

DOI: 10.7672/sgjs2025240127

PC 工法桩新型低碳支护体系在软土基坑工程中的应用*

钟 铮, 林 巧, 张竹庭, 颜 超

(上海建工集团股份有限公司, 上海 200080)

[摘要] 在“双碳”目标时代大背景下,为改善传统支护结构在风控、工效、污染等方面的不足,基于对 PC 工法桩新型围护结构的深入研究,针对其在基坑工程中采用的刚度理论、设计方法和技术经济分析等进行详细介绍,并具体阐述了将 PC 工法桩与 DPS 斜桩撑及预应力型钢组合支撑分别组合所形成的装配式可回收支护体系应用于不同深度软土深基坑中的技术优势、关键节点及施工效果,指出这类新型低碳支护体系安全可靠、绿色环保、高效节能,不仅能显著缩短工程工期,还能有效降低项目成本。

[关键词] 基坑;PC 工法桩;DPS 斜桩撑;支护;低碳;钢组合支撑;施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0127-07

Application of New Low-carbon Supporting System with PC Pile for Foundation Excavation Engineering in Soft Soil

ZHONG Zheng, LIN Qiao, ZHANG Zhuting, YAN Chao

(Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: In the context of the ambitious “Dual Carbon” goals era, in order to improve the deficiencies of traditional supporting structures in risk control, efficiency, pollution and so on, based on the in-depth study of the new retaining wall of PC pile, the stiffness theory, design method and techno-economic analysis of PC pile applied to excavation are described specifically, the technical advantages, critical nodes and construction effects of prefabricated recycled supporting system formed by combining PC pile with DPS inclined pile and prestressed steel composite support respectively which are applied to deep foundation excavation of different depths in soft soils are elaborated in detail. The results show that this new type of low-carbon support system is safe, reliable, green, efficient and energy-saving, which can not only significantly shorten the project period, but also can effectively reduce the project cost.

Keywords: foundation excavation; PC piles; DPS inclined piles; supports; low carbon; steel composite supports; construction

0 引言

“十三五”期间,我国城市基础建设进入全新纵向立体化开发与利用阶段,城市地下空间作为新型国土资源已成为世界性发展趋势^[1],基坑工程技术水平也步入了跨越式发展阶段,一系列规模庞大、

复杂困难的深基坑得以顺利施工。近年来,在“双碳”目标引领下,城市建设由外延扩张式向内涵提升式转变,“十四五”规划对统筹推进城市新基建作出了重要部署,要求重点推进系统完备、高效实用、绿色智能、安全可靠的现代化体系建设。在时代大背景下,传统支护结构施工工艺在经济性、安全性及环保要求等方面饱受诟病^[2]。在保证基坑安全施工的前提下,为弥补和完善传统支护结构的不足,进一步研发具有绿色低碳、高效节能和环保智能等性能的新型支护技术已成为地下工程领域的研究热点。

*上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(沪建科 2025-002-043);上海建工集团股份有限公司重点科研项目(25JCSF-11)

[作者简介] 钟 铮,正高级工程师,国家注册土木工程师(岩土),E-mail: zhongzheng@scg.cn

[通信作者] 林 巧,正高级工程师,国家注册土木工程师(岩土),E-mail: linqiao@scg.cn

[收稿日期] 2024-12-29

1 PC 工法组合钢管桩

1.1 工艺介绍

PC 工法组合钢管桩(简称 PC 工法桩)是近年来在国内得到较多应用的一种新型基坑围护结构,是由钢管桩与拉森钢板桩通过锁扣间隔连接形成的组合式钢质连续墙,具有整体刚度大、施工速度快、止水效果好、可回收利用、经济环保等优点^[3]。

目前,PC 工法桩常用的钢管桩规格有 $\phi 630$, $\phi 750$, $\phi 915$ 3 种,壁厚在 10~24mm,拉森钢板桩型号有 400mm×170mm,600mm×210mm 2 种。钢管桩和钢板桩根据受力需求可按插一跳一、插一跳二、插一跳三等形式间隔组合。

1.2 刚度理论

PC 工法桩由刚度差异较大的钢管桩和钢板桩 2 种受力构件组合而成,属于变刚度截面围护结构。根据韦实等^[4]的研究,在基坑开挖作用下,组成 PC 工法桩的钢管桩与钢板桩内力分布形式相同,两者的桩身弯矩之比近似等于其桩身抗弯刚度之比,这为 PC 工法桩组合截面的计算提供了理论依据。

PC 工法桩新型围护的受力分析通常有 2 种处理方式:①等效为一定厚度地下连续墙^[5],这种方式忽略了组合钢管桩截面刚度分布和内力分配的不均匀性,低估了 PC 工法桩的组合刚度;②等效为一定直径柱列式排桩,这种方式能一定程度顾及 PC 工法桩组合截面的刚度分布特性,但由于排桩并非连续分布墙体,将对被动区的土体弹簧作用有所削弱。

综上所述,针对采用 PC 工法桩作为围护结构的基坑工程,笔者建议首先根据单元组合截面的理论刚度将其等效为一定直径柱列式排桩,然后参照桩间距与桩径的比例适当提高地基土的水平向基床系数,之后可采用弹性地基梁法进行支护体系的受力变形分析。当基坑变形控制要求较高时,作用于组合钢管桩的水平力考虑全部由钢管桩承受,钢板桩作为安全储备仅起止水隔断作用。

1.3 设计方法

结合行业标准规程^[6-7],PC 工法桩的设计内容主要包括以下 4 个方面。

1) 桩长设计:根据基坑的稳定性和变形控制要求确定钢管桩桩长、嵌固深度,同时兼顾其回收施工的可行性。

2) 截面选型:结合支撑体系布置,根据剖面计算得到的弯矩、剪力和变形计算成果,选择合适的截面尺寸和组合形式。

3) 止水设计:钢管桩与钢板桩可采用等长或不

等长设计,并应同时满足抗渗流稳定要求,不另设止水帷幕。

4) 强度折减:考虑组合钢管桩的多次循环使用,其强度设计值可适当折减。

1.4 技术经济分析

在高水位滨海软土地区,基坑工程中常用的围护形式有 SMW 工法桩、钻孔灌注桩和地下连续墙等,其中地下连续墙由于工程造价和刚度要求较高不作为对比对象,SMW 工法桩和钻孔灌注桩与 PC 工法桩的技术经济分析对比如表 1 所示。

Table 1 Techno-economic comparison of enclosure forms				
围护形式	优点	缺点	造价	适用性
PC 工法桩	1)绿色环保无污染; 2)可回收循环使用; 3)施工速度快,无须养护; 4)整体刚度较高; 5)挡土结构兼作隔水帷幕; 6)工厂化制作,质量可控	1)钢管直径定尺; 2)桩体规格较少; 3)后期拔桩需施工场地	适中	适用范围较广
SMW 工法桩	1)型钢可回收利用; 2)施工速度较快; 3)挡土结构兼作隔水帷幕; 4)型钢标准化生产; 5)型钢可灵活布置	1)水泥桩施工污染环境; 2)需预留养护时间; 3)抗弯刚度一般; 4)施工机械对场地空间要求较高; 5)后期拔桩需施工场地	略高	适用范围较广
钻孔灌注桩	1)施工工艺成熟; 2)施工质量可靠; 3)桩体强度高,受力性能好; 4)桩径、桩长灵活设置	1)排放大量泥浆,污染环境; 2)形成永久性地下障碍物; 3)施工周期长; 4)需预留养护时间; 5)需另设隔水帷幕	较高	适用范围广

迄今为止,PC 工法桩已在国内(尤其长三角地区)千余个基坑工程中成功应用^[2-3,7-10],大量工程实践证明其具有显著的经济和社会效益。然而,出于新技术成果转化初期的安全风险考虑,PC 工法桩多与传统支撑体系配合使用,与装配式可回收新型支撑体系全面结合的工程案例相对较少。下面尝试将 PC 工法桩与 DPS 斜桩撑及预应力型钢组合支撑分别组合并应用于上海高水位软土深基坑开挖施工中,以期拓宽地下工程领域可持续发展“新赛道”。

2 PC 工法桩+DPS 斜桩撑体系

2.1 DPS 斜桩撑

DPS 斜桩撑是一种基坑快速前撑新技术,斜桩

撑采用工厂预制,以矩形桩为主,采用专用设备(静压斜桩机)施工,与铅垂面夹角常取 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ (见图1)。DPS斜桩撑施工迅速,在开挖前便已施作完成,能为基坑施工全过程提供可靠支撑,有利于环境保护;桩端嵌入持力层后,联合围护桩组成高承载力支护体系,可有效抑制基坑开挖引起的侧向变形。



图1 DPS斜桩撑施工及完成实景

Fig.1 Construction and completion of DPS inclined pile

DPS斜桩撑前期可穿插施工,后期待底板换撑达到强度即可拆除,具有无须现场制作养护和分区分期开挖、施工速度快、施工质量可靠等优点,在深度不大的大面积不规则基坑工程中具有较好的适用性。

2.2 工程概况

背景工程地处上海市嘉定新城,拟建项目为一高层住宅小区,并设置整体1层地下车库。基坑面积约 $16\,000\text{m}^2$,周长 500m ,开挖深度 6m 。基坑平面布置如图2所示。

项目场地属于滨海平原地貌类型,地基土属第四纪松散沉积物,主要由黏性土、粉土和砂土组成,一般呈水平层理分布,可划分为7个工程地质层。基坑开挖主要土层物理力学参数如表2所示。

表2 主要土层物理力学参数(1)

Table 2 Physical and mechanical parameters of main soil layers(1)					
土层编号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
② ₂	粉质黏土	18.7	20.9	18.0	3.0×10^{-6}
② ₃	砂质粉土	19.0	5.0	30.8	6.0×10^{-4}
③	淤泥质粉质黏土	17.6	11.7	16.9	5.0×10^{-6}
⑤ ₁₋₁	黏土	17.8	16.6	13.0	2.0×10^{-6}
⑤ ₁₋₂	粉质黏土夹薄层粉土	18.2	17.8	19.0	2.0×10^{-4}

场地表层存在厚层杂填土,平均厚度 3.15m ,最厚处 4m ,并含大量砖块、碎石等。场地内局部有暗浜分布,浜底最深处 4.5m 。基坑开挖面大致位于③淤泥质软土层顶面。

此外,场地内地下水埋深为 $1.49\sim 1.94\text{m}$,浅层

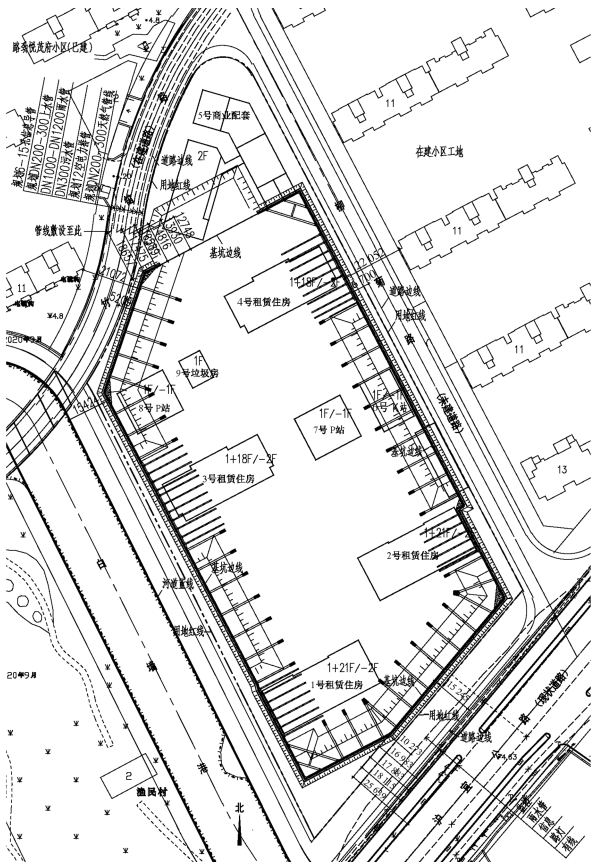


图2 基坑平面布置(PC工法桩+DPS斜桩撑)

Fig.2 Plan layout of foundation excavation (PC piles + DPS inclined piles)

普遍分布的②₃砂质粉土层渗透性较大,对围护结构的止水性能提出一定要求。

2.3 基坑支护方案

本项目作为软土地区规模较大的基坑工程,为保证开挖施工安全、便捷,在主楼区域采用“PC工法桩围护+1道DPS斜桩撑”支护方案,避免地库斜抛撑支护区域面临的底板切割和盆边挖土等问题,同时可有效缩短工期。

选用 $\phi 630\times 14@1\,100\text{mm}$ 型PC工法桩,钢管桩桩长 14m ,桩间连接桩长 12m 的拉森钢板桩($400\text{mm}\times 170\text{mm}$);DPS斜桩撑采用 $350\text{mm}\times 450\text{mm}$ 截面预制混凝土矩形桩,桩长 28m ,间距 3m ,竖向夹角 35° ,顶部通过钢筋混凝土顶圈梁与围护桩整浇连接。基坑围护典型剖面如图3所示。

2.4 高效连接节点

1)DPS斜桩撑与PC工法桩连接节点。DPS斜桩撑通过钢筋混凝土冠梁与PC工法桩围护结构进行整浇连接。钢管桩顶部穿出冠梁并在洞口周边增设加强钢筋,冠梁高度范围内的钢管桩外壁设有抗剪栓钉,通过上述措施增强钢管桩和冠梁之间连接的可靠性。斜桩撑位置的冠梁根据其定位在迎

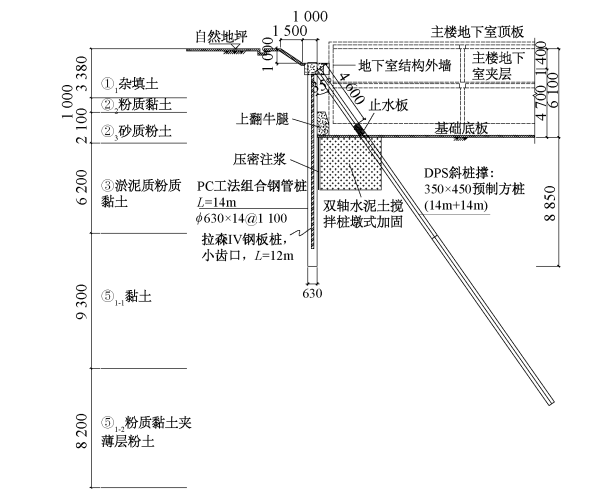


图 3 基坑围护典型剖面(PC 工法桩+DPS 斜桩撑)

Fig. 3 Typical profile of foundation excavation enclosure(PC piles + DPS inclined piles)

坑面局部设置外伸牛腿,保证与斜桩撑顶部能够有效连接。相关节点如图 4 所示。

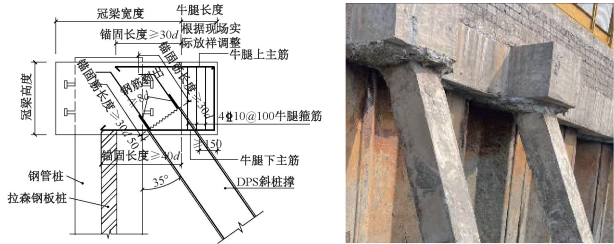


图 4 DPS 斜桩撑与 PC 工法桩连接节点

Fig. 4 Connection joint of DPS inclined pile and PC pile

2) DPS 斜桩撑与结构底板连接节点。由于 DPS 斜桩撑需保留至底板及换撑完成后方可拆除,为避免影响底板结构施工同时防止局部渗漏,在工厂预制阶段,将预制方桩穿越底板高度范围内的主筋保护层剥离,采用 8mm 厚钢板替换,并在中部标高焊接一圈封闭止水钢板,桩身中部预留备用注浆孔,在拆除时可从底板完成面向上直接割除斜桩撑结构。相关节点如图 5 所示。

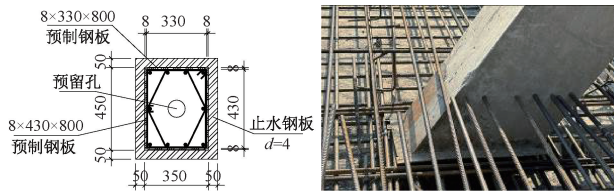


图 5 DPS 斜桩撑与结构底板连接节点

Fig. 5 Connection joint of DPS inclined pile and structure floor

2.5 监测数据分析

1) 围护体侧向位移。基坑围护体在不同工况下的侧移曲线如图 6 所示。随着开挖施工进行,各

测点的水平位移快速增加,在开挖至坑底工况达到最大值 19.6mm,出现在开挖面上方约 2/3 挖深位置,并在基础底板浇筑完成后有所恢复。侧向位移曲线总体呈上大下小形态,随着挖深增大,在围护体顶部出现明显反向变形,表明 DPS 斜桩撑已发挥作用,与板撑支护结构的理论变形有相似之处。

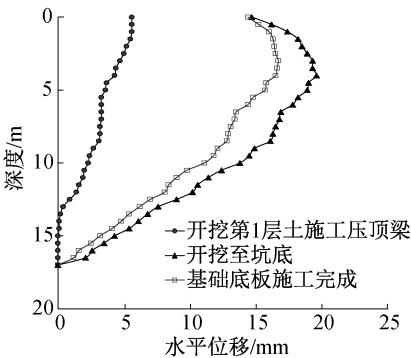


图 6 基坑围护体侧移曲线(PC 工法桩+DPS 斜桩撑)

Fig. 6 Lateral displacement curves of foundation excavation enclosure structure (PC piles + DPS inclined piles)

2) 支撑轴力。2 处代表性 DPS 斜桩撑测点的支撑轴力随时间变化曲线如图 7 所示,其中 ZL2 位置的开挖施工稍滞后于 ZL5 位置。由图 7 可见,在土方开挖期间斜桩撑的轴力随挖深增大而迅速增加,在开挖至坑底工况达到最大值 477kN 和 456kN,约为斜桩撑承载力特征值的 60%。在后续基础底板施工期间,DPS 斜桩撑的轴力变化逐渐趋于平稳,并出现约 15% 的少量降低。

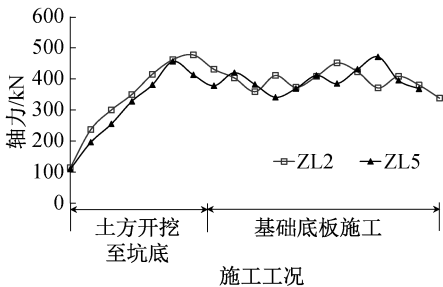


图 7 DPS 斜桩撑轴力时变曲线

Fig. 7 Axial force change curves of DPS inclined piles with time

2.6 应用效果总结

施工期间,本工程基坑本体和周边环境均处于安全状态,围护体侧向位移 $\leq 0.35\% H$ (H 为基坑挖深),变形控制效果出色。实施方案(PC 工法桩+DPS 斜桩撑)与常规方案(SMW 工法桩+竖向钢管斜撑)的技术经济对比如表 3 所示,实施方案相较于常规方案虽要增加约 40% 的工程造价,但能缩短

基坑工期 75%以上,在工期紧的大面积浅基坑工程中具有一定应用价值。

表 3 基坑方案技术经济对比(PC 工法桩+DPS 斜桩撑)

Table 3 Techno-economic comparison of foundation excavation schemes(PC piles + DPS inclined piles)				
基坑支护方案	围护施工 养护工期/d	支撑开挖到 底工期/d	围护造 价/万元	支撑造 价/万元
PC 工法桩+ DPS 斜桩撑	7	10	62	78
SMW 工法桩+ 竖向钢管斜撑	35	40	89	10

3 PC 工法桩+预应力型钢组合支撑体系

3.1 预应力型钢组合支撑

预应力型钢组合支撑是近年来国内应用较广泛的一种典型单元组合式装配化支撑体系,技术渐趋成熟。该技术选用工厂化生产的标准钢构件,在现场通过模块化组装,采用高强螺栓将多根型钢与盖板、系杆等整体连接,并在支撑端部施加预应力,形成有效的组合支撑体系。

预应力型钢组合支撑因其拆装便捷、施工精度高、可重复利用等特点符合绿色施工发展理念,兼具高强连接、可施加预应力、受力性状好、能有效控制变形等优势,正在逐渐得到业内认可。

3.2 工程概况

背景工程地处上海市普陀区,拟建项目为 1 栋地上 5 层、地下 2 层办公建筑。基坑面积约 3 000m²,周长约 220m,开挖深度约 10m。基坑平面布置如图 8 所示。

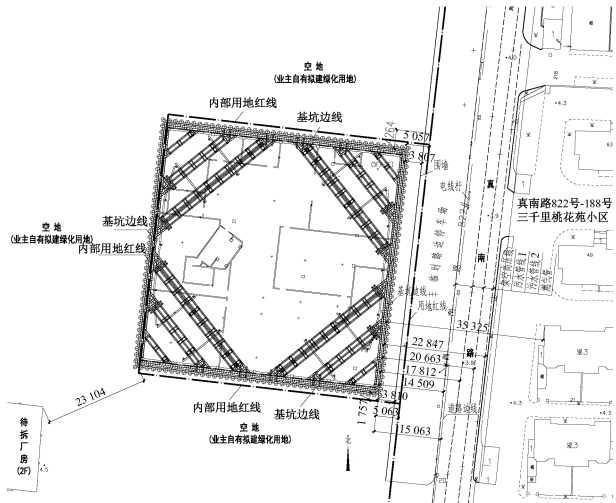


图 8 基坑平面布置(PC 工法桩+预应力型钢组合支撑)
Fig. 8 Plan layout of foundation excavation
(PC piles + prestressed steel composite supports)

项目场地属于滨海平原地貌类型,地基土属第四系滨海相、河口相及浅海相、沼泽相沉积物,主要

由黏性土、淤泥质土和砂性土组成,一般呈水平层理分布,可划分为 8 个主要地质层次。基坑施工涉及的主要土层物理力学参数如表 4 所示。

表 4 主要土层物理力学参数(2)

Table 4 Physical and mechanical parameters of main soil layers(2)					
土层 编号	土层名称	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	渗透系数 K / ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
②	粉质黏土	18.7	21.0	17.5	3.0×10^{-6}
③	淤泥质粉质黏土	17.5	12.0	18.0	2.0×10^{-6}
③ ₁	黏质粉土	18.5	5.0	24.0	2.0×10^{-4}
④	淤泥质黏土	16.7	13.0	12.5	4.0×10^{-7}
⑤	黏土	17.6	17.0	13.0	5.0×10^{-7}
⑥	粉质黏土	19.9	44.0	17.5	2.0×10^{-6}
⑦	黏质粉土	18.8	6.0	29.0	1.0×10^{-4}

场地地表有大面积厚填土分布,平均层厚 2.47m,部分地段达 6m 以上,夹杂大量建筑垃圾。基坑开挖深度范围内以深厚的淤泥质软土层为主,层厚 10.2~13.5m。此外,场地内地下水埋深在地表以下 1.02~1.43m,浅部条带状分布的③₁黏质粉土层渗透性较大。

3.3 基坑支护方案

由于基坑开挖深度较大,在深厚软土地层中施工具有一定风险,故考虑采用“PC 工法桩围护+2 道预应力型钢组合支撑”支护方案,在基坑施工完成后,围护结构及支撑构件可实现全部回收。

选用 $\phi 915\times 14@1\,385\text{mm}$ 型 PC 工法桩作为基坑围护结构,钢管桩桩长 24m,钢管桩间设置 18m 长拉森钢板桩(400mm \times 170mm)。基坑围护结构典型剖面如图 9 所示。

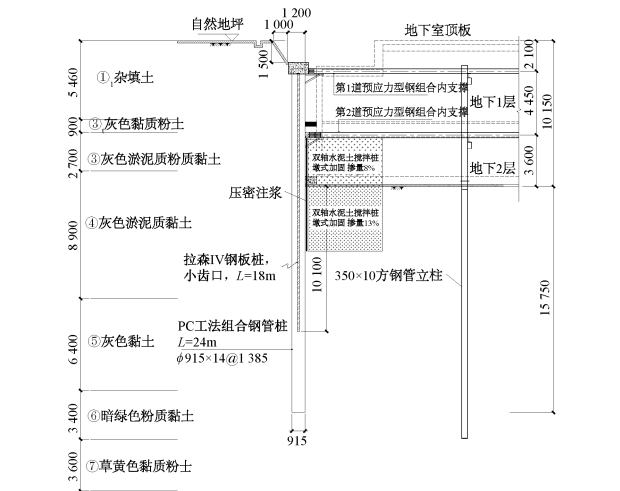


图 9 基坑围护结构典型剖面
(PC 工法桩+预应力型钢组合支撑)
Fig. 9 Typical profile of foundation excavation enclosure
structure(PC piles + prestressed steel composite supports)

基坑内部竖向设置 2 道预应力型钢组合水平支撑,支撑平面采用对称分布的 4 个大角撑布置,留出中部较大出土空间。第 1 道支撑采用 3HW350×350 型钢组合,并通过 HW400×400 型钢腰梁与顶圈梁连接;第 2 道支撑采用 4HW350×350 型钢组合,并通过 2HW400×400 型钢腰梁与围护桩连接。

3.4 高效连接节点

3.4.1 型钢组合支撑与 PC 工法桩连接节点

型钢组合支撑通过型钢腰梁与 PC 工法桩围护结构进行连接,型钢腰梁能协调支撑体系与围护结构间的受力和变形,使两者形成基坑支护整体共同受力。型钢腰梁一般采用单根型钢或多根型钢横向组合,通过 T 形传力键等抗剪措施与围护结构有效连接,并在下方设置防掉落牛腿支托。为确保水平围压的可靠传递,还可在两者间增加素混凝土填充。相关节点如图 10 所示。

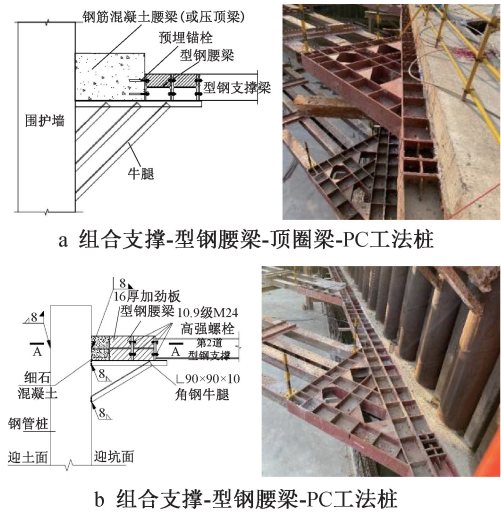


图 10 型钢组合支撑与 PC 工法桩连接节点
Fig. 10 Connection joint of section steel composite support and PC pile

3.4.2 型钢组合支撑与钢立柱连接节点

钢立柱通常采用型钢或方钢管,钢立柱直接插入土中或在柱端设置灌注桩或预制桩作为立柱桩。型钢组合支撑与钢立柱间通过托梁(横梁)与托座连接,支撑下方设有托梁,托梁搁置在托座上,托座通过螺栓或焊接与立柱连接,节点做法如图 11 所示。

当托梁与立柱斜交时,由于螺栓孔位施工误差,托梁连接螺栓与支撑和托座的孔位不易同时对齐,为确保连接节点可靠度及安全度,在托梁上方加焊角钢将托梁与立柱进行补强相连,节点做法如图 12 所示。

3.5 监测数据分析

1) 围护体侧向位移。基坑围护体施工各阶段

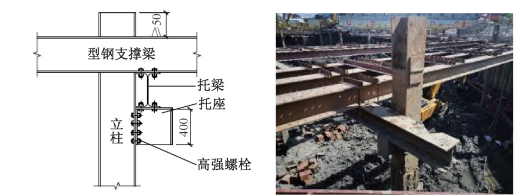


图 11 型钢组合支撑与钢立柱连接节点
Fig. 11 Connection joint of section steel composite support and steel column

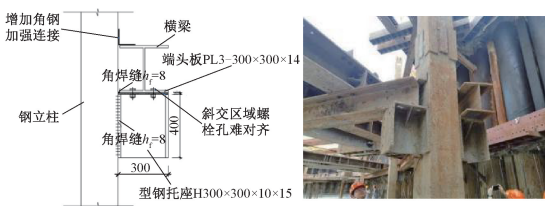


图 12 型钢组合支撑与钢立柱斜交加强节点
Fig. 12 Oblique reinforced joint of section steel composite support and steel column

的侧移曲线如图 13 所示,围护结构的主要变形发生在开挖阶段,并随着开挖施工的进程而逐步增加,在开挖至坑底时达到最大侧移值 36.7mm,并于基础底板浇筑完成后出现小幅度收敛。围护体侧移曲线呈两头小、中间大形态,属典型的板撑支护体系变形特征,最大位移出现在开挖面下方约 1.2 倍挖深位置,这与坑底软土地层的流变特性有一定关联。

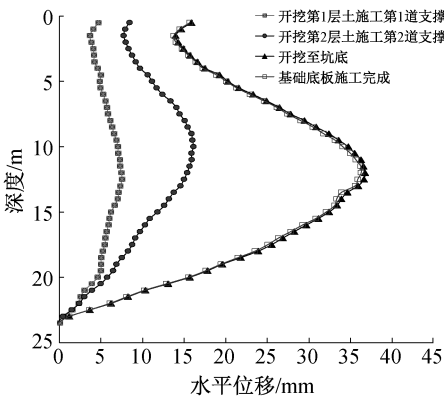


图 13 基坑围护体侧移曲线
(PC 工法桩+预应力型钢组合支撑)
Fig. 13 Lateral displacement curves of foundation excavation enclosure structure
(PC piles + prestressed steel composite supports)

2) 支撑轴力。选取 2 道型钢组合支撑的 4 个截面测点,得到轴力随时间变化曲线如图 14 所示,Z2,Z3 和 Z6,Z7 为上下对应的第 1,2 道支撑测点。可见 2 道型钢支撑的轴力都随开挖施工的进程呈线性增长趋势,由于基坑面积不大,施工速度较快,在土

方开挖和支撑架设及底板浇筑期间,支撑轴力的增长速率差异不大,第 1,2 道支撑轴力的平均增速分别约为 12,10kN/d。

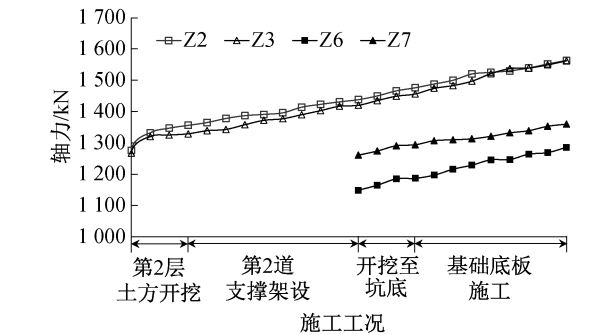


图 14 型钢组合支撑轴力时变曲线

Fig. 14 Axial force change curves of section steel composite support with time

3.6 应用效果总结

本基坑开挖期间围护体侧向位移 $\leq 0.4\% H$ (H 为基坑挖深),周边建筑及地下管线均正常使用,围护结构未发生明显渗漏,实施效果令人满意。实施方案(PC 工法桩+预应力型钢组合支撑)与常规方案(SMW 工法桩+钢筋混凝土支撑)的技术经济对比如表 5 所示,实施方案相较于常规方案不仅能缩短约 45%的基坑工期,还能降低 20%以上的工程造价,在工期紧但形状规则的深基坑工程中具有显著的经济和社会效益。

表 5 基坑方案技术经济对比(PC 工法桩+预应力型钢组合支撑)

Table 5 Techno-economic comparison of foundation excavation schemes(PC piles + prestressed steel composite supports)				
基坑支护方案	围护施工 养护工期/d	支撑开挖到 底工期/d	围护造 价/万元	支撑造 价/万元
PC 工法桩+预应力型钢组合支撑	20	60	300	132
SMW 工法桩+钢筋混凝土支撑	50	95	381	176

4 结语

1)将 PC 工法桩首先根据组合截面刚度等效为柱列式排桩,然后参照桩间距与桩径比例提高地基土的水平向基床系数,之后可采用弹性地基梁法进行支护体系的受力变形分析。当基坑变形控制要求较高时,作用于组合钢管桩的水平力全部由钢管桩承受,钢板桩仅起止水隔断作用。

2)PC 工法桩+DPS 斜桩撑体系在开挖期间的围护体侧移总体呈上大下小形态,随着挖深增大,在围护体顶部出现明显反向变形,最大变形发生在

开挖至坑底工况,出现在开挖面上方约 2/3 挖深位置;DPS 斜桩撑轴力也在开挖至坑底工况达到最大值,约为斜桩撑承载力特征值的 60%,在后续基础底板施工期间,趋于平稳并出现约 15%的少量降低。

3)PC 工法桩+DPS 斜桩撑支护方案的围护体侧移值 $\leq 0.35\% H$ (H 为基坑挖深),相较于常规方案(SMW 工法桩+竖向钢管斜撑)虽要增加约 40%的工程造价,但能缩短基坑工期 75%以上,在工期紧的大面积浅基坑工程中具有一定的应用价值。

4)PC 工法桩+预应力型钢组合支撑体系在开挖期间的围护体侧移呈两头小、中间大形态,最大侧移发生在开挖至坑底工况,出现在开挖面下方约 1.2 倍挖深位置;由于基坑面积不大,钢支撑的轴力随开挖施工的进行呈线性增长趋势,在土方开挖和支撑架设及底板浇筑期间,支撑轴力的增长速率差异不大,平均轴力增速 10~12kN/d。

5)PC 工法桩+预应力型钢组合支撑支护方案的围护体侧移值 $\leq 0.4\% H$ (H 为基坑挖深),相较于常规方案(SMW 工法桩+钢筋混凝土支撑)不仅能缩短约 45%的基坑工期,还能降低 20%以上的工程造价,在工期紧但形状规则的深基坑工程中具有显著的经济和社会效益。

参考文献:

[1] 王卫东,丁文其,杨秀仁,等. 基坑工程与地下工程——高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020,53(7):78-98.
WANG W D, DING W Q, YANG X R, et al. Deep excavation engineering and underground engineering—New techniques of high-efficiency and energy-saving, low environmental impact, and sustainable development [J]. China civil engineering journal, 2020,53(7):78-98.
[2] 许海明,郭生根,卢纪璠,等. PC 工法桩在基坑支护中的研究及应用[J]. 施工技术,2019,48(4):85-89.
XU H M, GUO S G, LU J F, et al. Research and application of PC engineering piles in foundation excavation supporting [J]. Construction technology, 2019,48(4):85-89.
[3] 林巧. 绿色高效支护体系在软土深基坑工程中的应用[J]. 建筑结构,2022,52(S1):2602-2607.
LIN Q. Application of green and efficient supporting system in soft soil deep foundation pit engineering [J]. Building structure, 2022,52(S1):2602-2607.
[4] 韦实,梁荣柱,李忠超,等. 基于 3D 打印的 PC 工法桩基坑围护结构变形特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(S2):4320-4332.
WEI S, LIANG R Z, LI Z C, et al. Model test study on deformation characteristics of retaining structure of pile foundation pit by PC method based on 3D printing[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023,42(S2):4320-4332.

compactness of concrete [J]. Development guide to building materials,2023,21(16):54-56.

[4] 李红民,王健,闫凯. 基于多传感器数据融合的空间结构健康状态评估方法[J]. 建筑结构学报,2023,44(S1):364-371.
LI H M, WANG J, YAN K. Health state evaluation method of spatial structure based on multi-sensor data fusion[J]. Journal of building structures,2023,44(S1):364-371.

[5] FENG Q, LIANG Y B. Development of piezoelectric-based technology for application in civil structural health monitoring [J]. Earthquake research advances,2023,3(2):100154.

[6] 陆林军,余海帆,乔丕忠. 基于应力波传播机理的混凝土无损检测研究综述[J]. 力学季刊,2021,42(2):197-216.
LU L J, YU H F, QIAO P Z. Nondestructive evaluation of concrete based on stress wave propagation mechanism; a review [J]. Chinese quarterly of mechanics,2021,42(2):197-216.

[7] 牛彦平,高宇甲,刘闯. 基于 PZT 传感器的粉煤灰混凝土强度监测及预测研究[J]. 建筑结构,2023,53(S2):1399-1404.
NIU Y P, GAO Y J, LIU C. Study on strength monitoring and prediction of fly ash concrete based on PZT sensor[J]. Building structure,2023,53(S2):1399-1404.

[8] 杨俊涛,左文建,张文龙,等. 压电陶瓷传感器监测混凝土内部缺陷的可行性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (1): 111-122.
YANG J T, ZUO W J, ZHANG W L, et al. Feasibility study on internal defect monitoring of concrete structure based on piezoceramics transducer [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2023,42(1):111-122.

[9] 杨映泉,许斌,栾乐乐,等. 基于表面压电波动测量的钢管砼剥离检测试验[J]. 压电与声光,2018,40(3):437-441.
YANG Y Q, XU B, LUAN L L, et al. Experiment on interface debonding detection for concrete-filled steel tubular structure using surface wave measurement [J]. Piezoelectrics & acoustooptics,2018,40(3):437-441.

[10] 庄志有. 基于外贴压电陶瓷的钢管混凝土内部缺陷检测方法研究[D]. 泉州:华侨大学,2019.
ZHUANG Z Y. Study on internal defects detection method for concrete filled steel tube with surface-mounted piezoceramics patches [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019.

[11] 许斌,蔡萍,周宇,等. 基于嵌入压电技术的钢管核心混凝土缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(3):489-492,496.
XU B, CAI P, ZHOU Y, et al. Experimental study on defect detection of concrete core of concrete-filled steel tubular with embedded PZT [J]. Piezoelectrics & acoustooptics,2015,37(3):489-492,496.

[12] ZHANG J, LI Y, DU G F, et al. Damage detection of L-shaped concrete filled steel tube (L-CFST) columns under cyclic loading using embedded piezoceramic transducers [J]. Sensors, 2018, 18(7):2171.

[13] 柯钧豪,罗晓生,张国文,等. 矩形钢管砼截面内缺陷对不同路径波动测量的影响 [J]. 压电与声光, 2022, 44 (6): 990-997.
KE J H, LUO X S, ZHANG G W, et al. Effect of internal defects in the cross section of concrete-filled rectangular steel tubes on stress wave measurement along different path [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2022, 44 (6): 990-997.

[14] 黄斌聪,林佳铭,蔡广福. 基于压电陶瓷法的巨型多腔钢管混凝土柱检测[J]. 建筑施工,2022,44(9):2264-2267.
HUANG B C, LIN J M, CAI G F. Detection of giant multi cavity concrete filled steel tubular columns based on piezoelectric ceramic method [J]. Building construction, 2022, 44 (9): 2264-2267.

[15] 康永乐,邱雷. 导波结构健康监测中损伤因子的研究和应用 [J]. 国外电子测量技术,2021,40(6):113-119.
KANG Y L, QIU L. Research and application of damage indexes in guided wave based structural health monitoring [J]. Foreign electronic measurement technology, 2021, 40 (6): 113-119.

(上接第 133 页)

[5] 邓帅,张晨光,李明广,等. 基于三维精细化模型的 PC 工法桩支护体系刚度研究[J]. 特种结构,2019,36(6):83-87.
DENG S, ZHANG C G, LI M G, et al. Study on stiffness of PC engineering pile support system based on 3D fine model [J]. Special structures, 2019, 36 (6): 83-87.

[6] 建研地基基础工程有限责任公司. 钢板桩支护技术规程: T/CECS 720—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
CABR Foundation Engineering Co., Ltd. Technical specification for retaining and protection of steel sheet piling: T/CECS 720—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[7] 浙江大学建筑设计研究院有限公司,中国市政工程中南设计研究总院有限公司,杭州环宸基础工程有限公司. 组合钢管桩连续墙技术规程: T/ZS 0340—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Huanchen Foundation Engineering Co., Ltd. Technical specification for composite steel pipe pile continuous wall: T/ZS 0340—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.

[8] 刘涛,陈允斌,刘浩. 滨海软土筑岛围堰超深基坑工程实例分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):773-778.
LIU T, CHEN Y B, LIU H. Case study of ultra-deep foundation pit by island and cofferdam construction in soft soils in coastal areas [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34 (S1): 773-778.

[9] 柯思潮. PC 工法桩在地下车库基坑工程中的应用[J]. 建筑施工,2018,40(7):1092-1094.
KE L C. Application of PC construction method pile to foundation pit engineering of underground garage [J]. Building construction, 2018, 40 (7): 1092-1094.

[10] 陈赞. PC 工法支护桩在某深厚软土地区基坑中的应用及分析[J]. 浙江建筑,2018,35(5):32-35.
CHEN Y. Application and analysis of PC pile support method in a deep soft soil foundation pit [J]. Zhejiang construction, 2018, 35 (5): 32-35.