

装配式圆形超大直径竖井施工技术研究

赵后坤

上海城建市政工程(集团)有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8659

[摘要] 文章针对城市核心区超大直径竖井施工中面临的场地受限、环境敏感及精度要求高等技术难题,以上海某管线工程盾构竖井项目为例,系统研究其成套施工技术。通过引入机械式掘进工法,结合与铁建重工联合研发的竖井掘进装备,实现了自动化水下开挖作业。研究重点阐述了高精度管片拼装工艺、水下混凝土封底关键技术、井筒提升与姿态调控系统。工程实践表明,该技术体系有效保障了竖井垂直精度小于1.5%,显著提高了施工效率,降低了环境影响与人工需求,为类似条件下大型竖井工程的建设提供了可靠的技术路径与实践依据。

[关键词] 城市核心区; 装配式竖井; 竖井掘进机; 承插式管片; 工程应用

Research on prefabricated circular super-large diameter shaft construction technology

Zhao Houkun

Shanghai Urban Construction and Municipal Engineering (Group) Co., Ltd.

[Abstract] This article focuses on the technical challenges faced in the construction of ultra-large diameter shafts in urban core areas, such as limited space, environmental sensitivity, and high precision requirements. Taking a shield shaft project for a pipeline in Shanghai as an example, a systematic study is conducted on its complete construction technology. By introducing mechanical tunneling methods and combining with the shaft tunneling equipment jointly developed with Railway Construction Heavy Industry, automated underwater excavation operations are achieved. The research focuses on the high-precision segment assembly process, key technologies for underwater concrete sealing, and the shaft lifting and attitude control system. Engineering practice has shown that this technical system effectively ensures the vertical precision of the shaft to be less than 1.5%, significantly improves construction efficiency, reduces environmental impact and labor requirements, and provides a reliable technical path and practical basis for the construction of large-scale shaft projects under similar conditions.

[Key words] urban core area; prefabricated shaft; shaft boring machine; socket-and-spigot segment; engineering application

引言

随着我国城市化进程的不断深入,城市核心区施工普遍面临着场地狭小、交通繁忙、周边建筑管线密集、环保要求苛刻等严峻挑战^[1-2]。传统的现浇施工方法存在工期长、环境影响大、安全风险高等固有弊端,难以满足现代城市建设的需求。因此,发展一种高效、环保、安全可靠的装配式竖井施工技术,已成为推动城市可持续发展亟待解决的工程难题。

目前,装配式竖井技术在国内的应用场景仍相对集中,其成熟经验主要体现于地下停车库、逃生井等领域^[3-5]。然而,在

市政水务工程领域,大尺寸竖井的应用尚属空白。基于此背景,本工程作为国内首批大尺寸机械掘进式竖井工法的示范项目,旨在为解决传统水务竖井施工难题提供全新的技术路径,具有显著的先行与探索价值。

本研究聚焦于城市核心区装配式圆形超大直径竖井的成套施工技术。通过典型工程案例,重点突破管片精准拼装、水下封底及井筒提升定位等核心工艺,形成标准化施工与质量控制体系。研究成果不仅为同类工程提供直接的技术指导,保障安全、质量与工期,更对推动我国地下工程装配化技术的深化

发展与产业升级具有重要的工程价值与战略意义。

1 工程概况

1.1 项目概况

上海某管线工程盾构井项目采用装配式竖井工艺，利用铁建重工的竖井掘进机进行不排水竖井施工，竖井采用圆形结构，竖井外径 17.7m，内径 16.4m，深度 42m。管片采用构件厂预制装配形式，管片宽度 1.5m，厚度 0.65m，每环共分八块管片。结构安全等级为一级。

1.2 地质水文概况

该竖井项目从上而下开挖的地层主要为①2 杂填土、②4-1 灰黄色粉质黏土、②3 砂质粉土夹粉质黏土、③淤泥质粉质黏土、③T 砂质粉土、④淤泥质黏土、⑤11 黏土、⑤12 粉质黏土、⑦1 砂质粉土、⑧1 黏土，如图 1 所示。场地内潜水水位埋深 0.40~2.91m，受大气降水与地表径流补给。承压水是影响本工程的关键因素。观测数据显示：⑤2 层微承压水头埋深 4.60m；

⑦层承压水头埋深 4.13~4.99m。

1.3 周边环境概况

竖井周边环境复杂，其 1 倍开挖深度范围内分布有多层现状建筑物及市政管线，1~2 倍坑深范围内亦存在多层建筑与管线密集区。本工程环境保护等级为一级，实施过程中面临严峻的环境保护与变形控制挑战，属于全线典型的重难点区段。

2 机械掘进式竖井工法介绍

2.1 工法简介

机械掘进式竖井工法体系中的竖井掘进机作为核心装备，由铁建重工自主研发，能够集成实现竖井开挖、渣土输出与结构支护等工序的机械化、一体化施工。其主要包括开挖系统、井筒提升系统、回转驱动系统、减阻注浆系统、管片拼装系统及智能控制系统等功能模块，共同保障竖井施工的安全、高效与精准作业。

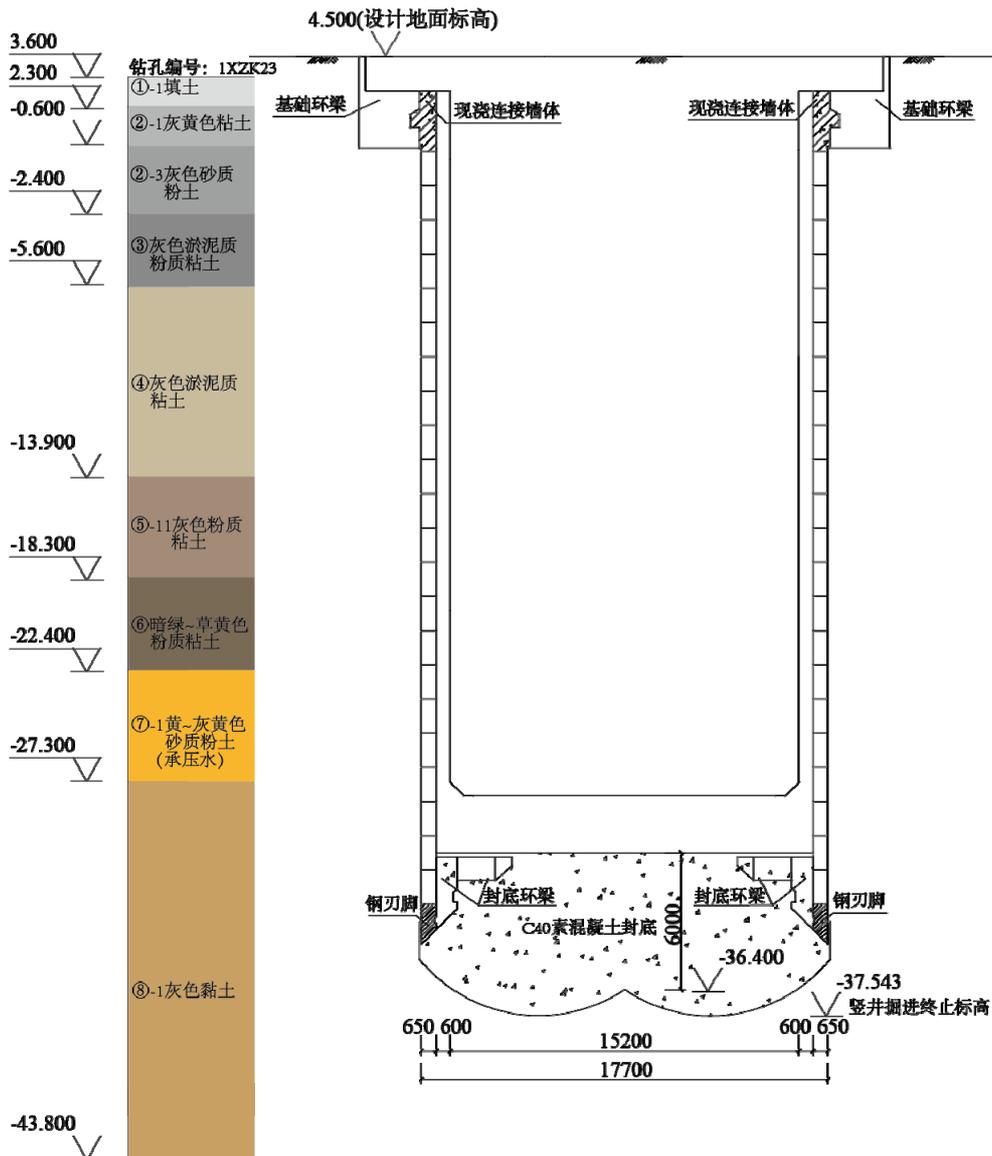


图 1 竖井结构地质剖面图

2.1.1 开挖系统

开挖系统是竖井掘进机的核心工作部件，主要由截割头与运动组件构成。截割头在电机驱动下旋转切削掌子面，其背部渣浆泵将渣土搅拌为高浓度泥浆并泵送至地面。运动组件通过油缸驱动，实现截割头的伸缩与摆动，从而完成对整个掌子面的开挖作业。

2.1.2 井筒提升系统

井筒提升系统是竖井掘进机的关键组成部分，集成液压连续提升、地锚及辅助机构，主要用于吊装支护管片，并在掘进过程中实时调整衬砌体姿态，确保其垂直度与平面度符合设计要求。

2.1.3 回转系统

回转驱动系统由壳体、驱动单元、回转拖链、密封系统与润滑系统等部分构成。在该截割头开挖模式下，驱动单元的功能是为开挖系统提供回转动力，不承担渣土切削扭矩，故系统仅配置单套驱动单元。

2.1.4 减阻注浆系统

为控制竖井下沉阻力，结合地质条件分析，于钢刃角上预设减阻注浆孔，采用柱塞泵向管片与外部土体间隙注入膨润土浆液，如图2所示。竖井下沉过程中，通过搅拌器配备的泥浆泵持续向壁后间隙注浆。注浆量以过程控制为主，一般按2~3倍建筑空隙体积施注，直至浆液自井口返出为止。刃脚外侧下部设有橡胶止浆板，管片接缝处设置止水带，共同阻隔浆液内渗。

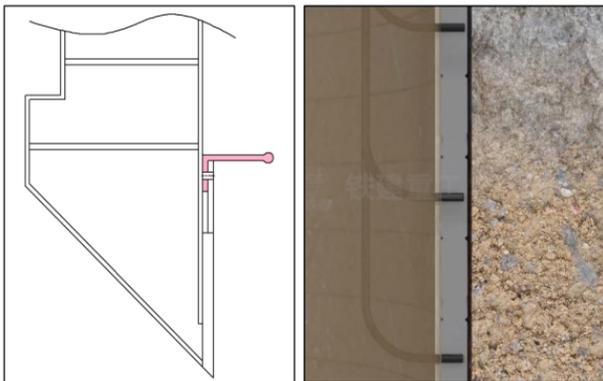


图2 减阻注浆示意图

2.1.5 管片成环系统

井壁采用圆形截面，每环由8块楔形管片拼装组成，环间通过错缝拼装形成整体受力结构。衬砌圆环环面共设32个同尺寸杯口，其中16个用于放置剪力销，16个用于M27纵向通长螺栓。剪力销和纵向螺栓间隔布置。环向管片与管片之间采用CT承插式接头工艺。为保障结构密封性，管片接缝处分别设置内外两道三元乙丙橡胶密封条。

2.1.6 智能控制系统

装配式竖井智能控制系统集成挖掘工况、下沉参数、井身姿态及环境监测等多源信息，融合掘进轨迹三维虚拟仿真与自动规划技术，实现一体化全自动可视化开挖。通过竖井下沉实时监测数据与地层扰动响应的动态联动，结合减摩注浆系统实现下沉姿态的动态调控与环境影响的主动控制，最终达成竖井施工全过程的数字感知、智能控制与精准稳定下沉。

2.1.7 绿色环保设计

本竖井掘进设备针对城市中心区绿色施工要求，在泥水循环干化、井内液位平衡及同步注浆量控制等方面进行了专项优化。液动力站配备集成式降噪外壳，有效控制噪声排放。相较于传统沉井工法，本装备大幅降低人力需求，每个班组操作室仅需1人即可完成下压与挖掘控制，现场配备2人负责管片拼装、2人负责设备维保，整套系统仅需5人即可保障全流程作业。

2.2 施工工序

首先开展场地平整、钢板桩围护结构施工，开挖环梁基坑并施作混凝土垫层，安装钢刃脚并完成刃脚部位混凝土浇筑，拼装首环管片，并现浇设备安装基础；同步推进管片预制拼装、封底环梁制作，完成配套提升设备安装、钢绞线张拉系统布置后，续拼第3环管片并安装挂靴结构，同步实施掘进设备基坑开挖及主机安装调试；并行开展竖井同步下沉与管片安装作业，最终实施竖井封底、泥浆置换、底板结构浇筑及内衬施工，工程施工完毕。

3 关键施工工艺

3.1 承插式管片拼装

当掘进深度达到一环管片宽度时，在井口位置进行管片拼装。管片内径16.4m，壁厚0.65m，环宽1.5m，每环由8块组成，单块重约16.3t。拼装采用扁担两点吊装管片，并依据管片分块、错缝角度与地面设备布置进行统筹安排。拼装流程如下：

- (1) 每环管片先拼装B型块，以利于定位，然后安装A型块；
- (2) 每块管片就位后，采用环向快速连接件与纵向螺栓进行连接；
- (3) 整环拼装完成后，及时采用风动机械扳手对纵向螺栓进行紧固。

为满足设备安装及管片吊装作业需求，前四环管片采用通缝拼装。正式拼装前，先进行前三环的预拼装作业。自第五环起采用错缝拼装，错缝角度为 22.5° 。管片环间通过纵向螺栓与环向快速连接件实现可靠连接，以保证结构整体性与施工效率。经对比分析不同管片接头形式的力学与施工性能（如表1所示），最终选用环向CT承插式接头作为环间连接方案。

表1 不同管片接头方式性能对比

	传统螺栓接头	C-H-C接头	CT式接头	G型接头
接头原理	刚性机械连接	预应力复合连接	柔性承插推接	柔性承插推接
安装方式	拧紧螺栓	先推入后张拉	直接推入	直接推入
安装速度	慢	中等	极快	极快

适应性	差	中	优	优
防水性	一般	优异	良好	极佳
整体性	好	极佳	一般	一般
成本	低	较高	较高	高
核心优势	技术成熟	整体性能可靠	性价比高	防水性能可靠
应用场景	早期隧道及用于需拆卸检修的特殊部位	超大直径盾构、极软土层、高敏感环境保护区等有极端要求的超级工程	绝大多数城市地铁、市政隧道	高水压、穿越江河湖海、腐蚀性地层的隧道

3.2 井筒下沉技术

在下沉作业前,需闭合钢绞线上下锚,将其整体上提 20mm,并通过预紧油缸确保各钢绞线受力均匀、下放量一致。使用推进油缸助沉时,应保持各组油缸速度同步,实现均匀下压。每掘进至 1.5m(即一环管片宽度)后,于井上拼装一环管片,形成循环作业流程。钢绞线悬吊系统由 12 台 250t 提升千斤顶组成,采用比例阀控制,具备连续可调的下沉速度与垂直度调控能力。系统通过实时检测设备与管片自重,自动匹配钢绞线悬吊装置的提升力,推动悬吊系统实现均衡下沉。

3.3 垂直精度控制

导向系统集成测绘、计算机与机电控制等技术,为竖井掘进机提供精准的姿态引导。该系统以三维立体测量为核心,通过多源传感器协同工作:主机配备的双轴倾角传感器实时监测掘进机水平姿态(如图 3 所示);井壁预埋的测斜管与测斜仪共同检测井筒整体倾斜度;同时,利用全站仪精确测量井筒上部高程、其外弧面与圈梁间距,以及上下管片的垂直度。系统对上述监测数据进行融合分析,实时判定设备运行姿态并实现动态纠偏,从而确保竖井掘进精度,其垂直度偏差可控制在 2%以内。

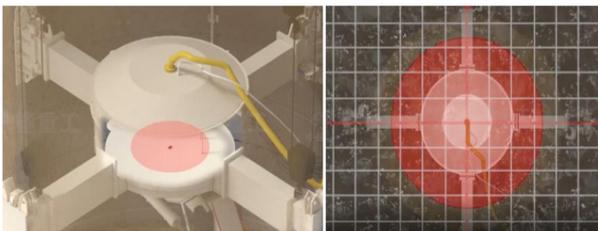


图3 双轴倾角导向系统

3.4 水下混凝土封底

水下混凝土封底采用导管法对称浇筑,竖井内布置 9 根内径 250mm 导管,其中 8 根沿管壁环布,1 根位于中心。导管作用半径取 4m,确保混凝土覆盖无死角。浇筑所用混凝土需具备良好的和易性,坍落度控制在 200 ± 20 mm,并掺加缓凝剂,初凝时间不低于 20h。施工时按既定对角顺序依次进行首封,确保导管初始埋深大于 0.8m。浇筑全过程须保持连续供料,严格控制相邻导管混凝土面高差及导管埋深,通过提升导管承料漏斗维持足够超压力,保证混凝土顺利流动与密实成型。

4 应用效果

本项目采用机械掘进式竖井工法及配套装备,在城市核心区超大直径竖井施工中取得显著成效:竖井垂直度精准控制在

1.5%以内,远小于 2%的控制要求;通过 CT 承插式管片接头工艺,有效保障了结构整体性,施工效率较传统螺栓接头工艺提升 40%。此外,周边建筑物沉降最大值为 14.9mm,管线位移最大值为 11.8mm,均满足沉降控制要求。

5 结论

为解决城市核心区超大直径竖井建造面临的场地受限、环境敏感及施工精度要求高等难题,本工程联合铁建重工自主研发竖井掘进机,并将其成功应用于某管线工程盾构竖井项目。经工程实践验证与系统分析,得出以下结论:

(1) 通过对装配式竖井管片接头形式的多方案比选,确定了 CT 式管片快速接头的施工工艺。该工艺兼具安装便捷性与结构可靠性,经现场实践检验,接头密封性能优良、施工效率显著,应用效果达到预期设计目标。

(2) 采用悬吊式下沉及注浆工艺,有效规避了井筒下沉过程中的卡滞风险,既降低了井筒与周边地层的摩擦阻力,又保障了孔壁稳定性,为井筒顺利下沉提供了可靠保障。

(3) 依托高精度导向测量系统对竖井井身姿态实施动态实时监测与纠偏调控,最终将竖井垂直度精准控制在 1.5%以内,充分满足城市核心区超大直径竖井对施工精度的严苛要求。

[参考文献]

[1]吴文斐,朱雁飞,朱叶艇,等.主动控制型装配式机械化沉井成套技术[J].现代隧道技术,2025,62(02):274-281+297.

[2]翟之阳,聂东清,张毅,等.下沉式竖井掘进工法在软土地区的应用研究[J].地基处理,2024,6(02):201-207.

[3]姜弘,包鹤立,林咏梅.装配式竖井设计与施工技术应用研究——以南京某沉井式地下车库项目为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(03):463-470.

[4]朱雁飞,毕湘利,潘伟强,等.富水软土地层中心城区主动控制型装配式沉井工法研究[J].现代隧道技术,2024,61(06):278-285.

[5]张振光,徐杰,汪盛,等.富水地层超深装配式竖井水下机械法掘进施工技术——以南京某沉井式停车设施建设项目为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(03):492-500.