

双排PC工法桩在软土地区基坑中的应用研究

郑建建^{1,2}, 宣 锋^{1,2}, 许大鹏^{1,2}

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 上海水业设计工程有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 上海某水厂新建提升泵房及臭氧接触池基坑采用了双排PC工法桩围护。首先分析了PC工法桩围护的标准规范和工程应用现状,然后参考钢与混凝土组合结构设计了双排PC工法桩围护结构桩顶连接节点,并采用数值仿真模型分析了基坑开挖过程中的周边环境的影响并与现场实测结果进行了对比。结果发现:采用双排PC工法桩围护的提升泵房基坑开挖过程中工程安全可靠,未对周边环境造成影响;相比于双排钻孔灌注桩围护,双排PC工法桩围护施工便利,可大大减少工期;PC工法桩可重复利用,可较大幅度地节约工程费用。

关键词: 双排; PC工法桩; 钢管桩; 钢板桩; 数值模拟

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0354-04

Analysis on Application of Double-row PC Piles in Soft Soil Area

ZHENG Jianjian^{1,2}, XUAN Feng^{1,2}, XU Dapeng^{1,2}

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Water Design and Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The double-row PC pile enclosure is used in the foundation pit of the newly built lift pump house and ozone contact tank in a waterworks in Shanghai. Firstly, the engineering application status and standard specifications of PC pile enclosure are analyzed. Then, referring to the steel and concrete composite structure, the top connection nodes of double-row PC pile enclosure are designed. The numerical simulation model is used to analyze the impact on the surrounding environment during the excavation process of the foundation pit, and the results are compared with the field measurements. The results show that the excavation process of the foundation pit for the lift pump house using double-row PC piles is safe and reliable, without impact on the surrounding environment. Compared with the enclosure of double-row bored cast-in-place piles, the enclosure of double-row PC piles are more convenient in the construction, which can greatly reduce the construction period. The PC piles can be reused, which can greatly save engineering costs.

Keywords: double row; PC pile; steel pipe pile; steel sheet pile; numerical simulation

0 引 言

PC工法桩(pipe-combination, 钢管桩组合)是一种新型的基坑围护形式,主要由钢管、拉森钢板桩组合而成^[1],和拉森钢板桩的搭接原理相同,钢管上也焊接企口,拉森钢板桩和钢管桩之间通过锁口搭接连接,可有效起到止砂、止水等作用。该围护方式可重复回收利用、节能环保^[2],且适用范围也较为广泛。目前在上海、浙江、江苏、安徽等地的基坑工程中已有一些PC工法桩围护体系的工程应用案例,但尚无针对性的指导规范。

收稿日期: 2025-01-02

基金项目: 上海市政总院科研课题,锚桩式双排钢板桩及双排PC工法桩围护结构关键技术研究及应用(K2022K066A)

作者简介: 郑建建(1986—),男,硕士,高级工程师,从事水厂、管线、综合管廊结构及基坑设计研究工作。

上海某水厂新建提升泵房及臭氧接触池基坑,原设计采用双排钻孔灌注桩围护,为节省工期、节约造价,经过研究分析后采用了双排PC工法桩围护。

1 PC工法桩应用及研究现状

目前国内已有较多关于双排钻孔灌注桩的规范以及钢板桩的规范,但尚无专门针对PC工法桩的规范^[3],也基本没有规范提及到PC工法桩围护。安徽省标准《钢板桩基坑支护技术规程》(DB34/T 3946—2021)^[4]把钢管/U型组合型截面作为一种钢板桩截面布置形式进行了简单介绍,但对其构造和计算并未给出具体规定。

杨绍红^[5]分析了PC工法桩的工艺原理及适用范围,介绍了施工工艺和施工关键点要点,从基坑工程的施工便利性、安全性、经济性等方面阐述PC工法桩的优点,PC工法桩桩身强度高、抗弯和抗剪性能

好,能很好地控制基坑变形,确保基坑的安全性和稳定性。

许海明等^[6]通过杭州西子智慧产业园某基坑工程实例,面对该工程基坑平面面积大、形状不规则、土质较差、周边环境比较复杂等问题,采用PC工法桩作为围护结构,不仅提高了施工效率,而且节约了成本,降低了资源消耗,为PC工法桩围护在类似基坑中的推广和运用提供了参考经验。

陈赞^[7]介绍了PC工法桩可根据基坑开挖深度及地质条件选择钢管桩与拉森钢板桩的不同组合形式,方便灵活;并且依托PC组合钢管桩作为支护体系应用于软土基坑中的实际案例,通过分析监测数据得到的研究结果,表明PC组合桩整体刚度大,有较好的止水效果,施工速度快且绿色环保。

陈圣贤^[8]在湖州德清县某基坑工程中有应用了PC组合钢管桩围护,他分析了PC组合钢管桩的构造设计要求以及施工要求,对PC组合钢管桩的特点进行了总结,表示该围护方式具有安全、经济、环保等一系列优势。

张宁^[9-10]结合工程实际,介绍了PC工法桩在上海软土地区基坑工程中的应用情况。工程实践表明PC工法组合桩在上海软土地区具有良好的适用性,是一种绿色、经济、高效的围护体系。

李福连^[11]研究了PC工法桩快速接头技术,认为该围护方式与型钢水泥土搅拌墙相比,施工工期更短,回收起拔时侧摩阻力也更小,具有广泛的推广应用空间。

分析以上工程案例,可以看出PC工法桩具有以下优点:

(1)桩身强度高、刚度大。根据刚度等效原则进行换算, $\phi 820\times 14$ 钢管桩相当于直径796 mm的钻孔灌注桩,可将围护结构变形控制安全范围内,避免因基坑变形对周边环境造成影响,确保基坑自身及周边环境的安全。

(2)止水效果好,不需要额外设置止水帷幕。PC工法桩之间通过止水锁口相互咬合连接,可起到良好止水效果,可有效避免基坑边壁渗水、管涌等问题,不需要额外设置止水帷幕。

(3)施工过程绿色环保,不会产生泥浆,不会对周边环境造成污染。

(4)经济安全,成本低。在基坑回填后可全部回收,重复使用,不遗留地下障碍物。

可以看出PC工法桩具有较大的推广应用价值,不过由于缺乏针对的规范,目前PC工法桩在实际工程应用中主要采用半经验、半理论的设计方法。同时PC工法桩应用案例基本为内支撑式围护,悬臂式双排PC工法桩案例尚无相关文献资料及相关规范。

2 工程应用

2.1 工程及地质情况

上海某水厂新建提升泵房及臭氧接触池基坑平面尺寸48.4 m $\times$ 74.7 m,提升泵房侧开挖深度6.9 m,根据本工程地勘报告,拟建场地土层的力学参数见表1,场地地下水位在设计地坪标高以下0.5 m。

表1 土层力学参数

编号	土层名称	土层厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	E_0/MPa	$m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
①	填土	3.30	18.0	5.0	10.0	2.0	1.0
③	淤泥质粉质黏土	3.90	17.5	16.0	13.0	3.3	1.9
④	淤泥质黏土	7.30	16.7	11.0	11.0	2.3	1.7
⑤ ₁₋₁	粉质黏土	3.80	17.9	18.5	15.0	4.2	2.8
⑤ ₁₋₂	粉质黏土夹粉性土	1.60	18.0	18.6	15.0	4.5	2.9
⑤ ₂	粉砂	5.00	18.7	32.0	4.0	9.3	3.5

注: γ 为重度; φ 为直剪固结快剪内摩擦角; c 为直剪固结快剪黏聚力; E_0 为压缩模量; m 为水平向基床系数沿深度增大的比例系数。

原设计提升泵房及臭氧接触池基坑围护采用双排钻孔灌注桩围护。但本工程工期比较紧张,钻孔灌注桩施工和养护时间较长,会造成工期的增加;同时该侧生产管道、雨污水管道较为密集,后期管道敷设时不可避免的需要凿除钻孔灌注桩,凿桩工作量较大,会造成工期和工程费用的增加。

PC工法桩桩身不需要绑扎钢筋和浇筑混凝土,可有效缩短工期;施工完成后可以完全回收,不遗留

地下障碍物,不会影响后期管道工程施工。

综合考虑工程工期要求、造价控制等因素,考虑将该处双排钻孔灌注桩围护调整为双排PC工法桩围护。

2.2 基坑围护设计

浙江省标准《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096)^[12]规定,对于双排桩围护体系,根据前后排桩中心间距的不同,双排桩计算模式可分为顶部锚拉

型双排桩、简化为单排桩型以及门式刚架型双排桩。

考虑到本工程建设场地空间较为紧张,不具备采用顶部锚拉型双排桩的施工条件;同时单排桩型变形较大,无法满足周边环境变形控制要求;故本次考虑设计为门式刚架型双排PC工法桩。

基坑深度6.9 m,地下水位在设计地坪标高以下0.5 m,前排桩需起到止水作用,采用PC工法桩,其中钢板桩主要起到止水作用,桩长满足抗渗流稳定计算即可,采用12 m钢板桩,钢管桩主要承受土压力,桩长初步定为16 m;后排桩无止水要求,为节约造价,采用16 m长钢管桩,钢管桩之间不设置钢板桩。桩顶冠梁和钢架梁采用钢筋混凝土结构,冠梁与钢管桩的连接方式参考钢与混凝土组合结构中钢管柱与钢筋混凝土梁的刚性连接方式^[13]进行设计。最终设计形成的基坑围护剖面见图1。

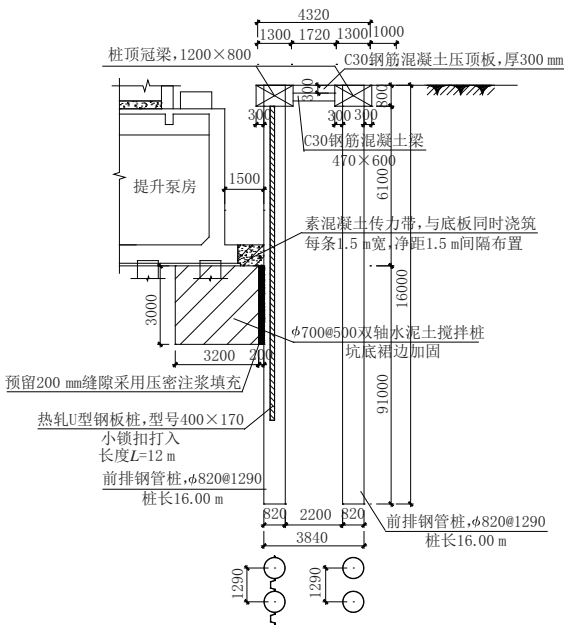


图1 基坑围护剖面(单位:mm)

根据上海市基坑工程技术标准^[14],本工程基坑设计等级为三级,坑外地表附件荷载为20 kN/m²,按照水土分算原则进行土压力计算。其中钢管桩直径820 mm,壁厚14 mm,钢材型号Q355B,根据刚度等效原则,可等效为直径796 mm的C30钢筋混凝土灌注桩。等效后采用同济启明星深基坑支护设计软件对基坑围护进行分析,本基坑稳定系数见表2,均满足标准^[14]要求。

表2 基坑围护稳定系数汇总

项目	抗隆起	抗倾覆	抗渗流	整体稳定
计算值	3.84	1.48	7.51	1.96
规范限值	1.40	1.15	1.50	1.25

2.3 基坑周边环境的影响分析

由于本工程为门式刚架式双排PC工法桩围护结构在软土地区水厂基坑中首次应用,且工程场地周边为现状运行水处理构筑物及管道,为了确保基坑开挖过程中对周边环境不会造成影响,采用Flac3D有限元软件建立数值模型进行模拟开挖过程中围护结构自身变形及基坑周边变形。计算时PC工法桩采用弹性板单元进行模拟,板单元厚度根据等效刚度法确定^[15],根据桩间距和桩直径、壁厚的关系,PC工法桩等效板厚为455 mm,数值计算模型见图2。

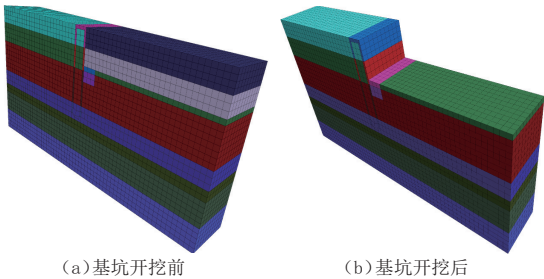


图2 基坑围护有限元计算模型

图3为该基坑围护竖向变形情况,坑底最大竖向位移70.5 mm,变形方向为向上隆起;坑外地表呈现出沉降的趋势,沉降最大值22.7 mm。根据标准^[7]要求,基坑安全等级三级时基坑坑外地表沉降控制值为0.55%*H*(*H*为基坑开挖深度),基坑深度6.9 m,坑外地表沉降控制值为38.0 mm。数值模拟结果可满足坑外地表沉降限值要求。

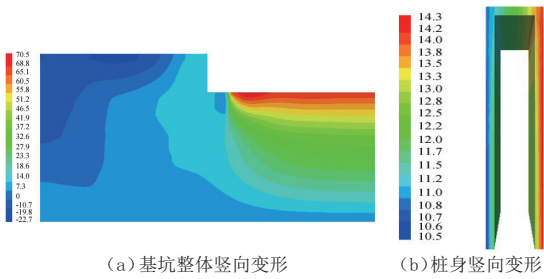


图3 基坑竖向变形(单位:mm)

受到坑底隆起影响,前排桩和后排桩都显示出向上变形趋势,前排桩受影响较大,竖向位移最大值14.3 mm;后排桩受影响较小,竖向变形最大值10.6 mm。

图4为该围护结构的水平变形情况,整体最大水平位移43.4 mm,出现在前排桩顶位置。根据标准^[14]要求,基坑安全等级三级时围护结构水平变形控制限值为0.7%*H*(*H*为基坑开挖深度)。本基坑深度为6.9 m,围护结构变形控制限值为48.3 mm。数值模拟计算结果显示双排PC工法桩围护侧向变形可在标

准^[14]要求限值范围内。

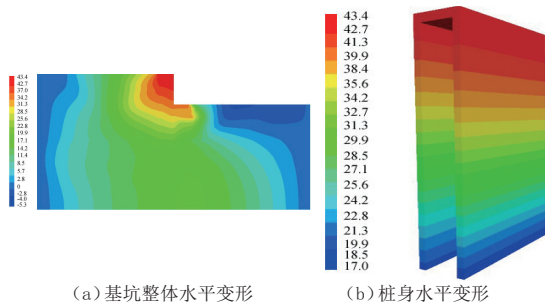


图 4 基坑水平变形(单位:mm)

2.4 施工及现场实测

基坑现场施工情况见图 5,可以看出桩身范围内止水效果较好,无渗水;相比于钻孔灌注桩,也更加整洁美观。

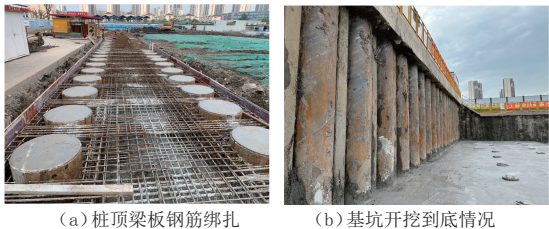


图 5 基坑现场施工情况

为了便于基坑开挖过程中进行桩身侧向变形数据采集,特制了测斜管,围护结构施工前焊接在钢管桩内,见图 6。根据施工过程监测结果,围护结构最大侧向变形 38.5 mm。施工实测结果和数值模拟计算结果比较吻合,均小于规范允许限值,整个施工过程中基坑和周边环境均变形较小,工程安全可靠。



图 6 钢管桩内特制测斜管

均考虑采用一台桩机的条件下,原设计双排钻孔灌注桩围护施工工期需要 30 d,双排 PC 工法桩围护施工工期 12 d,节省工期 60%,有效加快了工程进度,取得了较好的效果。在提升泵房施工完成基坑

回填后,PC 工法桩可以拆除顶部钢筋混凝土刚架梁和连板,在前后排桩之间架设内支撑作为管道施工的围护结构,达到“一桩两用”的效果,方便管道敷设,减少工程费用,同时节约工期。

3 结 语

(1)新建提升泵房及臭氧接触池基坑围护结构采用双排 PC 工法桩围护,整体变形在规范允许范围内,周边环境未受到影响,基坑本身安全可靠。

(2)相比于双排钻孔灌注桩围护,双排 PC 工法桩围护施工便利,可大大减少工期;PC 工法桩可重复利用,可较大程度地节约工程费用。

(3)双排 PC 工法桩围护止水可靠、绿色可回收,为悬臂式围护结构,不利于内部结构施工以及后期周边地下管道施工,适合应用于给排水厂站基坑围护。

参考文献:

[1] 金小荣,陈树龙,吴国彬,等.一种新型绿色围护工艺—PC工法桩[J].地基处理,2019,1(3):87-90.

[2] 岳驰宇.PC工法组合钢管桩围护体系在公园建筑工程项目中的应用[J].建筑施工,2021,43(7):1198-1200.

[3] 徐建军.钢管拉森钢板桩组合围护体系施工技术[J].施工技术,2018,47(7):60-63;148.

[4] DB34/T 3946—2021,钢板桩基坑支护技术规程[S].

[5] 杨绍红.PC工法组合钢管桩在基坑工程中的应用与分析[J].城市住宅,2018,25(7):121-122.

[6] 许海明,郭生根,卢纪璠,等.PC工法桩在基坑支护中的应用[J].施工技术,2019,48(4):85-89.

[7] 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.

[8] 陈圣贤,徐铨彪.PC工法桩在德清某项目基坑工程中的应用[J].山西建筑,2016,42(33):80-81.

[9] 张宁.PC工法组合桩在上海地区基坑工程中的应用[J].建筑施工,2021,43(7):1196-1197;1200.

[10] 张宁.PC工法组合桩与SMW工法桩受力性能对比分析—以上海地区某基坑工程为例[J].建筑施工,2021,43(6):987-990.

[11] 李福连,尚伟,华锦耀.基坑支护采用PC工法组合钢管桩及其快速接头施工技术[J].建筑施工,2019,41(1):49-50.

[12] DB33/T 1096—2014,建筑基坑工程技术规程[S].

[13] 06SG524,钢管混凝土结构构造[S].

[14] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].

[15] 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.