

城市密集区圆形竖井建造技术对比研究

吴昊

[上海城投(集团)有限公司, 上海市 200020]

摘要: 城市密集区传统圆形竖井建造面临场地狭小、环境保护要求高、施工风险大、周边环境扰动敏感等严峻挑战。为应对挑战,工程技术界涌现出数字化微扰动压入式沉井(DMPC)和下沉式竖井掘进工法(VSM)等以机械化、自动化、智能化和绿色化为特征的新技术。与地下连续墙围护、传统沉井工法等工艺相比,新工法具有占用场地小、施工高效、环境友好、造价低等优点。对比分析城市密集区圆形竖井建造工艺的关键技术性能,探讨不同工法的适用场景和技术优势。最后,对上海某工程圆形竖井建造的制约因素、优化过程及优化效果进行了详细分析。相关成果表明,圆形竖井建造工艺选择需要多维度考量,VSM、DMPC等新工法在上海软土地区具有较好的适用性,已初步具备某些场景下的技术优势。

关键词: 城市密集区;圆形竖井;微扰动压入式沉井;下沉式竖井掘进工法;软土地区

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0350-05

Comparative Study on Construction Technology of Circular Shafts in Dense Urban Areas

WU Hao

[Shanghai Municipal Investment (Group) Corporation, Shanghai 200020, China]

Abstract: In dense urban areas, the construction of traditional circular shafts faces severe challenges such as small site, high environmental protection requirements, significant construction risks and sensitivity to surrounding environmental disturbances. To address these challenges, the new technologies characterized by mechanization, automation, intelligence and greenness have emerged in the industry, such as the digital micro-perturbation pneumatic caisson (DMPC) and the vertical shaft machine (VSM) sinking method. Compared with the diaphragm wall enclosures, traditional caisson construction methods and other techniques, the new techniques offer the advantages of small site occupation, efficient construction, environmental friendliness and low cost. By comparatively analyzing the key technical performance of the construction process of circular shafts in urban dense areas, the applicable scenarios and technical advantages of different construction methods are explored. Finally, a detailed analysis is conducted on the restrictive factors, optimization process and optimization effect of the construction of circular shafts in a project in Shanghai. The findings indicate that the selection of construction techniques for circular shafts requires multi-dimensional considerations. New construction methods such as VSM and DMPC have good applicability in the soft soil area of Shanghai and have initially demonstrated technical advantages in certain scenarios.

Keywords: dense urban areas; circular shafts; DMPC; VSM sinking method; soft soil areas

0 引言

随着城市化进程的加速,城市地下空间的开发与利用已成为解决土地资源紧缺、改善交通状况、提升城市韧性的关键路径。上海等一线城市的浅层地下空间的利用已逐渐趋于饱和,促使地下管网干管系统向着深层地下空间发展。竖井作为连接地表与地下空间的垂直通道,在地铁车站、综合管廊、深层

排水系统及高层建筑基础等工程中扮演着至关重要的角色,发挥着提供施工空间、运输通道、物料投放、运维检查及通风透气等重要作用。

然而,在建筑物林立、管线密布、交通繁忙的城市密集区,传统竖井建造工艺面临着场地狭小、环境保护要求高、施工风险大、周边环境敏感等一系列严峻挑战^[1-2]。为应对这些挑战,近年来工程技术界围绕竖井建造工艺展开了大量研究与创新,涌现出一系列以机械化、自动化、智能化和绿色化为特征的新技术、新方法。其中,比较有代表性的包括海瑞克公司研发的下沉式竖井掘进设备VSM和中铁工程装备

收稿日期: 2026-03-13

作者简介: 吴昊(1985—),男,硕士,工程师,从事水务工程规划设计前期及建设管理方面的相关工作。

集团研发的沉井掘进机CJM^[3-4]。这些新型竖井施工设备可通过潜水机械实现竖井水下开挖和下沉,并对下沉过程进行精细化控制,解决了传统沉井控制精度差、环境影响大等难题。同时,由于取消了大深度地下连续墙及水平支撑结构的施工过程,因此能够以较低的工程造价实现更高的施工效率^[5]。

本文旨在系统梳理并深入分析当前城市密集区VSM、DMPC等圆形竖井建造工艺,探讨其技术特点,并对关键技术性能进行对比分析,从而明确各工艺的适用场景。基于上述成果,结合实际案例,对城市密集区圆形竖井建造的制约因素和工艺优化选择进行了详细分析。结果表明,竖井建造工艺选择需要多维度考量,VSM、DMPC等新工法在上海软土地区已有较好的应用案例,初步具备某些场景下的技术优势。该成果可为城市密集区竖井建造工艺选择提供技术参考。

1 常见竖井建造工艺介绍

根据上海地区的实践经验,城市密集区深大竖井($h \geq 18$ m)建造常见的施工工艺有:地下连续墙、传统沉井、数字化微扰动压入式沉井(DMPC)、下沉式竖井掘进(VSM)等。各工法的工艺特点如下:

(1)地下连续墙是超深竖井建造使用最成熟的工艺,目前水务板块最大深度地墙是苏州河段深层排水调蓄管道系统工程(试验段)云岭西竖井,深度达57.84 m。上海地区影响圆形竖井地墙长度的因素一般为承压水控制或坑底抗隆起稳定。地墙墙体刚度大,对环境的影响小,但成本高,墙体接头是施工薄弱环节,泥浆处置不当容易污染环境。

(2)传统沉井是一种较为古老的竖井施工工艺。随着城市快速发展,竖井周边环境日趋复杂,近些年其在水务板块的应用逐渐减少。传统沉井能适应较深的施工深度,设备简单,技术成熟,但容易导致环境沉降,且倾斜、突沉不易控制,施工风险高。

(3)DMPC工法是对传统沉井工艺的重大革新,它改变了主要依靠挖土自重下沉的模式,转而以主动施加的竖向压力为主动力,辅以内井少量取土和先进减阻技术,实现沉井的精确、快速、微扰动下沉。其设备包括压入系统、自动化控制系统、减阻系统和取土设备,其中压入系统是其技术核心。该工法对周围环境扰动小;下沉过程由主动压力精确控制,可有效避免倾斜、突沉、滞沉等问题,安全性和可控性高;自动化程度高,施工效率远高于传统沉井。但其

技术门槛高,需要成套的专用设备及复杂的自动化控制系统。

(4)VSM工法在国内的首次应用是在南京的某沉井式地下停车库项目,采用的是德国海瑞克的设备^[6]。目前铁建重工、上海隧道等企业已具备国产化替代设备的生产能力。该工法可施工竖井直径范围为内径4.5~21 m,施工深度可达地下水位以下115 m。以上海静安区地下智慧车库项目为例,其竖井直径为21 m,施工深度达50.5 m。水务板块方面,竹白连通工程、泰和污水处理工程、上海市迎宾水厂工程、上海虹莘调蓄池工程等均已有应用。

该工法是一种高度机械化和自动化的深大竖井施工方法,通过预制管片、机械化拼装、远程控制,实现竖井的连续、快速下沉。VSM是一套集成的、高度复杂的施工装备系统,核心设备包括VSM主机(掘进单元)、沉降单元(下放单元)、回收卷扬机、供给卷扬塔、能量链、泥水处理系统、预制管片、远程操控与监测系统等。该工法施工深度大、施工占地小、自动化程度高;但设备昂贵,一次性投入巨大,技术高度集成,对作业人员要求高,软土地区封底难度大。

2 竖井建造工艺关键技术性能对比

在城市密集区选择合适的竖井建造工艺,需要综合评估其各项关键性能指标。通常需要考量的指标包括以下几个方面:

(1)施工周期与成本:VSM等机械化方法虽然初始投资高,但施工速度快、综合工期短,可降低整体时间成本^[5]。传统明挖法则因工序繁琐、工期较长,虽然初始设备成本投入低,但当竖井开挖深度较大时,建造成本很高。

(2)周边环境沉降:根据上海地区若干VSM工法的应用实践,VSM工法的环境影响小于传统沉井工法^[7],而略大于圆形地下连续墙围护基坑的沉降^[8],但若能及时封底并确保封底质量,则对周边环境的沉降影响可控,能满足同等条件下深基坑环境保护等级要求。

(3)环保与可持续性:机械化、低扰动和施工场地占用小是城市密集区竖井建造工艺选择中非常重要的内容。通过减少降水、降低噪音振动、减少现场作业量,展现出更低的碳足迹、更好的环保性和可持续性,从而保障竖井更好落地。在材料生产、运输、施工、运营等阶段更环保的施工工艺,因符合国家碳达峰与碳中和的战略规划,未来无疑更具有竞争力。

(4)智能化与数字化:为进一步提升城市密集区竖井施工的安全性、效率和精细化管理水平,以BIM、物联网和数字孪生为代表的智能化技术正越来越多地应用到项目全生命周期管理。BIM技术通过创建三维数字化模型,集成了竖井设计、施工、地质等多维度信息,为项目参与方提供了一个协同工作平台^[9];人工智能技术将实时传感器网络部署在竖

井结构、周边土体及邻近建筑物上,并通过物联网技术将监测数据实时传输至云平台,实现施工过程的安全监控^[10-11]。VSM等工法已实现了基于BIM的协同规划与风险管理,以及基于物联网与AI的实时监测与预警。

城市密集区常见竖井建造工艺关键性能指标对比见表1。

表 1 城市密集区竖井建造工艺性能对比				
对比维度	地墙围护	传统沉井	微扰动压入式沉井(DMPC)	下沉式竖井(VSM)
适用挖深	中~深(15~70 m)	浅~深(5~50 m)	中~深(20~45 m)	超深(30~115 m)
适应地层	各类地层	软黏土、砂土	软弱/软硬不均土层	各类地层
施工工期	长(围护+支撑+土方+结构)	中等	中等	短
施工成本	高	低	较低	较低
施工场地	大	大	小	小
对周边影响	小	大	较小	较小
环保与可持续性	中等(泥浆排放处理)	一般(土方外运)	一般	高(无振动、无噪音、管片预制)
智能化与数字化	无	无	有	有

通过上述对比可知,软土地区城市密集区竖井建造工艺各有优缺点,在选择施工工艺时,应多维度综合比较。下文将结合工程案例详细分析。

3 工程案例

3.1 工程概况

上海市区某工程新建DN5000总管1根,主要采用盾构施工工艺,西起静安区彭越浦泵站,东至浦东新区竹园白龙港污水连通管预留闸门井,全线长度约27 km,共设置15座盾构井和1座提升泵站。提升泵站前管道埋深约20~40 m(2#~3#井采用倒虹管,埋深约30 m),提升泵后段管道埋深约20 m。主干线路如图1所示。



图 1 主干线路总图

3.2 建造工艺选择

3.2.1 竖井周边环境条件

本工程盾构井位于城市密集区,其中1#、2#、3#、4#、7#、9#井周边环境十分复杂、施工场地紧张,若采用传统地墙围护方式,将导致竖井在实施阶段落地困难。各井基本信息及周边环境条件见表2。

表 2 各竖井基本情况一览表			
编号	挖深/m	采用地墙围护所需的施工场地/m ²	周边环境条件
1#	22.90	1 200 (可用场地)	1. 周边居民密集,对光污染、噪音敏感; 2. 场地狭窄,地墙加工及吊装作业空间不足; 3. 场地位于河道驳岸旁,河道管理部门要求防汛墙两侧6 m范围内禁止堆载和施工
2#	35.50	5 200	位于公园内,地墙施工借地面积大,破坏公园内部设施,影响公园正常运行
3#	34.90	5 000	位于道路交叉口,交通繁忙,周边建筑物及地下管线密集,可用施工场地不足1 800 m ²
4#	23.01	3 000	位于道路交叉口,交通繁忙,地墙施工需占用4条机动车道和1条非机动车道,无法做到“借一还一”,交通组织方案不被批准
7#	34.42	5 000	1. 原井位于复客北翼创享中心楼前空地内,地墙施工占用中心停车位,影响商铺运营; 2. 经协调,新井位于中设广场前绿化场地内,但可用施工场地仅2 300 m ²
9#	36.23	3 800	1. 原井位于路口蔚来汽车4S店前空地,地墙施工将严重影响其正常运营; 2. 经协调,将井位移动至路口北侧空地内,但可用施工场地仅为1 800 m ²

以1#竖井和3#竖井为例,场地的实施条件情况如图2、图3所示。

由表2、图2及图3可知,影响城市密集区竖井建造工艺选择的主要原因有:竖井开挖深度较大,采用地墙围护时所需施工场地大;但在城市密集区,受交通组织、文明施工、沿街商业运营、市政设施保护等

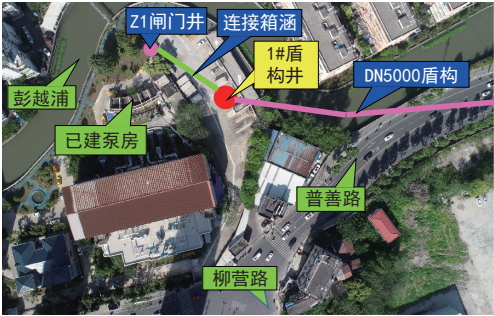


图2 1#竖井场地航拍图

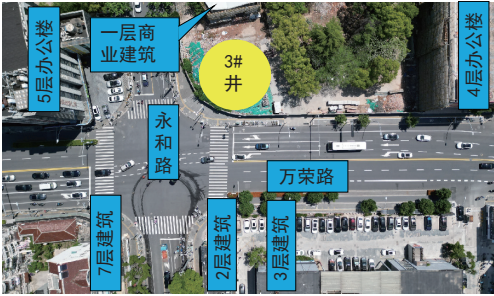


图3 3#竖井场地航拍图

条件的限制,可借用的施工场地小,夜间施工困难,噪音控制要求高。因此,需要选择相适应的竖井建造工艺。

3.2.2 工艺选择原则

基于上述原因,结合国内外竖井建造经验,竖井工艺选择原则如下:

- (1)技术可靠:新工艺应具备一定的成熟度,拥有成功案例,达到施工安全可靠的目的。
- (2)经济合理:新工艺造价理论上不应高于原地墙方案,达到经济合理的目的。
- (3)环境可控:竖井周边环境复杂、保护要求高,新工艺对周边环境影响应可控。
- (4)施工便利:竖井现场可用施工场地有限,新工艺应具备施工高效、便利且占地小的特点。

3.2.3 工艺选择方案

基于上述周边环境限制因素分析及工艺选择原则,结合常见建造工艺适用场景、施工单位的技术能力、现有场地条件,以及近年来在软土环境中多个下沉式竖井的成功实施案例,各竖井工艺选择方案见表3。

表3 各竖井建造工艺一览表

编号	挖深/m	建造工艺	采用新工艺所需施工场地/m ²	工期节约/月	投资节约/%
1#	22.90	DMPC	1 200	2	8.5
2#	35.50	VSM	1 800	6	15.3
3#	34.90	VSM	2 500	6	15.4
4#	23.01	VSM	1 700	4	0
7#	34.42	VSM	2 300	10	14.2
9#	36.23	VSM	1 800	8	12.0

由表3可知,采用新工艺的竖井相比地墙围护方案基本实现了施工场地更小、工期减少和投资节约的目的。主要原因如下:

- (1)DMPC工法和VSM工法均采用机器人自动取土,相比传统的地墙机械抓斗或人工取土,极大提高了施工效率。
- (2)DMPC工法采用不排水下沉,水下封底,现浇沉井池壁,通过穿心千斤顶精确控制下沉幅度,相比地墙支护,节约了围护墙长度和内支撑设置,从而节约了工期;同时,由于是分段现浇井壁,不像地墙钢筋笼需要一体加工,整体吊装,从而节约了施工场地;在节约围护墙长度的同时,也降低了投资。
- (3)VSM工法同样采用不排水下沉,井壁采用预制管片,现场拼装,通过一体化设备中的沉降单元控制沉降,充分运用一体化设备的智能化和数字化功能,明显减少工期;管片在工厂预制,现场拼装,节约了场地;不排水下沉,水下封底,解决了承压水控制的问题,从而节约了围护墙长度,降低了投资。

然而,4#竖井改为VSM工艺后,投资并未节约,这说明对30 m级深度以下的竖井采用VSM建造工艺的投资优势不明显,甚至会高于传统地墙建造工艺。

此外,DMPC工法的工期优势不如VSM工法,原因是DMPC井壁采用现浇工艺,而VSM工法采用预制拼装管片。

下面以1#竖井和3#竖井为例,进行DMPC工法和VSM工法介绍。

下面以1#竖井和3#竖井为例,进行DMPC工法和VSM工法介绍。

3.3 1#竖井DMPC方案

1#竖井内径16 m,挖深22.90 m,井壁厚度为1.2~1.5 m变截面,沉井分多次浇筑、2次下沉。周边采用钻孔灌注桩作为地锚,为沉井下沉提供额外的辅助压沉力。同时,在盾构出洞及后期凿孔位置插入SMW工法桩,结合钻孔灌注桩,形成完整的隔离桩体系,进一步降低沉井下沉及后续土方开挖对周边环境的影响。井底设置十字梁,在提高井体受力稳定性的同时,有助于提高封底混凝土的质量。

1#竖井设计方案见图4。

1#竖井现场建造过程如图5所示。

3.4 3#竖井VSM方案

3#竖井内径16.4 m,挖深34.9 m,竖井每环由8块管片组成,环宽1 500 mm,环向管片纵缝采用CT铸铁承插快速接头连接,纵向管片环缝采用通长螺

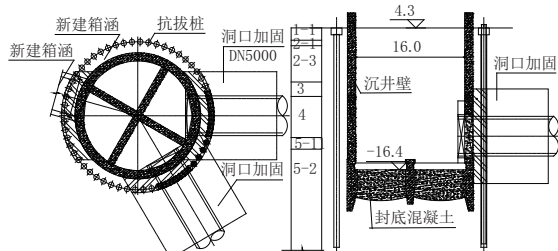


图4 1#竖井平剖面示意图(单位:m)



图5 1#竖井现场施工照片

栓和剪力销连接,螺栓与剪力销间隔布置。底部一环采用钢刃脚。管片顶部设置后浇段,待下沉到位后,通过后浇段实现井体与抗拔桩上部基础环梁的连接;基础环梁在竖井下沉过程中作为VSM地面设备的基础,在使用阶段作为竖井抗浮的附属结构。

3#竖井底部采用素混凝土封底,为保证封底混凝土质量,设置封底环梁;环梁位于内部结构底板下部,通过管片预留企口和预埋件实现固定。

管片环缝与纵缝之间设置双道止水带,确保管片的防水效果。管片在地面拼装的同时,在外弧面环缝和纵缝间隙均注入化学材料进行嵌缝,形成额外的一道防水层,进一步保证井体结构的水密性。

3#竖井设计方案见图6。

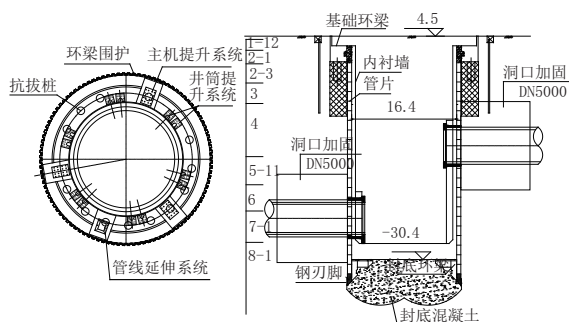


图6 3#竖井平剖面示意图(单位:m)

3#竖井现场工艺建造过程如图7所示。

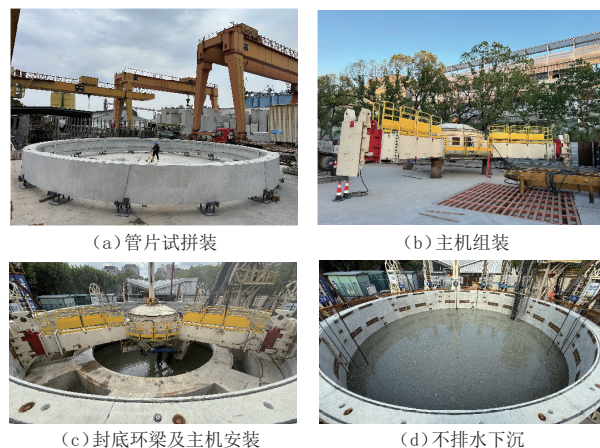


图7 3#竖井现场施工照片

4 结 语

本文对城市密集区竖井建造工艺进行了介绍,对比分析了不同工艺的关键技术性能和应用场景,结合工程案例阐述了竖井建造的制约因素和工艺优化选择原则。主要结论如下:

(1)地墙、传统沉井、DMPC工法、VSM工法是软土地区竖井建造的常见工艺,各有优缺点,应结合应用场景,多维度对比分析,选择合适的建造方案。

(2)城市密集区具有施工场地小、交通繁忙、居民密集、沿街商铺林立、市政设施复杂等特点,宜优先选择施工场地占用小、环境影响可控、绿色、低碳、高效且相对成熟的方案,以保证竖井落地。

(3)DMPC工法和VSM工法等新技术在上海软土地区有较好的适用性,相比传统竖井建造方案,某些场景下,在施工场地、施工工期等方面具有优势。DMPC工法的工期优势不如VSM工法。

(4)对于30 m级深度以下的竖井,采用VSM建造工艺的投资优势不明显,甚至会高于传统地墙建造工艺。

参考文献:

- [1] Zhai Y X, Wu W F, Zhu Y T, et al. The research and application of active control precast press-in shaft machine [C]//Tunnelling into a Sustainable Future-Methods and Technologies. London: CRC Press, 2025: 3653-3660.
- [2] Charanton E, Daneshmand K, Marchese L. Overcoming geotechnical challenges in design of a complex station in dense urban area[C]//Tunnelling into a Sustainable Future-Methods and Technologies. London: CRC Press, 2025: 3381-3388.
- [3] DG/TJ 08-61—2018 基坑工程技术标准 [S].
- [4] 汪炳鉴,夏明耀.地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J].岩土工程学报,1983(3):103-114.

(下转第379页)