

顶管工程中 PC 工法组合钢管桩关键技术研究

赵香山

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 顶管井施工工艺的选择是顶管设计中的关键, 顶管井根据基坑安全等级及环境保护等级, 多采用沉井、SMW 工法、灌注桩、地连墙等围护形式。PC 工法组合钢管桩是一种新型可循环周转的围护形式, 具有节约施工工期、不产生泥浆、没有污染、低噪声等优点。对 PC 组合钢管桩作为围护时的基坑开挖工况中的围护结构变形、顶管顶进工况中的钢支撑受力采用理论计算及现场实测值分析。将 PC 工法组合钢管桩等刚度拟合为地连墙可基本反映出基坑开挖工况的实际变形, 可用于实际工程设计阶段验算基坑变形。在开挖至坑底及施工壁板阶段, 围护结构变形最大值的理论值与实测值基本一致, 坑底以下围护结构实测值大于理论值。在均匀顶力及偏心顶力两种顶进工况下, 顶管洞口上方最近的一道钢支撑体系在顶进工况下安全。

关键词: 顶管; PC 组合钢管桩; 围护侧移; 支撑轴力; 顶管顶力

中图分类号: TU992.05

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0225-04

0 引言

顶管是一种常用于地下管道穿越地面及地下障碍物的非开挖施工工艺, 顶管井根据基坑安全等级及环境保护等级, 多采用沉井、SMW 工法、灌注桩、地连墙等围护形式。

PC 工法组合钢管桩^[1]是一种新型可循环周转的围护形式, 主要为钢管桩 + 拉森钢板桩组合模式。具有节约施工工期、不产生泥浆、没有污染、低噪音等优点^[2]。

陈圣贤^[3]总结出了 PC 工法组合钢管桩有安全、经济、环保等优点。通过在钢管桩之间插入单根或多根钢板桩, 解决了围护桩间距的局限性, 保证了设计的优化及合理。李福连^[4]研发了 PC 钢管快速接头, 同时节省了施工工期及材料。张云妹^[5]将整体式钢管桩与钻孔灌注桩结合止水帷幕、SMW 工法桩、钢管桩结合止水帷幕进行了综合对比, 得出了整体式钢管桩施工成本低、施工速度快、施工场地要求低、环境保护要求低等特征。

目前采用 PC 工法组合钢管桩的基坑工程在国内比较少, 且暂无 PC 工法组合钢管桩用于顶管工作井的实例。前人的研究主要侧重于 PC 工法组合钢管桩的抗侧刚度确定及施工工艺, 并未对 PC 工

法组合钢管桩作为顶管工作井的特定工况进行研究。因此, 了解 PC 工法组合钢管桩作为顶管工作井在实际施工中的受力变形特性很有必要。

依托于 PC 工法组合钢管桩作为某原水管线顶管工作井的实例, 对顶管工作井基坑中 PC 工法组合钢管桩受力变形特性及计算方法进行研究。

1 工程概况

某原水管线顶管井基坑开挖深度为 11.3 m, 采用 PC 工法组合钢管桩支护形式 + 一道混凝土支撑 + 3 道钢支撑。

基坑围护平面见图 1, 基坑围护剖面见图 2。顶管井基坑围护结构采用 PC 工法组合钢管桩: 钢管桩采用直径 915 mm、壁厚为 14 mm 的钢管, 钢板桩采用拉森 IV 钢板桩, 钢管桩与拉森 IV 钢板桩之间通过 U 型锁扣(连接小齿口)连接, Q235B; 止水帷幕: $\phi 800@500$ 高压旋喷桩; 坑底加固: $\phi 800@500$ 高压旋喷桩; 洞口加固: $\phi 800@500$ 高压旋喷桩; 钢筋混凝土冠梁、内支撑: 混凝土设计强度等级为 C35; 型钢围檩: 双拼 H700 $\times$ 300 $\times$ 13 $\times$ 24, Q355B; 钢管支撑: $\phi 609$ 钢管, 壁厚 16 mm, Q355B。

顶管工作井洞口预埋两只 DN1800 套管, 供 DN1600 顶管顶出。由于一次顶进距离较长, 出洞口拟采用复合式穿墙止水法兰结构, 该结构设计有牛油盘根止水和止水橡胶条, 盘根止水长距离顶进磨损后可进行更换。

收稿日期: 2023-10-21

作者简介: 赵香山(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事市政工程设计工作。

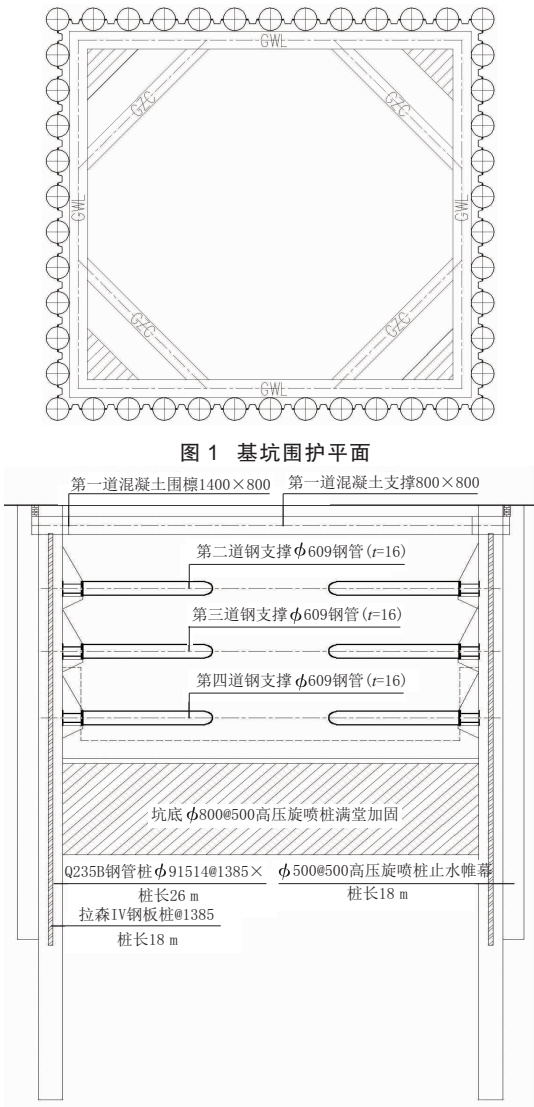


图1 基坑围护平面

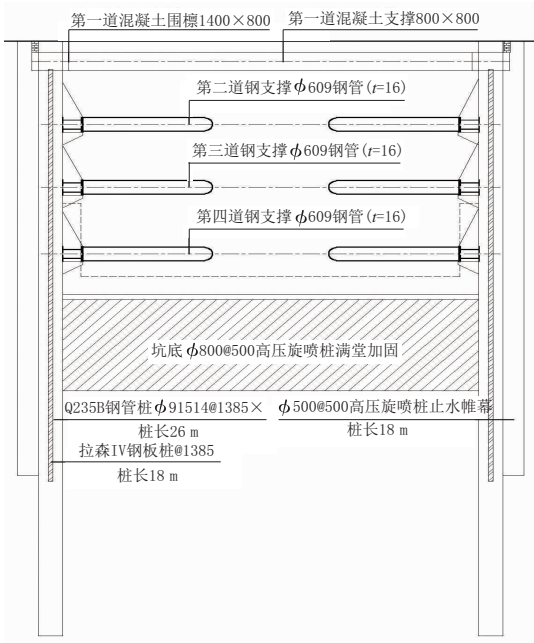


图2 基坑围护剖面

基坑施工工况见表1。

表1 施工工序表

施工工况	施工工序
第0步	施工PC工法组合钢管桩及第一道支撑
第1步	开挖至第二道支撑底,及时施工钢支撑
第2步	开挖至第三道支撑底,及时安装钢支撑
第3步	开挖至第四道支撑底,及时安装钢支撑
第4步	开挖至坑底,及时施工底板
第5步	拆除第四道钢支撑施工壁板
顶管施工	

根据经验,PC工法组合钢管桩围护基坑的变形及对周边环境的影响大于混凝土围护基坑,整个基坑开挖及顶管过程对基坑及周边环境进行监测。

2 PC工法组合钢管桩刚度等效及数值模拟

2.1 围护结构刚度等效

邓帅^[6]提出将PC工法组合钢管桩等效为地连墙

可以拟合钢管桩实际受力,按刚度等效拟合,按等效刚度原则,将PC工法组合钢管桩模拟成C35地连墙,考虑钢管桩与拉森钢板桩竖向滑动作用,假定组合形式间为竖向滑动作用,组合钢管桩的竖向刚度则为两者刚度之和, $E_{I,II}$ 为PC工法组合钢管桩弹性模量, I_y^I 为钢管截面惯性矩, I_y^{II} 为拉森钢板桩截面惯性矩。

则有:

$$I_y^I = \frac{\pi(D^4-d^4)}{64} = 4.0222 \times 10^{-3} \text{ m}^4 \quad (1)$$

$$I_y^{II} = 1.5930 \times 10^{-5} \text{ m}^4 \quad (2)$$

$$I_y = I_y^I + I_y^{II} = 4.0382 \times 10^{-3} \text{ m}^4 \quad (3)$$

抗弯刚度为:

$$E_{I,II} \times I_y = 8.0763 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \quad (4)$$

根据刚度等效原则,将PC工法组合钢管桩等效成一定厚度的地连墙:

$$E_{I,II} \times I_y = E_{III} \times \frac{bh_w^3}{12} \quad (5)$$

E_{III} 为地连墙弹性模量; b 为等效地连墙的宽度,取1m; h_w 为等效地连墙的厚度:

$$h_w = 0.6263 \text{ m} \quad (6)$$

2.2 围护结构位移分析

将PC工法组合钢管桩根据刚度等效原则拟合为地下连续墙,在各开挖工况下进行理论计算,并与实测值对比。第1~5步,围护结构侧移理论值与实测值对比见图3。

在第3步,即在开挖至第四道支撑之前,围护结构变形理论值大于实测值,围护结构实测变形在开挖至第四道支撑前变化较小,推测是基坑开挖的时空效应导致变形滞后。

在开挖至坑底及施工壁板阶段,围护结构变形最大值的理论值与实测值基本一致,坑底以下围护结构实测值大于理论值,这种理论与实测值的对比与张宁^[7]的结论一致。是由于:PC工法组合钢管桩的整体性较好、桩顶约束较强,桩体变形逐渐向坑底附近发展;坑底加固难以达到理论要求,且围护结构为异形,坑底加固与围护结构无法完全贴合,造成坑底附近变形较理论值大。

将PC工法组合钢管桩等刚度拟合为地连墙可基本反映出基坑开挖工况的实际变形,可用于实际工程设计阶段验算基坑变形。

3 顶管工况基坑钢支撑受力分析

在常规顶管井设计时,考虑到顶管顶进过程中,

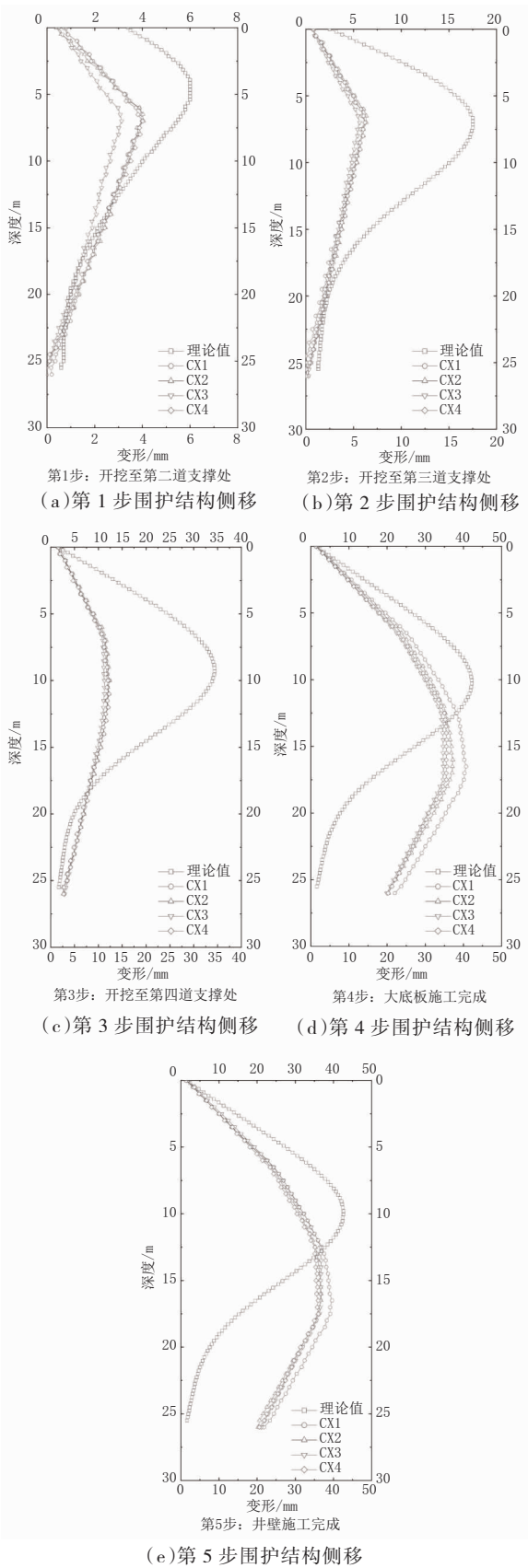


图3 围护结构侧移理论值与实测值对比

顶管后千斤顶的顶力会导致基坑平面支撑体系受到朝向基坑外的荷载。在荷载足够大时,支撑体系的斜撑内力由压力变为拉力,斜撑有脱落风险,支撑体系

也与基坑工况的受力体系差别较大,因此将顶管洞口上方最近一道支撑设计为混凝土支撑。

根据周边环境保护要求,PC工法组合钢管桩首道撑可采用混凝土支撑,通过混凝土围檩包裹PC工法组合钢管桩,与混凝土支撑形成完整的支撑体系。除首道支撑之外,PC工法组合钢管桩表面为圆钢管及拉森钢板桩,与混凝土围檩连接需通过异形钢围护表面与混凝土围檩焊接的形式,后续拔除之前需要分离焊点。混凝土支撑施工及养护时间违背了采用PC工法组合钢管桩围护结构节省工期的初衷,长工期也导致了PC工法组合钢管桩围护桩的租赁费用的增加。

顶管洞口上方最近一道支撑能否采用钢支撑历来都是顶管井设计中争议最大的一点,以第三道支撑作为分析对象,对比支撑轴力理论值及实测值,讨论顶管洞口上方最近一道支撑采用钢支撑的可行性。

基坑开挖过程中实测支撑轴力值见图4,开挖至坑底完成回筑工况后,第三道支撑体系提供的反力332 kN/m。

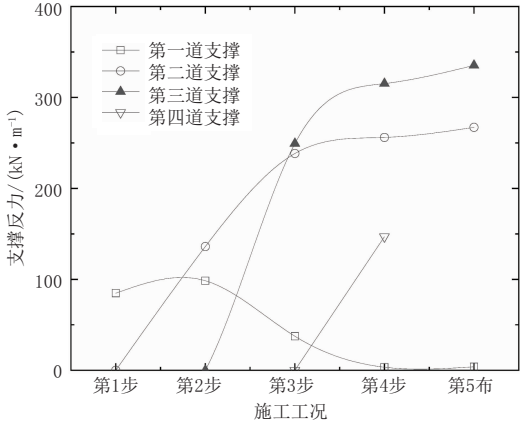


图4 支撑反力

根据计算,基坑工况最大轴力下的支撑荷载及支撑轴力见图5,支撑体系提供的反力为332 kN/m时,对应斜撑轴力为2 105 kN。

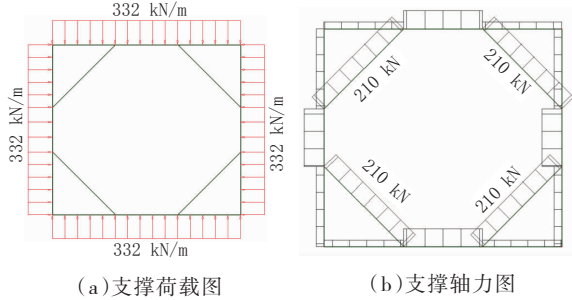


图5 支撑荷载图及支撑轴力图

在不考虑基坑支撑所能承受的顶力时,顶管允许顶力根据顶管管材能承受的顶力与顶管井后靠土体能承受的顶力共同确定,为6 000 kN。斜撑轴力实

测数据表明,在DN1600双顶管顶进1638m的整个过程中,顶管过程中支撑实测轴力为1976~2101kN,顶管造成的轴力变化为125kN,第三道支撑体系承担的顶力为,为允许顶力6000kN的1/15:

$$31 \text{ kN/m} \times 23.62 \text{ m} = 422 \text{ kN} \quad (7)$$

3.1 均匀顶力 对应两根顶管同时顶进工况

考虑顶管井同时顶进2根DN1600顶管,双管后靠同时施加顶力,均匀顶力作用下的支撑荷载及支撑轴力见图6。内力分析显示,第三道斜撑轴力降低为0kN,即将出现拉力时,千斤顶传递至第三道支撑体系的均匀压力为520kN/m。

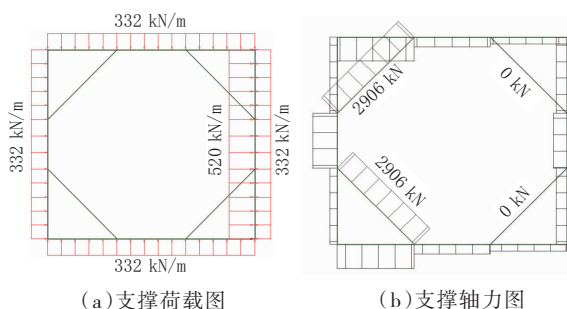


图6 均匀顶力作用下的支撑荷载图及支撑轴力图

对应的顶力为:

$$520 \text{ kN/m} \times 13.62 \text{ m} = 7082 \text{ kN} \quad (8)$$

大于设计允许顶力,在顶管顶进过程中,第三道支撑体系的斜撑荷载仍然为压力,不会产生拉力,顶管洞口上方最近的一道钢支撑体系安全。

3.2 偏心顶力 对应单根顶管顶进工况

考虑顶管井单独顶进1根DN1600顶管,偏心顶力作用下的支撑荷载及支撑轴力见图7。内力分析显示,第三道斜撑轴力降低为0kN,即将出现拉力时,千斤顶传递至第三道支撑体系的均匀压力为950kN/m。

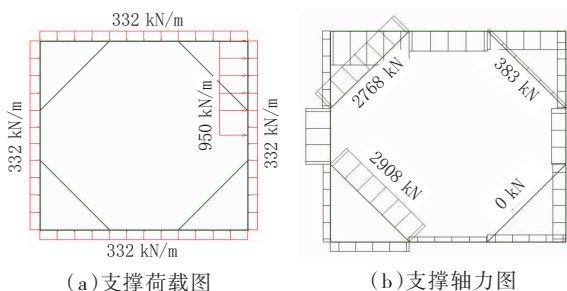


图7 偏心顶力作用下的支撑荷载图及支撑轴力图

对应的顶力为:

$$950 \text{ kN/m} \times 6.81 \text{ m} = 6469 \text{ kN} \quad (9)$$

大于设计允许顶力,在顶管顶进过程中,第三道支撑体系的斜撑荷载仍然为压力,不会产生拉力,顶

管洞口上方最近的一道钢支撑体系安全。

4 结论

基于对基坑开挖工况的围护结构变形、顶管顶进工况中的钢支撑受力采用理论计算及实测数值分析,对PC工法组合钢管桩作为顶管工作井的可行性进行探讨,可作为后续类似项目的参考。得到以下结论。

(1)将PC工法组合钢管桩等刚度拟合为地连墙可基本反映出基坑开挖工况的实际变形,可用于实际工程设计阶段验算基坑变形。

(2)在开挖至第四道支撑之前,围护结构变形理论值大于实测值,围护结构实测变形在开挖至第四道支撑前变化较小,是基坑开挖的时空效应导致变形滞后。

在开挖至坑底及施工壁板阶段,围护结构变形最大值的理论值与实测值基本一致,坑底以下围护结构实测值大于理论值。这是由于:PC工法组合钢管桩的整体性较好、桩顶约束较强,桩体变形逐渐向坑底附近发展;坑底加固难以达到理论要求,且围护结构为异形,坑底加固与围护结构无法完全贴合,造成坑底附近变形较理论值大。

(3)在均匀顶力及偏心顶力两种顶进工况下,顶管洞口上方最近的一道钢支撑产生拉力时对应的允许顶力均大于设计允许顶力,在顶管顶进过程中,第三道支撑体系的斜撑荷载仍然为压力,不会产生拉力,顶管洞口上方最近的一道钢支撑体系在顶进工况下安全。

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(3):87-90.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张云妹.整体式钢管桩在复杂环境下深基坑围护施工中的应用[J].建筑施工,2020,42(5):691-693.
- [6] 邓帅.管廊基坑中PC组合钢管桩受力变形特性及计算方法研究[D].上海:上海交通大学,2021.
- [7] 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.