

# 强制搅拌斜向支撑桩在软土基坑中的应用

金小荣<sup>1</sup>, 隋欣<sup>1</sup>, 郭永<sup>2</sup>, 莫立成<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江华蕴基础工程有限公司, 浙江 湖州 313211)

**摘要:** 在开挖面积大但深度一般的基坑工程中, 斜向支撑因其具有挖土方便、换撑工况相对独立、施工周期短的特点而被广泛应用。根据斜向支撑的支撑点不同, 可以分为撑在基础底板、支撑桩与地基土三类。本文介绍了一种支撑点位于地基土中的斜向支撑体系在杭州某软土基坑中的应用。该支护体系由钢格构、预制方桩、强制搅拌体以及扩大底部组成。阐述了强制搅拌斜向支撑桩的设计要点与施工工艺, 并从经济性、安全性、施工可操作性等方面与传统斜向支撑进行了对比。相较于传统斜向支撑, 强制搅拌斜向支撑桩具有施工工序少、可小净距施工、适用于多种地层、可控制变形的特点。施工现场反馈与监控量测结果表明, 该支护形式可以充分发挥排桩、斜向支撑、桩间土体的协同作用, 有效控制开挖过程中引起的变形, 可为类似软土地区基坑工程的支护设计提供借鉴与参考。

**关键词:** 基坑支护; 软土地基; 斜向支撑; 预制方桩; 强制搅拌斜向支撑桩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0534-07

## Application of forced mixing inclined support pile in soft-soil foundation pit

JIN Xiao-rong<sup>1</sup>, SUI Xin<sup>1</sup>, GUO Yong<sup>2</sup>, MO Li-cheng<sup>1</sup>

(1. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Huayun Foundation Engineering Co., Ltd., Huzhou 313211, Zhejiang, China)

**Abstract:** In foundation pit projects with a significant excavation area but moderate depth, inclined bracing finds extensive application due to its advantageous attributes, including convenient excavation, relatively independent support changing conditions and short construction period. In accordance with the location of the inclined support, it can be categorized into three distinct types: support on the base plate, support on support piles and support on foundation soil. This work introduces the application of an inclined support supported in the foundation soil in a soft-soil foundation pit in Hangzhou. The support system consists of steel lattice structure, prefabricated square piles, forced stirring body and enlarged bottom. The design points and construction technology of the forced mixing inclined support pile are expounded in detail. Furthermore, it is compared with the traditional inclined support from the aspects of economy, safety and construction operability. In contrast to conventional inclined support, the forced mixing support pile offers advantages such as a streamlined construction process, suitability for use at close proximity, adaptability to various geological strata, and controlled deformation. Based on feedback and construction site monitoring results, this support approach optimally leverages the synergies among piles, inclined support, and the soil between them, effectively managing the deformation arising from excavation. This research can serve as a valuable reference for foundation pit support design in similar soft-soil regions within foundation pit engineering.

**Key words:** foundation pit support; soft-soil foundation; inclined support; prefabricated square pile; forced mixing inclined support pile

## 0 引言

基坑工程作为开发利用城市地下空间的重要

保障, 正向着“深、大、紧、近”四个方向发展。基坑工程具有地域性、综合性、风险性、环境效应和时空效应的特点<sup>[1]</sup>, 其设计和施工难度大。在城

收稿日期: 2021-11-15

作者简介: 金小荣(1977—), 男, 浙江萧山人, 工学博士, 正高级工程师, 国家注册土木(岩土)工程师, 长期从事基坑围护和地基处理等岩土工程设计与PC工法和HC工法等科研工作。E-mail: 369057407@qq.com。

市化水平较高的地区,如棚户区改造项目、企业改扩建项目等,由于这些工程大多处在建(构)筑物密集地带,地下管线交错,周边环境复杂,因此对基坑工程提出了更高的要求。

在基坑周边存在大量地下管线及建筑基础、施工用地紧张且不能超红线,基坑深度一般但面积大的工程中,排桩与斜撑组合形式的围护结构往往能彰显其优越性。相比于排桩与锚索(杆)、排桩与水平内支撑的围护结构,排桩与斜撑的围护结构具有不受红线限制、挖土方便、换撑工况相对独立不受整体牵制、节约工期且经济的优点。

## 1 强制搅拌斜向支撑桩特点

根据斜撑支撑点的不同,斜撑可以分为三类。第一类,斜撑底部撑在基础底板牛腿<sup>[2-3]</sup>或暗梁<sup>[4]</sup>。第二类,斜撑底部撑在支撑桩,支撑桩可以是灌注桩<sup>[5]</sup>、管桩<sup>[6]</sup>、搅拌桩<sup>[7-8]</sup>与树根桩复合结构<sup>[9]</sup>等。第三类,斜撑底部撑在地基土中<sup>[10-11]</sup>。本文所介绍的强制搅拌斜向支撑桩属于第三类,它是由钢格构、预制方桩、强制搅拌体以及扩大底部组成(如图1~3)。钢格构与预制方桩端部预先焊接形成整体,液压送桩过程中,当桩内部的强制注浆口达到基坑支护设计注浆段位置时,启动高压注浆泵,使钢格构与预制方桩外形成搅拌体。与其他类型斜撑相比,强制搅拌斜向支撑桩具有以下特点:

(1) 施工工序少:强制搅拌斜向支撑桩施工时无需预留三角土及施工缝,无需施工反力支座,无需二次挖土和二次施工底板,大大减小基础漏水风险。

(2) 变形控制更可靠:强制搅拌斜向支撑桩属于超前支护形式,可在基坑开挖前提前控制土体变形。同时,由于不需要预留三角土,更有利于控制变形和周边环境的安全。在设置墙体止水带并回填土方后拆除斜格构,大大减小换撑引起的变形。

(3) 经济性:由于强制搅拌斜向支撑桩施工速度快、工期短,可以节约工程造价。



图1 强制搅拌斜向支撑桩正向图

Fig. 1 Front photo of forced mixing inclined support pile



图2 强制搅拌斜向支撑桩侧向图

Fig. 2 Side photo of forced mixing inclined support pile



图3 强制搅拌体以及扩大底部开挖现场图

Fig. 3 Photo of forced stirring body and enlarged bottom

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

本工程建设场地位于杭州市拱墅区某小学旧址,神龙路以东,龙塘路以西,沈康路以南,科祥路以北区域内,以上场地周边道路均为拟建道路,如图4所示。场地属于拆旧建新,表层杂填土分布有混凝土活块石等硬杂物,场地内存在旧建筑桩基础和条形基础。本项目总用地面积33 588 m<sup>2</sup>,总建筑面积63 288 m<sup>2</sup>,其中地上建筑面积33 588 m<sup>2</sup>,地下建筑面积28 500 m<sup>2</sup>,架空层建筑面积1 200 m<sup>2</sup>,主要建设内容为1~3号教学组团、4号行政楼、5号食堂风雨操场,设1层地下室,基坑开挖深度为5.00~7.10 m,周长约为710 m。

### 2.2 基坑周边环境

本基坑场地现状除西侧有硬化道路(未通车)外,其余三侧均为空地,环境尚可。

(1) 基坑北侧:地下室外墙距离用地红线约9~10 m,红线外为拟建沈康路,现状为荒地。

(2) 基坑东侧:地下室外墙距离用地红线约6~7 m,红线外为拟建龙塘路,现状为停车场。

(3) 基坑南侧:地下室外墙距离用地红线约4~19 m,红线外为拟建科祥路,现状为待拆迁多层建筑和停车场。

(4) 基坑西侧：地下室外墙距离用地红线约5~7 m，红线外为拟建神龙路，现状为原水泥道路。

除西北角高压线外，场地内原有污水管、路灯照明等地下市政管线均已废弃或在基坑施工前做迁移处理。西北角高压线距离地下室剪力墙约6.4 m，距离较近，且对变形要求高。

### 2.3 工程地质与水文地质条件

根据本工程的岩土工程勘察报告，拟建场地属冲

海积平原地貌，场地地形平坦。基坑坑底以上主要分布土层为①<sub>0</sub>杂填土和①<sub>1</sub>粉质黏土，基坑底全部位于灰色、流塑状的②淤泥质黏土层，对基坑十分不利。场地地基土物理力学指标设计参数如表1所示。

根据场地钻孔揭露，钻孔深度范围内主要含水层为赋存于人工填土和黏性土层中的孔隙潜水以及赋存于基岩风化裂隙中的基岩裂隙水。水位埋深为0.40~2.60 m。

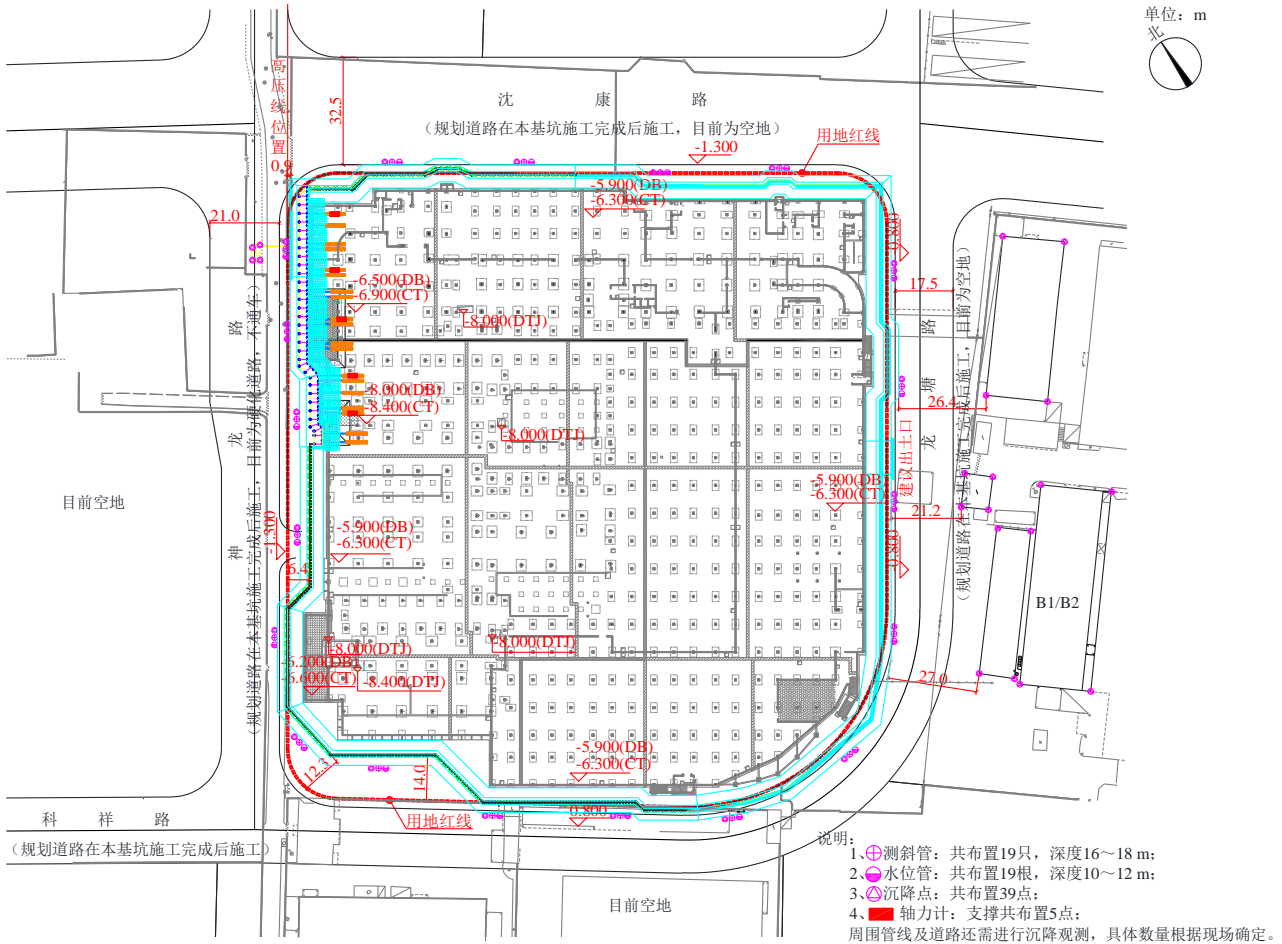


图4 基坑周边环境示意图

Fig. 4 Surrounding environment of the foundation pit

表1 地基土物理力学指标设计参数表

Table 1 Design parameter table of physical and mechanical indexes of foundation soil

地层名称	层厚/m	含水量 w/%	压缩模量 $E_s$ /MPa	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	直接快剪		渗透系数	
					c/kPa	$\phi$ (°)	水平 $K_h$ /(cm/s)	竖直 $K_v$ /(cm/s)
① <sub>0</sub> 杂填土	0.9~2.9	—	—	(18.0)	(10.0)	(10.0)	$(6.5 \times 10^{-3})$	$(5.5 \times 10^{-3})$
① <sub>1</sub> 粉质黏土	0~2.6	30.7	4.0	18.6	25.1	18.5	$1.1 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-6}$
②淤泥质黏土	0~12.7	49.5	2.0	16.9	13.0	9.1	$2.8 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-6}$
④ <sub>1</sub> 粉质黏土	0~11.6	27.8	9.5	18.9	47.8	21.2	$5.5 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-6}$

注：括号内为设计经验值。

### 2.4 基坑围护设计优化方案

#### (1) 原基坑围护设计方案

综合本工程的工程地质条件、周边环境及工程

规模，本项目除西北角外，采用放坡开挖结合拉森IV钢板桩或H+HAT工法桩的围护结构。由于西北角存在高压线，对变形要求较高，故西北角采用上

部放坡、下部 PC 工法桩和 HU 工法桩结合一道型钢水平内支撑的围护形式,如图 5 所示。

(2) 原基坑围护设计方案缺点

原设计虽然可以保证基坑内地下室结构的完好、基坑外土体的整体稳定性,但是仍然存在不足,具体如下:

a) 施工工期长: 支撑施工完成后方可进行基坑开挖; 换撑拆撑工况受底板强度影响, 需要完成大量的支撑拆除工作。

b) 工程造价高: 立柱桩的设置、支撑面积大、施工工期长增加了工程成本; HU 工法桩型钢间相对密实, 因此含钢量偏大。

c) 施工不便: 支撑下挖土需多台挖机倒运, 基坑开挖速度慢、出土慢。

(3) 基坑围护设计优化方案

为解决上述围护设计的不足, 对本项目基坑进行设计优化, 西北角支护形式调整为: 原西北角的西侧区域调整为采用上部放坡开挖、下部双排 PC 工法组合钢管桩结合一道强制搅拌斜向支撑桩和被动区加固的围护结构。原西北角的北侧区域调整为采用放坡开挖结合 H+HAT 工法桩的围护结构, 如图 6 所示。HAT 钢板桩采用 900 mm 宽的帽型拉森桩, 以节约工程造价。

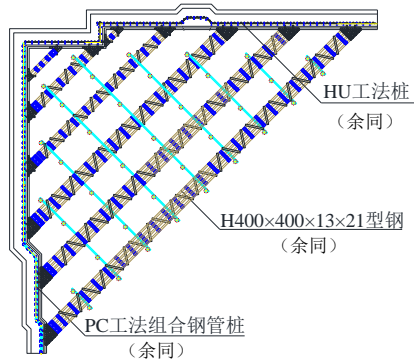


图 5 基坑西北角原设计平面

Fig. 5 Original design plan of northwest corner of foundation pit

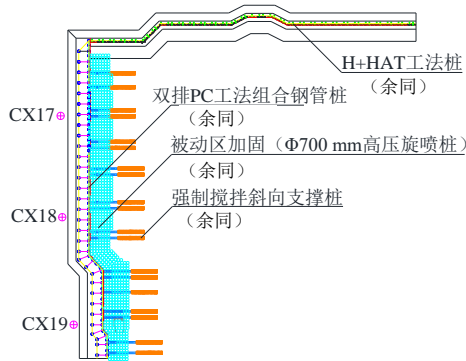


图 6 基坑西北角优化设计平面

Fig. 6 Optimized design plane of northwest corner of foundation pit

2.5 强制搅拌斜向支撑桩的设计优化方案

(1) 强制搅拌斜向支撑桩的设计原理及关键点

强制搅拌斜向支撑桩的作用是将围护桩所受的水平力通过斜撑桩传递到地基土中。因此, 围护桩与冠梁、冠梁与钢格构、钢格构与预制方桩、预制方桩与搅拌体之间的连接应满足斜向支撑桩水平分力与竖向分力的要求。

本项目中采用的强制搅拌斜向支撑桩由 400 mm×400 mm 的钢格构斜撑下焊接 400 mm×400 mm 预制方桩并采用强制搅拌体加固而成。钢格构采用的角钢与缀板材质均为 Q235B, 钢格构主肢采用 L100×12 角钢, 缀板采用 360×200×12, 间距 500 mm, 钢格构斜撑长 6 m、9 m, 满足格构式压弯构件的强度、刚度与稳定性要求。预制方桩长 9 m, 倾角 45°。钢格构与预制方桩采用端部焊接, 如图 7~8 所示。强制搅拌加固体直径为 800 mm, 方桩端部处搅拌体扩径至 1 000 mm, 端部锚入④<sub>1</sub>粉质黏土层不小于 1.5 m。典型基坑支护剖面如图 9 所示, 钢格构与预制方桩连接处端板详图如图 10 所示。



图 7 钢格构与预制方桩端部焊接

Fig. 7 Welding of steel lattice structure and prefabricated square pile end

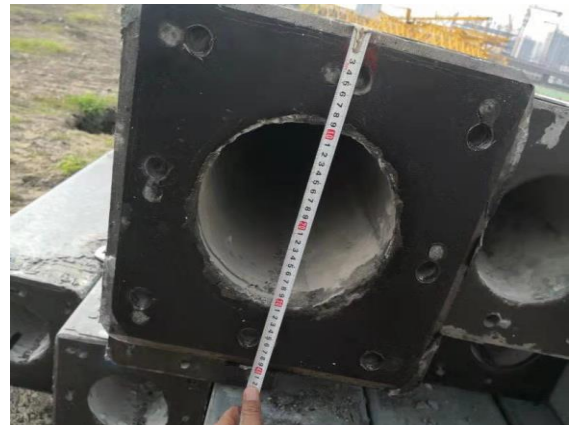


图 8 预制方桩端部

Fig. 8 End of prefabricated square pile

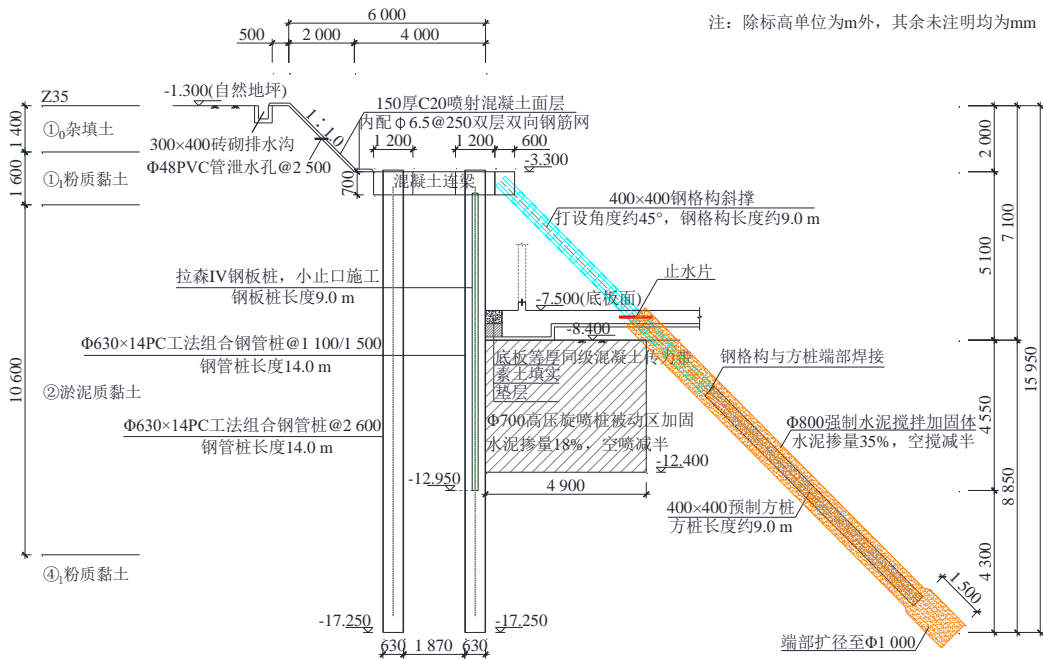


图9 典型基坑支护剖面图

Fig. 9 Profile of a typical foundation pit support

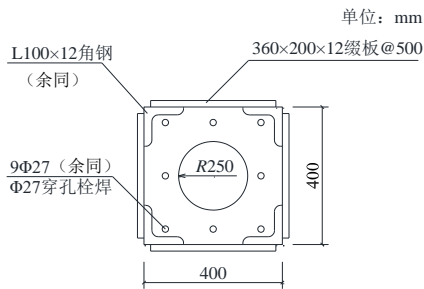


图10 钢格构与预制方桩连接处端板详图

Fig. 10 Profile on the end plate at the joint of steel lattice and prefabricated square pile

(2) 强制搅拌斜向支撑桩施工技术

强制搅拌斜向支撑桩的施工工序为：a) 施工准备，斜向支撑桩加工制作；b) 开挖临时坑，斜向支撑桩定位，在斜向支撑桩身上粘贴长方形铁片，并悬挂角度监测指针，便于压桩角度的实时调整；c) 安装搅拌及推进装置，从钢格构的端部置入动力钻杆装置，液压装置就位；d) 斜向支撑桩两侧设置桩体抱箍，吊装到位；e) 强制搅拌供浆系统就位；f) 启动液压设备加压，将桩推进至设计标高；g) 启动搅拌系统，搅拌供浆；h) 回收钻杆；i) 施工下一根斜撑支护桩。现场实景照片如图11~12所示。

强制水泥搅拌体钻孔前按施工蓝图放线定位，钻孔定位误差小于50 mm，孔斜误差小于3°，桩径偏差不大于20 mm。注浆材料采用P.O42.5水泥，

水泥掺入量为35%，空搅水泥掺入量减半，水灰比为0.5~0.7。水泥浆应拌和均匀，随拌随用，一次拌合的水泥浆应在初凝前用完。搅拌钻杆的钻进速度为0.5 m/min，提升速度为0.8 m/min，误差不大于±10 cm/min。现场开挖完成实景如图13所示。



图11 强制搅拌斜向支撑桩定位照片

Fig. 11 Photo of orientation of forced mixing inclined support pile

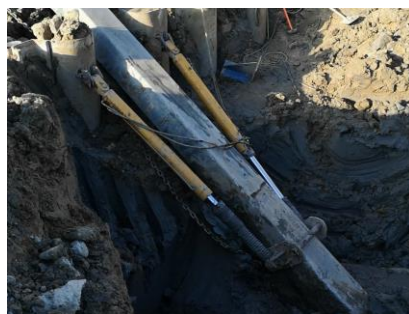


图12 强制搅拌斜向支撑桩推进过程照片

Fig. 12 Photo of the jacking process of forced mixing inclined support pile



图13 开挖完成实景照片

Fig. 13 Photo of completion of excavation

## 2.6 施工实施效果及现场监测结果分析

图14为开挖至基坑底标高时,测点CX17、CX18、CX19处深层土体水平位移的监测结果(测点位置见图6)。数据结果显示基坑开挖至坑底时,土体最大水平位移仅为10.34 mm,远小于设计报警值的35 mm。由于超前斜向支撑桩的刚度比水平内支撑小,且端部存在因土体变形产生的位移,使得采用强制搅拌斜向支撑桩的围护结构基坑变形不同于水平内支撑围护结构。其变形沿深度方向拐角效应不明显,与桩锚结构相似。

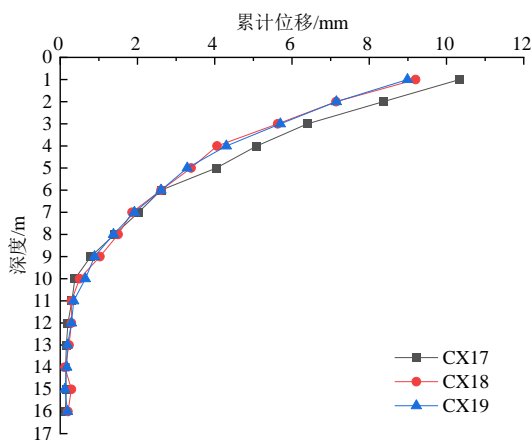


图14 深层土体水平位移图

Fig. 14 Horizontal displacement of deep soil

## 2.7 经济性比较

经过相关经济测算,原围护造价约为1 025万元,优化后的围护造价约为800万元,比EPC投控制造价的985万元约低185万元。此外,地下室基础施工工期缩短约40 d,加快了施工进度。

## 3 结论

软土地基中城区的基坑工程往往需要特别注意变形控制与环境保护,基坑设计已从强度控制设

计偏向于变形控制设计。本文介绍了一种强制搅拌斜向支撑桩在某软土基坑中的成功应用。相较于传统斜支撑,强制搅拌斜向支撑桩具有设备小巧、可小净距施工、施工速度快、可有效控制变形、适用于多种土质地层的特点,其进一步改良了传统斜向支撑的工艺并扩大了应用范围,对于类似的工程有一定的借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 左洋. 基坑开挖和支护工程中的时空效应问题[D]. 天津: 河北工业大学, 2009.  
ZUO Yang. The time-space effect problem of excavation and support engineering[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2009.
- [2] 曹慧, 许利东, 徐金鑫. “SMW工法桩+斜撑”在昆明软土地区基坑施工中的应用研究[J]. 建筑施工, 2016, 38(8): 1017-1020.  
CAO Hui, XU Li-dong, XU Jin-xin. Research of “SMW construction method + inclined bracing” applied to foundation pit construction in Kunming soft soil area[J]. Building Construction, 2016, 38(8): 1017-1020.
- [3] 任活, 王颖, 金小荣. 门架式和斜支撑围护型式在复杂软土基坑中的综合应用[J]. 工程勘察, 2009(增刊 2): 244-247.  
REN Huo, WANG Ying, JIN Xiao-rong. Transportation hub in eastern Hangzhou City water works precipitation pressure response[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(S2): 244-247.
- [4] 李苏春, 袁运涛. 斜撑在基坑抢险过程中的应用[J]. 土工基础, 2012, 26(5): 7-9.  
LI Su-chun, YUAN Yun-tao. Application of diagonal braces in the emergency response of a deep excavation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(5): 7-9.
- [5] 刘裕华, 陈征宙, 毕港. 一种改进的斜支撑体系支护某超大深基坑的变形分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(1): 38-43.  
LIU Yu-hua, CHEN Zheng-zhou, BI Gang. Practical study on displacements of oblique bracing supporting system in excavation of large pit[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(1):

- 38-43.
- [6] 沈晶晶. 装配式型钢斜抛撑在基坑支护工程中的应用[J]. 山西建筑, 2016, 42(7): 98-99.  
SHEN Jing-jing. The application of prefabricated steel cast diagonal brace in foundation pit support engineering[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(7): 98-99.
- [7] 朱碧堂, 王瑞祥, 杨敏. 超前斜撑排桩支护的力学特性与分析设计[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1763-1770.  
ZHU Bi-tang, WANG Rui-xiang, YANG Min. Behavior and design of fore-batter propped retaining piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1763-1770.
- [8] 赵天驰, 费伟, 朱火根. 软土地区地下室基坑注浆斜撑设计方法研究[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(6): 306-312.  
ZHAO Tian-chi, FEI Wei, ZHU Huo-gen. Study on the design method of grouting steel inclined support in the foundation of clay area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2018, 32(6): 306-312.
- [9] 崔永高, 阳吉宝. 坑底搅拌桩和树根桩复合结构用作  
基坑竖向斜支撑基础[J]. 建筑结构, 2001, 31(10): 45-46.  
CUI Yong-gao, YANG Ji-bao. Compound structure of deep mixed-in-place piles and root piles used as foundation of deep excavation diagonal brace[J]. Building Structure, 2001, 31(10): 45-46.
- [10] 陈海涛, 王伟, 李伟, 等. 超前注浆端承钢斜撑在基坑工程中的应用[J]. 建筑施工, 2017, 39(9): 1335-1336, 1342.  
CHEN Hai-tao, WANG Wei, LI Wei, et al. Application of advanced grouting at end bearing steel inclined strut to foundation pit engineering[J]. Building Construction, 2017, 39(9): 1335-1336, 1342.
- [11] 徐接武. 钢管内斜桩+排桩组合支护体系在滨海饱和软土地质基坑工程中的应用研究[J]. 福建建筑, 2021(12): 139-143.  
XU Jie-wu. Research on application of inner inclined steel pile + row steel pile combined support system in coastal saturated soft soil foundation pit engineering[J]. Fujian Architecture & Construction, 2021(12): 139-143.