

软土地层悬吊装配式竖井施工技术的应用

侯 森

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433]

摘 要: 针对超深顶管工作井在建筑物密集、作业空间狭小的中心城区施工难题,介绍了悬吊装配式竖井(SPS)自动化掘进工艺在非开挖顶管领域的应用。该工艺通过悬吊下沉系统稳定预制拼装井身,采用多角度旋转刀头配合绞吸系统水下全自动掘进,相对于传统工艺作业所需施工场地小、效率高且更为低碳环保。工程实践表明装配式竖井施工技术:自动化程度高,竖井下沉自主可控;竖井采用预制管片拼装而成,极大提升了现场施工效率和质量;采用不排水形式掘进下沉,可有效控制开挖面的失稳风险和周边沉降。

关键词: 装配式竖井; 预制拼装; 顶管井; 不排水掘进

中图分类号: TU992.05

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0330-06

Construction Technology and Application of Suspended Prefabricated Shaft in Soft Soil Stratum

HOU Sen

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: Aiming at the construction challenges of the ultra-deep pipe jacking shaft in the central urban area with dense buildings and limited working spaces, the application of the automated tunneling process for suspended prefabricated shafts (SPS) in the trenchless pipe jacking field is introduced. This process stabilizes the prefabricated and assembled shaft body through a suspended sinking system and uses a multi-angle rotating cutter head blade in conjunction with a twisting suction system for fully automatic underwater excavation. Compared with the traditional processes, it requires a smaller construction site, is more efficient, and is more environmentally friendly and low-carbon. The engineering practice shows that the construction technology of prefabricated shafts has a high degree of automation, and the sinking of shafts is autonomous and controllable. The shaft is assembled with prefabricated pipe segments, highly improving the efficiency and quality of on-site construction. And the tunneling and sinking are carried out in an undrained form, which can effectively control the instability risk of the excavation face and the surrounding settlement.

Keywords: prefabricated shaft; prefabricated assembly; pipe jacking shaft; undrained tunneling

0 引言

随着城市化进程加速,城市地下空间开发已成为缓解土地资源紧张、优化基础设施布局的核心策略。竖井作为贯通地下空间的“垂直通道”,其施工质量直接影响工程效率与周边环境安全。然而,传统竖井施工技术如沉井法、地下连续墙等,因依赖人工操作、纠偏响应滞后、地层适应性局限、工期冗长等问题,难以满足复杂地层和集约化城市环境的需求,尤其在软土、高渗透砂层中,传统工艺易引发泥浆渗漏、地表沉降超限等风险,环境代价高昂,严重制约地下空间的可持续发展。

在传统竖井工艺难以满足深部地层高效施工的背景下,悬吊装配式竖井因具有高效、环保、可标准化等优势,通过智能化装备与绿色施工技术的深度融合,为城市受限空间地下工程建设提供了兼具效率与精度的解决方案。针对装配式竖井施工过程井壁的受力情况,柳献等^[1]考虑侧向摩阻、结构倾斜、重心偏移等因素提出了竖井悬吊力计算方法和纠偏措施。卞超等^[2]分析了竖井下沉的各项阻力,提出了考虑井内淹水的刃脚端阻力计算公式,并建立井壁施工力学模型。针对装配式预制管片设计,包鹤立等^[3]基于圆形井壁的结构受力特性和装配式井壁组合拼接形式,对管片结构壁厚和对接形式进行了设计优化。

然而,这些研究多基于理想化假设,且受限于试验条件,难以真实反映实际工程中的动态耦合效应。

收稿日期: 2025-05-17

作者简介: 侯森(1995—),男,硕士,工程师,从事地下工程领域非开挖技术研究工作。

姜宏等^[4]、张振光等^[5]、姚坚等^[6]以竖井地下停车库为案例,介绍了SPS工艺施工流程及技术控制要点。总体来说,国内关于装配式竖井的工程应用还相对较少,尤其在软土、高渗透性地层中的实践案例匮乏。

本文以上海泰和污水处理厂扩建工程为例,简要阐述SPS的施工步骤和控制要点,通过实测数据,验证了其在敏感环境的可行性,以推动装配式竖井技术的进一步发展和标准化。

1 工程概况

泰和污水处理厂扩建工程位于上海市宝山区,全线采用顶管法施工,其中E13#顶管井开挖深度为37.4 mm,采用装配式竖井施工工艺。竖井内径为8 m,壁厚0.4 m,结构纵向尺寸34.5 m,包括1.5 m的刃脚及22环管片,每环管节由4块管片拼接,见图1。

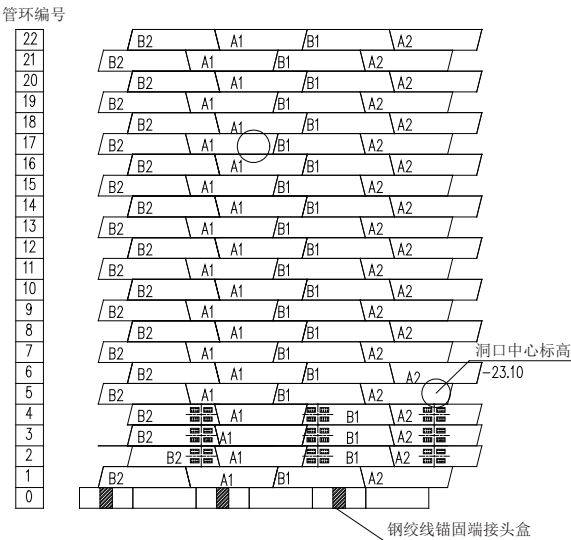


图1 井位剖面图

1.2 地质、水文条件

施工场地主要为正常沉积区,局部涉及古河道,场地内土层自上而下见图2,施工范围内涉及的承压水主要赋存于⑦₁₁层(水头埋深3~5.24 m,承压水顶板标高-19.1 m)、⑧₂层(水头埋深3.00 m,承压水顶板标高-54.8 m,与⑨层连通)中的承压水。

2 装配式竖井施工技术

VSM工艺通过“地层自适应掘进-悬吊下沉智能控制-预制管片拼装-泥浆闭环管理”四大技术模块,井身使用预制混凝土管片,在地面上开挖与管片拼装同步进行,可极大提升施工效率,实现超深竖井施工的精准、高效与安全。

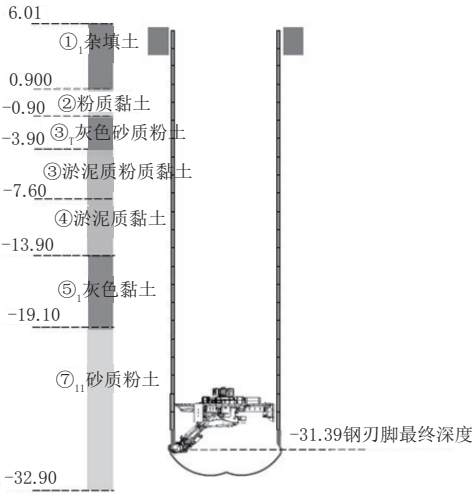


图2 土层分布情况

2.1 地层自适应掘进

竖井开挖采用不排水下沉工艺,沉井最终开挖至承压水所在土层-砂质粉土层。为了防止承压水和地下水涌入井内,竖井在开挖过程中,井内水位始终保持比承压水位和地下水位高0.5 m以上。

2.1.1 掘进主机

掘进主机主要包括伸缩臂,机架和锁具,采用全封闭防水结构设计,确保在高水压环境下稳定作业。其底部伸缩臂装置具备1 000 mm行程扩展能力,且可围绕垂直轴实现±190°旋转,满足全断面开挖需求,其底部是铣筒,可根据不同地质条件的安装不同的截齿,见图3。铣筒可在水下环境中切削渣土与井内泥浆所形成混合物,通过主机后端管路泵送至地面泥水分离系统。



图3 竖井掘进机

2.1.2 多参数动态调整机制

主机的挖掘作业呈现动态变化,机械臂先从中部向外摆动进行开挖,完成第一部分挖掘后,大臂回缩至中部,旋转伸机械臂进行下一分区的开挖作业。工作井内径为8.0 m,井壁厚度为0.4 m,主机伸缩臂进行作业时,相邻区间会有10 cm左右的重叠,以确保开挖面的全覆盖。开挖过程中,伸缩臂延水平方

向会有 50~80 mm 的超挖范围,以保证竖井的顺利下沉,见图 4。

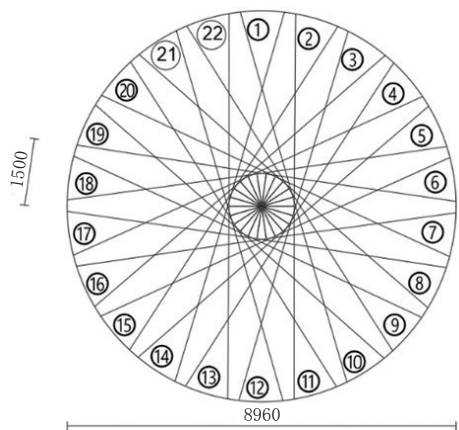


图4 开挖仓面(单位:mm)

根据不同的土层参数,会动态调整设备的开挖设定值,针对上海软土地层,制定如表 1 所示的开挖参数。

表 1 不同地层的开挖参数

地层	土层底标高	径向超挖/mm	铣挖深度/mm	单次下沉/mm
① ₁ 杂填土	0.9	50	100	100
② 粉质黏土	-0.9	80	100	100
③ ₁ 砂质粉土	-3.9	50	100	100
③ 淤泥质粉质黏土	-7.6	50	80	80
④ 淤泥质黏土	-13.9	50	80	80
⑤ ₁ 灰色黏土	-19.1	60	100	100
⑦ ₁₁ 砂质粉土	-32.9	50	100	100

2.2 悬吊下沉智能控制系统

2.2.1 掘进姿态监控

施工中竖井每环拼装管片的姿态控制包括各管片顶部的高差、管片外壁与圈梁内侧的间距、管片垂直度等。沉井的整体姿态偏移采用测斜仪进行度测量,测量管沿着整个竖井深度布置。整个竖井布置 2 个测斜管(MP1、MP2),以 90° 的角度错开,固定在井壁内侧,随沉井开挖同步下沉。测斜管坐标轴的正值均表示竖井底部相对于顶部的偏移,通过两组数据的的数值大小可综合判断沉井姿态,见图 5。

2.2.2 竖井姿态控制

竖井在施工过程中井筒通过锚固在刃脚底部的钢绞线悬挂在设置在地面的 3 个沉降单元上。沉降单元由 3 组拉力千斤顶组成,两两呈 120° 分布在顶部环梁之上。竖井施工之前,钢绞线便通过锚固盒固定在底部钢刃脚之上,通过预张拉保证均匀受力,见图 6。

在竖井下的整个施工过程中,沉降单元通过钢

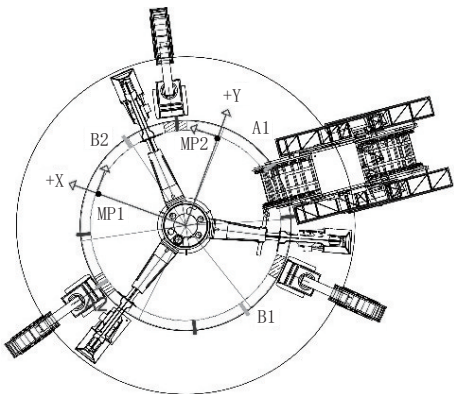


图5 测斜管布置

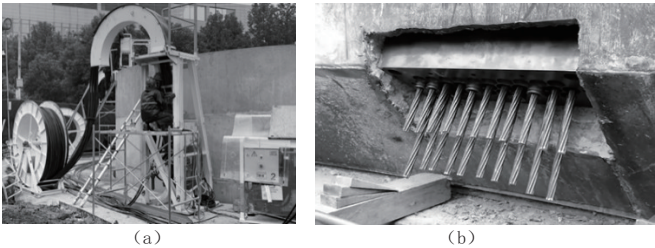


图6 沉降单元

绞线拉紧井筒,中控系统通过设处钢绞线的下方长度和井身垂直度测量反馈,可以实时调整沉降单元千斤顶收缩量,从而控制下沉轨迹偏差,解决传统沉井法人工纠偏的滞后问题。

2.3 预制管片拼装工艺

2.3.1 管片拼接

预制管片采用环向螺栓拼装成环,同时采用纵向螺栓将上下衬砌环片进行固定。每环由 4 片 1.5 m 宽的管片组成,每块管片外形尺寸均一致,设计楔形量。为了确保管片拼装后的受力有效性,相邻两块管片安装方向相反,错缝拼装。

在安装过程中,每环 4 块管片先行安装底部弧长大的管片,然后再安装底部弧长小的管片,螺栓连接形成整体后,继续拼装下一环,见图 7。每块管片设有两个吊装孔,吊装孔与管片重心构成的平面恰好与水平面垂直,从而保证管片吊装时的垂直度。

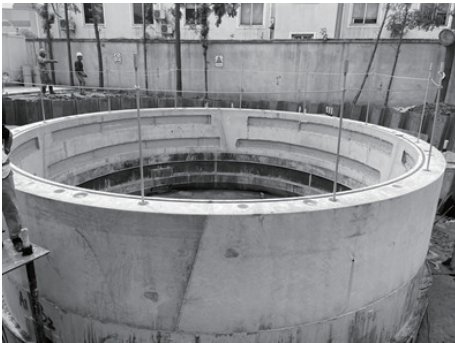


图7 管片拼装

由于装配式竖井全过程为不排水施工,井身为一次性拼装成型,无法在施工过程中对管片轴向和环向的连接螺栓复紧操作。因此,在管片地面拼接的过程中应着重注意管片间的螺栓的安装质量和紧固要求,加强对管片拼接的完工质量检查。

2.3.2 接缝止水

管片接缝止水采用三元乙丙橡胶止水带,邵氏硬度达到 57,拉伸强度为 14.5 MPa,拉断伸长率 456%,其布置形式见图 8,在干净、干燥的管片防水槽内均匀涂刷橡胶黏接剂 1~2 遍,同时在止水带内面也均匀涂刷橡胶黏接剂 1 遍,涂刷必须均匀,无遗漏。待黏接剂初干(用手接触不黏手、不拉丝)后,将密封垫放入槽内进行粘贴,其程序:先两端面,后环面,中间逐渐向两端延伸,黏贴必须四角平整服贴,不可突起或塌下。然后用木锤击之,使其粘贴充分,避免浮贴,以防止在拼装时密封垫错位失落,造成拼装困难和防水失效。

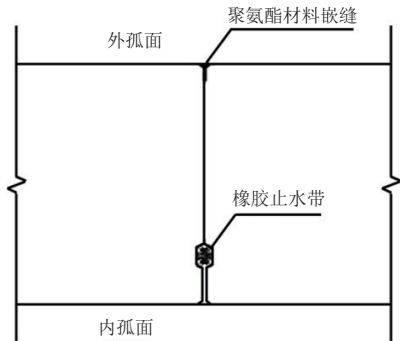


图 8 管片接缝止水

2.4 不排水掘进泥浆闭环系统

2.4.1 侧壁减阻

下沉施工时,由于主机在环向作业过程中存在部分超挖,为维持井壁外侧土体稳定,防止坍塌事故,施工中需持续填注膨润土泥浆,通过管片预留注浆孔进行压注,膨润土混合物特性:马什漏斗黏度为 120 ms/L;静态屈服点为 40 N/mm²;滤矢量(mL)实际值不大于 20。

若发生膨润土渗漏,可向注浆系统中添加木屑等堵漏材料,并将注浆压力控制在 0.4 MPa 左右,通过井壁预留注浆管实施补浆作业。

在超挖模式下,理论上底部刃脚处的下沉阻力为 0,竖井施工中受到的竖向力包括:井身总重 G_0 ,主机重量 G_m ,井外壁摩阻力 f ,水的浮托力 F_w 和钢绞线的悬吊力 F_s 。在下沉阶段井身结构受力为:

$$G_0 + G_m = F_w + f + F_s \quad (1)$$

下沉结束后,井身的完全依靠钢绞线提升,按实

际要求仍可进行略微上提,此时井身受力状态为:

$$G_0 + G_m + f = F_w + F_s \quad (2)$$

因此,沉降单元的最大力直接受管壁外摩阻力的影响,因此需加强对管外泥浆系统的过程控制,随时监测补充^[1]。

2.4.2 井底清淤

竖井下沉到位后,对沉降单元钢绞线进行固定。设定主机端头位置距离底部管壁内侧 5~7 cm,开启泥浆回流管路,刀头以最大转速带动水流转动,对井壁进行清理。

用 VSM 设备将井筒内浓泥浆吸出,经泥水分离系统及离心机处理达到降比重的效果,再将处理后的稀泥浆补充入井筒内,此过程一直循环到从 VSM 设备抽出的泥浆比重低于 1.05 为止。

2.4.3 膨润土置换

当封底混凝土实施完成,并达到设计要求时。对井壁外空间内的膨润土采用水泥浆液进行置换。水泥浆液水灰比控制在 1:1。注浆量控制在理论建筑空隙的 110%~130%。注浆压力设定按注浆高度分层计算,注浆压力设置在 0.3 MPa 左右。注浆过程中,监视管片顶部的膨润土流出,直到管片顶部流出的水泥浆液,且水泥浆液比重达到或者接近置换注入的水泥浆液为止。

3 实施效果

较于传统的顶管井施工工艺,装配式竖井在施工场地的集约化、低影响微扰动施工等方面优势显著,井位的姿态及轴线控制精度较高。作为装备高度集成化、自动化的施工工艺,井位施工全部采用预制装配式,相较于地下连续墙形式的开挖施工,装配式竖井工艺井身一次成型,无需进行内部土方开挖,在保障施工安全的同时,工期可节省约 20%。

如图 9 所示,顶管井自开始掘进到下沉到位共用时 13 d,日最大掘进下沉量达到 4.86 m/d,施工过程中产生的泥浆经泥水循环系统干化后全部以土方外运的方式处理,由于现场土方临时储存池方量有限,竖井施工的工效会受到现场土方处置效率的影响,日均掘进量为 2.87 m/d。

为更好的评估装配式竖井的施工效果,对竖井周边建筑、管线及地表沉降进行全过程的沉降观测,井位周边监测点位布置见图 10。

如图 11~图 14 所示,将整个井位施工过程的沉降监测分为 3 各阶段:阶段 I 为掘进前的的施工准

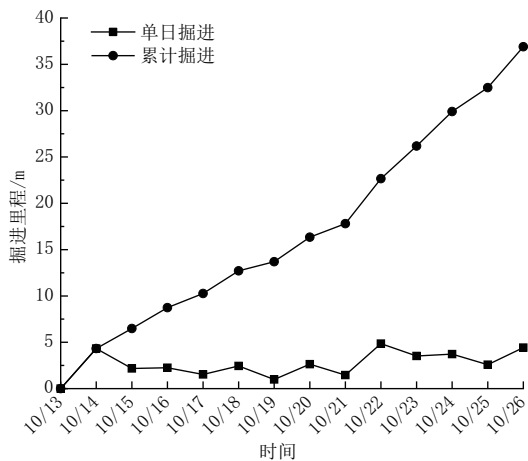


图9 竖井下沉曲线

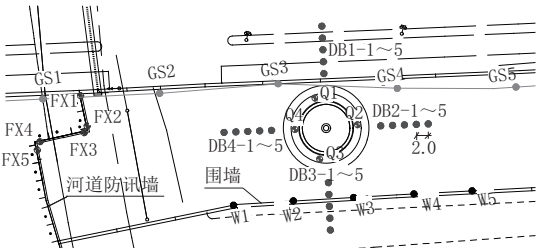


图10 监测点位布置

备,包括灌注桩、圈梁和钢刃角的施工;阶段Ⅱ为井位下沉掘进施工;阶段Ⅲ为井施工完成后的持续监测。

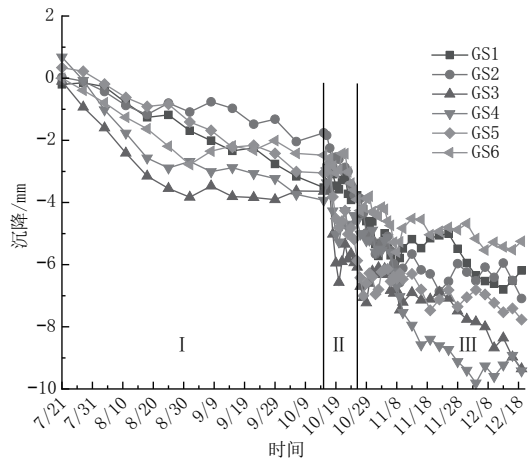


图11 给水管线沉降

在阶段Ⅰ井位正式掘进下沉之前,周边的主要管线和建筑物几乎不存在沉降。阶段Ⅱ掘进下沉阶段,周边管线及建筑围墙都在此阶段出现较大下沉量的累积,过程中管线最大沉降为5 mm,井边现状围墙沉降达到4 mm,而距离井位较远的岸边防汛墙几乎未受到影响,表明竖井下沉施工阶段刀盘震动、超挖对周边环境的影响在可控范围之内,这是由于工艺采用不排水开挖方式,且通过井筒内的水位及泥浆密度的严格控制,较好的降低了弥补了土体损失。此外,由于掘进施工时,圈梁作为支撑需要承受

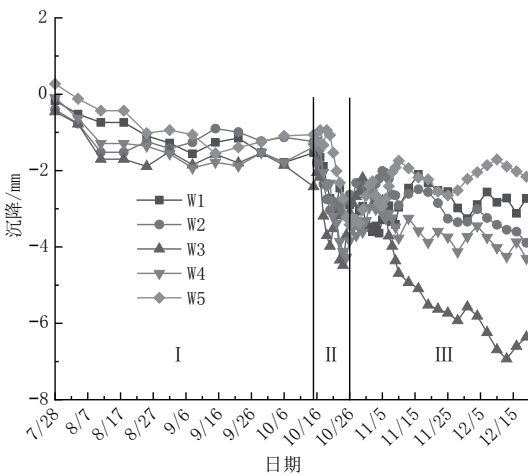


图12 周边建筑围墙沉降

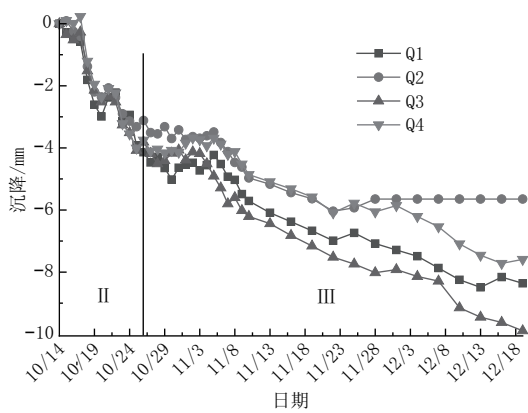


图13 顶圈梁沉降

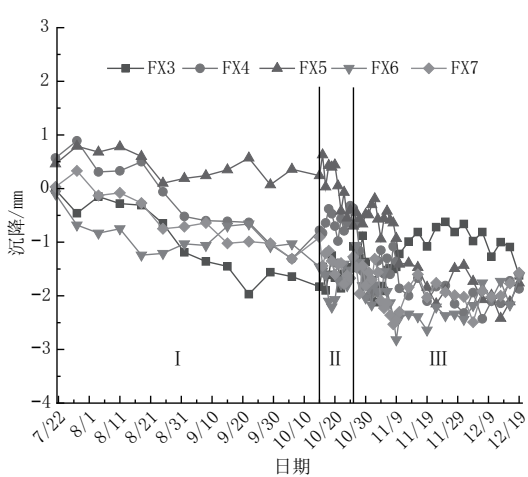


图14 防汛墙沉降

所有的设备和井体的重量,掘进阶段的沉降量达到了4 mm。阶段Ⅲ井位下沉封底之后,沉降都基本趋于稳定,持续监测2个月之后,井位周边管线和建筑物沉降都趋于稳定。

总体来说,悬吊装配式竖井自动化掘进工艺,在实际施工过程中较常规工艺更加高效,对周边环境影响极小,尤其是面对土质情况复杂,施工场地狭小的情况更具有优势,具有良好的应用前景。

4 结 语

本文所介绍的悬吊装配式竖井自动化掘进施工周期短、环境影响小、施工所需场地更加灵活,验证了其在超深腹水底层中的顶管井建造的实用性。具体结论如下:

(1)悬吊装配式竖井自动化掘进施工设备集成、自动化程度高、施工所需面积小,掘进过程可以按照预设程序连续作业开挖,几乎可以无视地层因素影响持续作业,在保证精度的情况下同时大大提升效率。

(2)掘进下沉全过程采用采用不排水方式,基于实时地层数据动态调整铰挖参数,可有效降低外部地下水和突变地层对施工和周边环境的不利影响,有效控制地层失稳风险和降低地表沉降。

(3)施工利用设备主机铰筒主动切削土层,实现超挖配合自重下沉,同时井身采用独立的沉降单元控制下沉,自主可控,竖井姿态及轴线控制精度显著

提升。

悬吊拼装式竖井在竖井施工领域具有良好的应用前景,较传统工艺可以有效降低施工过程中能源的消耗,提高材料利用率,对推动地下工程建设向绿色、可持续方向发展具有重要意义。

参考文献:

[1] 柳献,黄铭亮,张振光,等.超深装配式竖井下沉原理与控制措施研究[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):1009-1016.

[2] 卞超,冯旭海,王建平.VSM沉井下沉过程井壁受力规律研究[J].煤炭工程,2021,53(2):41-47.

[3] 包鹤立,姜弘.装配式竖井预制混凝土管片结构设计[J].隧道建设(中英文),2022,42(增刊1):376-381.

[4] 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(3):463-470.

[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(3):492-500.

[6] 姚坚.装配式竖井掘进法应用案例与技术要点研究[J].中国市政工程,2024(2):79-83;147-148.

(上接第305页)

[4] 包伊婷.机场水泥混凝土道面板早期温度应力研究[J].黑龙江科学,2024,15(24):54-56;60.

[5] 张伟光,鲍帆,王敬凌,等.机场道面不停航施工数字建模与影响评估[J].指挥信息系统与技术,2022,13(5):32-40.

[6] 赵鹏芳.谈某大型机场沥青混凝土道面修补材料[J].山西建筑,2014,40(24):125.

[7] 黄之懿,游庆龙,马靖莲,等.飞机轮载作用下沥青道面荷载影响范围分析[J].中国科技论文,2023,18(8):890-896;904.

[8] 焦张弘.含砂雾封层在新疆机场沥青道面的应用研究[D].西安:长安大学,2023.

[9] 程德金,杨凯,戴征,等.高模量剂对机场沥青道面高温性能的影响[J].山西建筑,2022,48(15):119-122;126.

[10] 李江华,于清.某机场跑道破损混凝土板的维修[J].工业建筑,2002(4):67-69.

[11] 王建南,刘银辉.机场环氧沥青道面性能研究及工程应用[J].民航学报,2021,5(4):50-53.

[12] 胡宇祺.基于道面轮辙分布规律的飞机轮胎滑水风险研究[D].天津:中国民航大学,2022.

[13] 罗俊.沥青道面在我国民用机场应用的研究[J].建材与装饰,2018(19):281-282.

[14] 黄友生,韩青英.机场跑道专用改性沥青的开发与应用[J].石油沥青,2023,37(1):1-6.

[15] 金杰,练伟娟.机场跑道专用改性沥青开发与应用[J].化工管理,2019(33):97-98.