土方开挖期间基坑监测情况

基坑坑外水位监测情况: 坑外水位孔观测水位在地面下约 4 m, 基坑开挖和地下室结构施工期间坑外地下水位较稳定。

坑外深层土体位移监测情况: 位于斜支撑桩侧 CX12 测斜孔累计位移为 16.09 mm。深层土体位移报警值为 50 mm。基坑开挖和地下室结构施工期间, 累计位移及位移速率小于报警值, 典型深层土体位移监测曲线详见图 9。监测结果均满足相关规范^[10] 以及设计要求。表明本工程基坑围护方案在施工质量可靠的前提下可保证基坑的稳定和周边环境的安全。

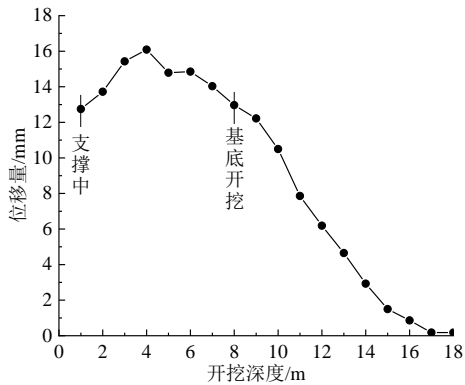


图9 基坑开挖到底时深层土体位移监测图

Fig. 9 Monitoring map of deep soil displacement during foundation pit excavation to the bottom

从理论计算、数值分析及实际监测结果对比, 启明星计算在考虑增大斜向支撑桩计算刚度取值时, 斜向支撑桩启明星计算结果、Plaxis 有限元模拟结果与深层土体实际变形结果较为吻合。可见斜向支撑桩在砂土地基中可提供有效的支撑力。

4 斜向支撑桩存在的问题

(1) 由于斜向支撑桩施工角度为 45° , 搅拌土体直径为 1 200 mm, 地下施工影响范围较大。杭州用地多数为拆迁用地, 地下分布较多的障碍物, 所以在实际施工过程中, 斜向支撑桩在避开工程桩的同时还需避开地下障碍物。

(2) 由于斜向支撑桩为新型施工工艺, 设备多为自制小型设备, 存在功率小、操作难度较大、精度控制困难等问题。施工完之后, 斜向支撑桩顶部距离冠梁较远, 需在冠梁位置设置支座, 但若精度控制较差时, 会导致支座长度太长, 支座容易成为悬挑梁结构, 对斜向支撑桩受力较为不利。

(3) 斜向支撑桩的上部支撑体为钢格构, 刚度较小, 控制变形能力较为有限。

(4) 现阶段斜向支撑桩施工技术还未完全成熟。斜向支撑桩的下部桩体为水泥土搅拌体, 桩体形成效果与土体性质有关, 往往无法达到计算所得的承载力, 现阶段常采用提前试桩以判断成桩后的承载力。后续可针对不同的土体, 通过试验形成更为合理的经验计算公式作为依据。

5 结论

在砂土地基中采用斜向支撑桩, 基坑本体监测数据总体正常。未发生基坑监测数据报警现象, 该工艺在砂土地基中的安全性得到较好的保证。

常用设计软件启明星深基坑中已有该围护形

式模型, 但软件计算时, 斜撑桩的支撑刚度计算结果明显偏小。本文重新选用钢格构弹性支点刚度系数进行复算, 得出计算结果与实际施工结果接近, 可为类似工程的设计提供经验。

通过本基坑的设计和斜向支撑桩实际施工情况。斜向支撑桩具有节约工期、可一次性敞开放式开挖至坑底、减少钢筋混凝土用量、降低工程造价等优点。但该工艺还处于发展阶段, 还存在以下问题。因设备的局限性, 该工艺仅适用于部分土层, 坑底土壤以粉砂土、黏土等具备一定地基承载力且便于液压送桩的土层为主。对于开挖深度较深的基坑, 控制变形能力相对较差。斜支撑桩工艺施工需要配备专业的施工队伍。对工程桩密集或地下障碍物较多的工程, 成桩较困难。

斜向支撑桩工艺可进一步发展设备, 可以形成下部具有更大承载力的桩体, 并选用刚度更大的上部支撑结构, 有望在更多的深基坑中进行应用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 曹笑馨. 排桩加斜抛撑支护体系在深基坑中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 39-44.
CAO Xiao-pin. Application of row pile and oblique bracing supporting system in the deep foundation pit[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, 30(1): 39-44.
- [3] 林国威, 左人宇, 陆钊, 等. 斜抛撑在基坑支护中控制土体应力与结构受力特点研究[J]. 土工基础, 2015, 29(4): 13-18.
LIN Guo-wei, ZUO Ren-yu, LU Zhao, et al. Structural capacity of the inclined supporting system and soil stress in the deep excavation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2015, 29(4): 13-18.
- [4] 林子晔. 斜抛撑在深基坑支护中的应用研究[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 1): 11-15.
LIN Zi-ye. Applied research of inclined bracing in deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2018, 47(S1): 11-15.
- [5] 曾虹程. 基坑中钢管斜抛撑的应用及盆边土方开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2012, 34(12): 1133-1135.
ZENG Hong-cheng. Application of steel pipe inclined bracing to foundation pit and construction technology for

