

DOI: 10.7672/sgjs2026040086

软土地层机械法沉井施工技术及环境影响规律分析*

蒋晓天

(上海城建市政工程(集团)有限公司,上海 200032)

[摘要] 随着城市地下空间开发需求的增长,受制于交通、地下管线、邻近建筑等环境因素的影响,城市竖井建设面临诸多挑战。机械法沉井施工技术凭借其自动化、智能化和机械化的特点,逐渐成为解决这些问题的有效手段。以泰和污水处理厂扩建工程 THK1.3 标中的 E-30 和 E-31 工作井为依托,介绍了机械法沉井施工技术的装备选型、环境保护措施及施工过程中的实测数据分析。研究表明:通过增加环梁底部加固长度和设置永久拉森钢板桩的措施,可显著减小施工过程中周边管线的位移;机械法沉井施工过程中,深层土体水平测斜曲线呈现中部大、两端小的规律,且峰值位于环梁梁底加固与原状土界面之间,土体沉降及深层水平测斜数值变化速率随开挖深度呈先快后慢的规律。

[关键词] 地下工程;沉井;软土;数值模拟;位移;监测

[中图分类号] TU472

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0086-06

Construction Technology and Environmental Impact Analysis of Mechanical Sinking Well in Soft Soil Strata

JIANG Xiaotian

(Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: With the increasing demand for urban underground space development, urban shaft construction faces numerous challenges due to environmental factors such as traffic, underground pipelines, and adjacent buildings. The mechanical sinking shaft construction technology, characterized by its automation, intelligence, and mechanization, has gradually become an effective means to address these issues. Based on the E-30 and E-31 working shafts in the THK1.3 section of the Taihe Wastewater Treatment Plant expansion project, this paper introduces the equipment selection, environmental protection measures, and actual measurement data analysis during the construction process of mechanical sinking shaft technology. The research results show that by increasing the reinforcement length at the bottom of the ring beam and setting up permanent Larsen steel sheet piles, the displacement of surrounding pipelines during the construction process can be significantly reduced. During the mechanical sinking shaft construction process, the horizontal inclinometer curve of the deep soil layer exhibits a pattern of being large in the middle and small at both ends, with the peak located between the reinforced bottom of the ring beam and the undisturbed soil interface. The rate of change in soil settlement and deep horizontal inclinometer values follows a pattern of being fast initially and then slowing down with increasing excavation depth.

Keywords: underground engineering; open caisson; soft soil; simulation; displacement; monitoring

0 引言

随着城市更新速度的加快,地下空间的开发利

用已成为城市可持续发展的重要方向。然而,浅层地下空间逐渐趋于饱和,深层地下空间的开发需求日益迫切。在城市密集区域,尤其是软土地层中,地下工程建设面临着诸多挑战,如施工场地狭小、环境保护要求严格、周边建筑物密集等。传统沉井施工方法虽然在竖井建设中具有一定的应用基础,

*上海市住房和城乡建设管理委员会 2025 年度科研项目:机械掘进式沉井工法受力理论体系及工业化快速施工技术(沪建科 2025-001-013)

[作者简介] 蒋晓天,高级工程师,E-mail:skyjxt@126.com

[收稿日期] 2025-09-05

但在软土地层中存在控制精度差、环境影响大、施工效率低等问题^[1-4]。近年来,机械法沉井施工技术应运而生,其结合了自动化、智能化和机械化的特点,通过创新的施工工艺和设备,有效解决了传统方法的不足,其通过机械化掘进和精细化控制,显著提高了施工效率和环境友好性^[5-7]。主动控制型装配式沉井工法则通过集成下压提拉双模系统、水下全自动取土、同步压注减摩泥浆等技术^[8],实现了富水软土地层中竖井结构的微扰动精准下沉。全断面竖井硬岩掘进机^[9]在抽水蓄能电站的成功应用,展现了“以人为本、实现机械换人”的原则。这些实践表明,机械法沉井施工技术不仅能够满足软土地层中竖井建设的高精度要求,还能有效降低对周边环境的影响,为城市地下空间的高效开发提供了新的解决方案。

关于机械法沉井在软土地层地表沉降影响,已有专家进行了研究^[10-12],沉降主要集中在距离竖井中心 30m 的范围内,随开挖深度递增。同时在施工过程中,井内水位、井内泥浆密度、侧壁泥浆效果、地层变化等都会影响最终沉降值。敏感环境条件下如何采取有效的主动保护措施来保证施工安全,降低变形影响从而对既有建(构)筑物起到保护作用的资料相对匮乏。

本文结合工程实例,运用 Plaxis 3D 有限元软件分析了敏感环境下机械法沉井在软土地层针对邻近地下管线的保护措施,并通过与实测沉降及深层土体测斜数据对比,验证了保护方案的可行性。

1 工程概况

泰和污水处理厂扩建工程 THK1.3 标起点为水产路和铁峰路交叉口东南侧铁峰泵站,沿水产路、梅林路敷设,终点为梅林路、联谊路交叉口 N-4 井,共设 15 座工作井,其中, E-30 与 E-31 工作井均采

用机械法沉井施工,如图 1 所示。



图 1 E-30 及 E-31 工作井位置

Fig. 1 Location of working wells E-30 and E-31

工作井结构断面设计为内径 8m 圆环状,开挖深度 35.9m。工作井结构采用预制混凝土管片进行拼装,管片宽度定为 1.5m,管片厚度为 0.4m,管片圆环分为形式完全相同的 4 块。如图 2 所示,管片前 3 环为掘进机设备安装环,拼装时不错缝拼装。第 4 环与第 3 环间由于设备安装需要,错缝 45°,第 4 环以上错缝 30°。

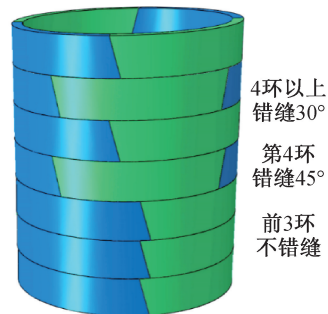


图 2 管片拼装

Fig. 2 Pipe segment assembly

工程场地内土质主要涉及黏性土、粉土以及砂土,土层物理力学参数如表 1 所示。场地内分布有潜水和承压水,潜水主要赋存于浅部土层中,稳定水位埋深 0.3~1.5m;承压水分布于⑦₁₁层、⑧₂层及⑨层中,水位埋深分别为 3~12m。E-30 和 E-31

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

地层	②层灰黄色粉质黏土	③层灰色淤泥质粉质黏土	③ _T 层灰色砂质粉土	④层灰色淤泥质黏土	⑤ ₁ 层灰色黏土	⑤ ₂ 层灰色砂质粉土	⑤ ₃ 层灰色粉质黏土夹砂质粉土	⑥层灰绿~灰褐色粉质黏土	⑥层暗绿~草黄色粉质黏土	⑦ ₁₁ 层草黄~灰色砂质粉土	⑧ ₁₁ 层灰色黏土
重度/(kN·m ⁻³)	18.8	17.4	18.6	16.8	17.4	18.2	18.0	19.6	19.7	18.4	17.8
黏聚力/kPa	20.4	11.1	15.7	10.9	13.8	2.9	15.6	45.6	47.4	3.6	22.0
内摩擦角/(°)	18.5	3.7	30.1	11.6	13.5	30.6	20.0	17.0	16.4	30.6	16.7
含水量/%	29.7	42.1	30.3	49.7	41.9	31.2	33.0	23.5	23.6	31.5	38.2
标贯击数/击	—	—	11.7	—	—	20.7	—	—	—	22.0	—
侧压力系数 K ₀	0.48	0.62	0.55	0.65	0.57	0.50	0.50	0.28	0.28	0.48	0.50
垂直渗透系数/(cm·s ⁻¹)	2×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶	3×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁶	6×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁷
水平渗透系数/(cm·s ⁻¹)	5×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁶	1×10 ⁻³	6×10 ⁻⁷	8×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻³	8×10 ⁻⁷

工作井所涉及场地开挖范围内仅有⑦₁₁ 承压水层。

2 机械法沉井装备选型

机械法沉井装备选用沉井式竖井掘进机,其核心为井筒提升系统和主机系统,如图 3 所示。井筒提升系统如图 4 所示,主要支护用的钢筋混凝土管片和整体吊装,对已安装衬砌体姿态进行调整,保证筒体的垂直度及平面度,掘进作业完成后,完成对衬砌体标高、象限角、平面度的最终精确定位后,锁定衬砌体的位置,并支撑其全部质量,直到下部主机拆机完成。

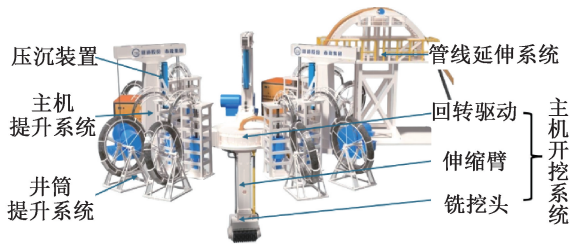


图 3 沉井式竖井掘进机

Fig. 3 Sinking well type vertical shaft excavation machine

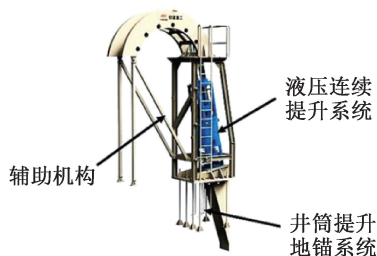


图 4 井筒提升系统

Fig. 4 Shaft lifting system

主机开挖系统是沉井式竖井掘进机的主要工作部件,由铣挖头及运动组件等构成,如图 5 所示。铣挖头上安装有多个截割齿,通过电机带动截割头旋转实现对掌子面的开挖,铣挖头背面配备渣浆泵,切削下来的渣土通过搅拌形成高浓度泥水,用流体输送的方式运至地面。运动组件由多个结构件及油缸组成,可实现铣挖头的伸缩及摆动功能,实现整个掌子面开挖。掘进机开挖直径为 7~13m,开挖深度 150mm/循环,主机重约 100t,装机功率约 1 238kW,最大开挖深度 80m,最大工作压力为 10bar。

3 环境保护措施

3.1 周边环境情况

E-30 和 E-31 工作井周边环境风险主要为地下管线,包含超高压电缆、燃气等,2 座工作井工况相似,因此以 E-31 工作井为例开展具体分析,周边管线情况如图 6 所示,主要有电力 12 孔超高压管线、

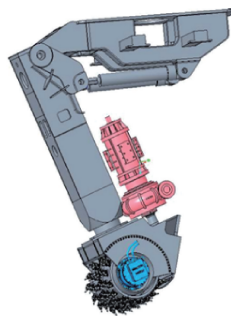


图 5 主机开挖系统

Fig. 5 Excavation system of the host machine

电力工井、DN1 400 雨水管、DN300 燃气管、DN500 上水管及电力孔 21 管,其中 DN300 燃气管、DN500 上水管及电力孔 21 管进行改排处理,电力工井、电力 12 孔超高压管线及 DN1 400 雨水管距离工作井较近,在施工过程中设置了沉降测点进行重点保护。

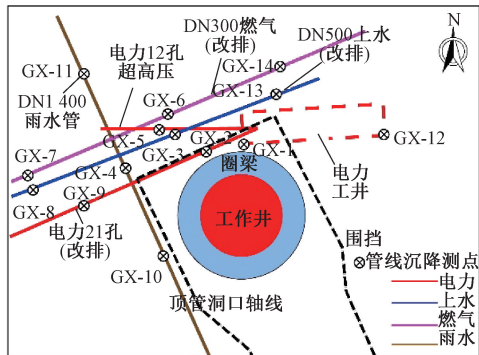


图 6 E-31 工作井周边主要地下管线情况

Fig. 6 Main underground pipelines around E-31 working well

电力工井截面尺寸 3.3m×1.5m,埋深 0.9m,距井边缘仅 2.7m,电力 12 孔超高压管线截面尺寸 2.1m×0.6m,埋深 1.3m,距井边缘约 3.3m, DN1 400 雨水管埋深 3.3m,距井边缘约 4.1m,管线与工作井剖面位置关系如图 7 所示。

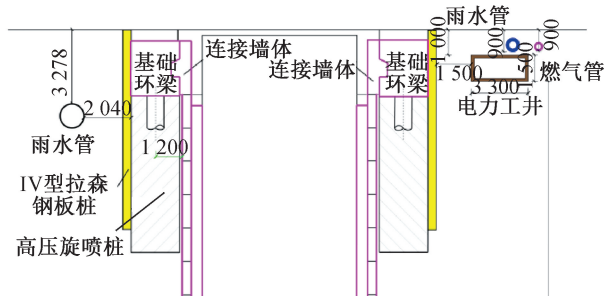


图 7 E-31 工作井周边主要地下管线位置关系

Fig. 7 Location relationship of main underground pipelines around E-31 working well

3.2 环境保护方案优化

E-31 号工作井原设计保护方案为环梁底部增

加4m旋喷桩加固,用于提高土体强度,如图8所示。考虑周边管线复杂,为确保施工安全,加固体增长至7m,并在环梁外侧增加9m永久拉森钢板桩,隔离保护周边管线及电力工井,同时可作为环梁施工基坑开挖围护。

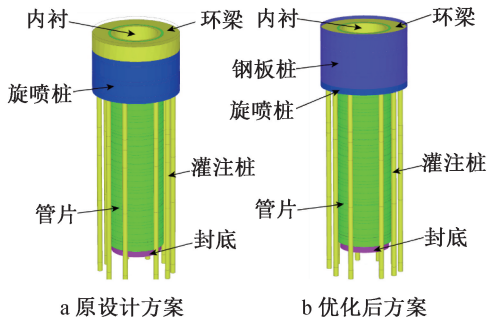


图8 环境保护方案优化

Fig. 8 Optimization of environmental protection plan

3.3 数值计算

运用Plaxis 3D有限元软件对原设计保护方案及优化后的方案按施工步骤分别进行建模计算,模型整体尺寸为 $100\text{m}\times 100\text{m}\times 60\text{m}$ (见图9)。拉森钢板桩采用板单元模拟,并按照等效刚度进行截面换算(等效厚度77.4mm,等效重度 $24.54\text{kN}/\text{m}^3$)。其余部分均采用实体单元模拟。

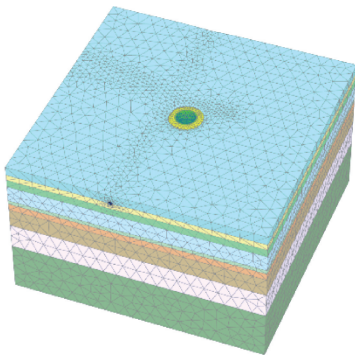


图9 计算模型

Fig. 9 Calculation model

为了更好地分析施工过程中对周边环境的影响,土体采用可考虑土体小应变特性的HS-Small本构模型。高压旋喷桩、环梁、管片、内衬及封底等均采用线弹性模型。HS-Small模型相关计算参数取值参考文献[13],其他线弹性模型材料参数如表2所示。

由计算结果可知,原方案开挖完成时竖井水平位移为6.28mm,竖向位移为18.64mm;优化方案开挖完成时,竖井水平位移为5.91mm,竖向位移为11.34mm。

电力管线竖向位移随竖井开挖下沉逐步增加,

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

参数	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ kPa	泊松比
管片	25.00	36×10^6	0.30
环梁、桩、内衬、底板、 电力工井、封底	25.00	31.5×10^6	0.30
高压旋喷桩	22.00	25.5×10^6	0.30
钢板桩	24.54	200×10^6	0.25

开挖至35.9m,原方案电力管线竖向位移为-10.71mm,优化方案开挖完成时竖向位移为-6.99mm。

3.4 结果分析

计算结果表明,同时增加环梁底部加固长度和在环梁外侧增加永久拉森钢板桩,可有效减小施工过程中周边管线变形,E-31工作井附近电力管线最大沉降可减小约35%(见图10)。

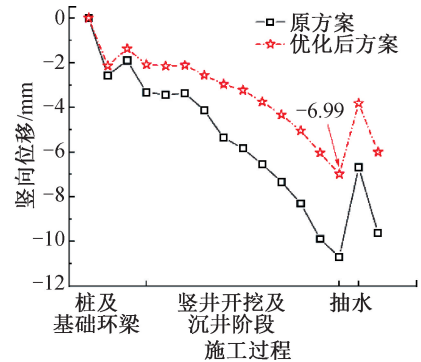


图10 施工过程中电力管线位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of displacement curves of power pipelines during the construction process

4 现场施工与实测数据

4.1 现场施工

本工程机械法沉井管片环宽为1500mm,采用单层每开挖150mm后下沉150mm的方式,循环10次完成单环管片全部行程,每层分为16幅,如图11所示。

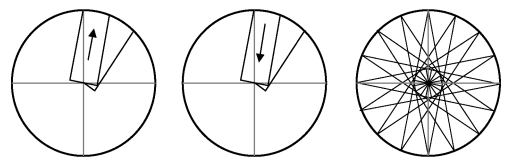


图11 单层开挖分幅

Fig. 11 Single-layer excavation in sections

初始开挖状态伸缩臂位于中心原位,通过伸缩油缸伸长150mm并同步开启铣挖头和渣浆泵进行土体开挖,然后开启摆动油缸从中间向外摆动,开挖直径设为8860mm(即单侧超挖30mm),完成第1

幅开挖后回缩至中心原位,旋转伸缩臂(伸缩油缸伸长量不变),开始下一幅分块开挖,重复步骤直至 16 幅分块全部完成。开挖过程由 PLC 程序自动控制,单层开挖时间约 35min。待全部 16 幅开挖完成后,缩回伸缩油缸,通过控制井筒提升系统,同步下放钢绞线,单次下放行程 150mm,至此完成单层所有开挖动作。

下放过程中,根据井筒主机上安装的倾角传感器及井壁上布置的井筒姿态测斜仪,测算井筒垂直度,本工程垂直度按照 2‰作为井筒纠偏控制值,一旦超标通过调整 4 组井筒提升油缸下放钢绞线的速度及牵引力进行纠偏,必要时也可安装压沉油缸装置进行辅助下沉和纠偏。

E-31 工作井自 2024 年 2 月 23 日开始下沉,(见图 12),初始基坑深 3m,2024 年 3 月 28 日下沉到位,共计下沉 35.9m,去除设备保养和节假日的施工天数(共 25d),日均下沉速度约 94mm/d。下沉可大致分为 4 个阶段:2 月 23 日—2 月 26 日竖井初沉,此时井体自重较小,竖井姿态易受地层及其他施工因素影响,下沉速度小,平均下沉速度约 52mm/d;2 月 28 日—3 月 3 日,地层变形与土体测斜稳定,下沉速度加快,平均下沉速度为 100mm/d;3 月 8 日—3 月 23 日,增加夜间施工班次,下沉速度进一步加快,平均下沉速度约 143mm/d。机械掘进式沉井工法全过程下沉施工工期曲线如图 13 所示。



图 12 工作井机械法沉井施工

Fig. 12 Construction of mechanical sinking well for working well

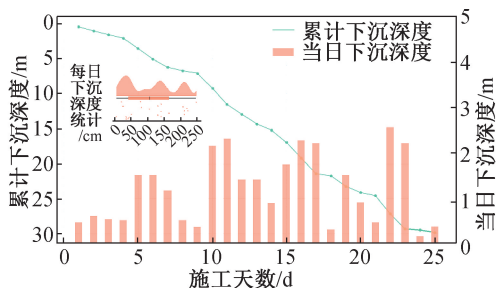


图 13 下沉时程曲线

Fig. 13 Time history curve of sinking

4.2 实测数据分析

为探究机械法沉井施工阶段周边土体变形规律,在工作井环梁边设置 2 处深层土体位移监测点,测量土体深度 60m。深层土体测斜-加固深度关系如图 14 所示。深层土体测斜曲线呈中部大、两端小。从开始下沉到下沉至设计标高,深层土体水平测斜峰值一直位于环梁梁底加固与原状土界面之间。

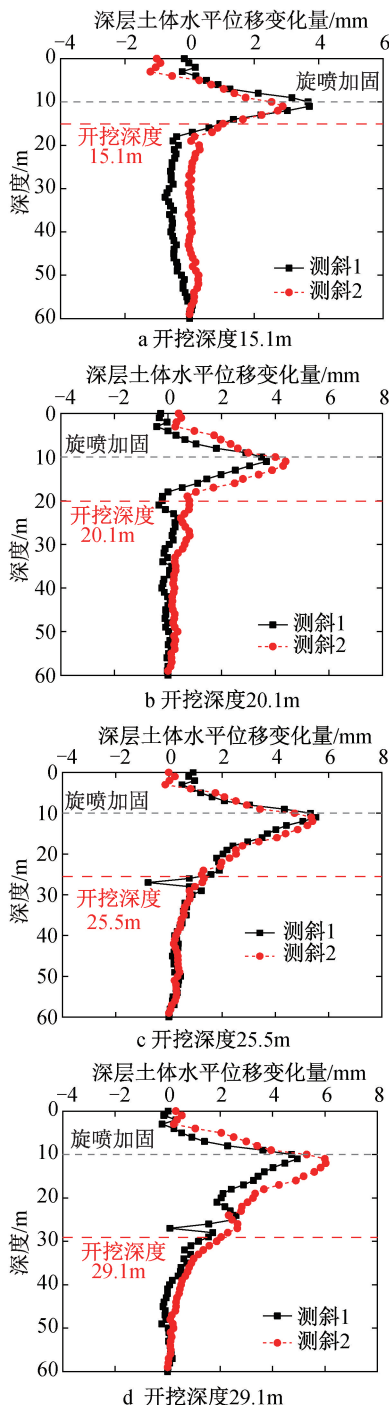


图 14 工作井深层土体测斜-加固深度关系

Fig. 14 The relationship between deep soil slope measurement and reinforcement depth

电力管线沉降情况如图 15 所示,累计最大沉降为-6.6mm,与有限元计算结果近似。开挖深度 15m 内,由于初期泥浆相对密度相对较低,同时管壁外侧侧壁泥浆未能有效建立,管线沉降及水平测斜变化速率较快,随着持续施工,黏性土颗粒的有效回收,泥浆相对密度逐步提高,侧壁泥浆也通过注浆管路持续填充,数值变化速率明显放缓。

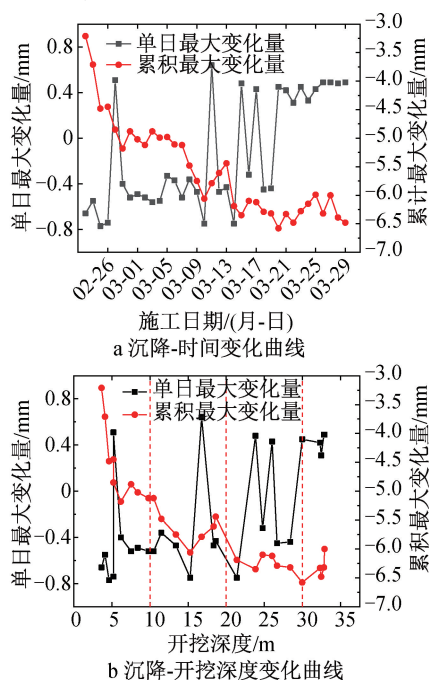


图 15 电力管线沉降

Fig. 15 Settlement of high voltage power pipeline

5 结语

1) 通过增加环梁底部加固长度和设置永久拉森钢板桩的措施,机械法沉井施工技术在软土地层中能够显著减小施工过程中周边管线的位移。在本工程中,电力管线的最大沉降可减小约 35%,表明这些措施对减少施工对周边环境的影响具有显著效果。

2) 现场实测数据表明,电力管线的最大累计沉降为-6.6mm,与数值计算结果近似一致,验证了优化后环境保护方案的可行性。深层土体水平测斜曲线呈现中部大、两端小的规律,且峰值位于环梁底加固与原状土界面之间,加固措施可以有效地约束土体的变形发展。

3) 机械法沉井在浅层开挖施工时,由于超挖量、泥浆密度、侧壁泥浆填充量等施工参数需要调整磨合,沉降及深层水平测斜数值变化速率随开挖深度呈现先快后慢的规律,随着施工的推进逐渐趋于稳定,进一步表明在敏感环境下对浅层加固保护及选取合理加固深度的必要性。

参考文献:

- [1] 严国仙,韩举宇. 沉井下沉纠偏技术[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9):113-116,133.
YAN G X, HAN J Y. Rectification technique for sinking of open caisson[J]. Urban roads bridges & flood control, 2017(9):113-116,133.
- [2] 廖治中. 底部浅埋沉井大角度倾斜的纠偏处理技术[J]. 工程技术研究, 2021, 6(8):52-54.
LIAO Z Z. Rectification technology for large-angle inclination of shallow-buried open caisson at the bottom[J]. Engineering and technological research, 2021, 6(8):52-54.
- [3] 宋庆仁,刘小勇,董伟. 北口大桥锚碇沉井施工技术研究及应用[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(1):145-149.
SONG Q R, LIU X Y, DONG W. Research and application of anchor sinking well construction technology for Beikou bridge[J]. Construction technology, 2025, 54(1):145-149.
- [4] 吴慧明,马泉坤,刘越,等. 软土地区沉井下沉侧壁受力性状试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16):27-32,44.
WU H M, MA Q K, LIU Y, et al. Experimental study on side wall stress behavior of caisson sinking in soft soil area[J]. Construction technology, 2024, 53(16):27-32,44.
- [5] 管政霖,郭万中,刘修成. 常泰长江大桥 5 号墩沉井取土下沉施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(8):66-71,80.
GUAN Z L, GUO W Z, LIU X C. Soil taking and sinking construction technology of open caisson for Changtai Yangtze River bridge No. 5 pier[J]. Construction technology, 2024, 53(8):66-71,80.
- [6] 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.
JIANG H, BAO H L, LIN Y M. Research and application of design and construction technology of assembled shaft: A case study of a sinking shaft underground parking garage in Nanjing, China[J]. Tunnel construction, 2022, 42(3):463-470.
- [7] 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.
ZHANG Z G, XU J, WANG S, et al. Underwater mechanical tunneling technology of an ultra-deep assembled shaft in water-rich stratum: a case study of sinking shaft underground parking garage in Nanjing, China[J]. Tunnel construction, 2022, 42(3):492-500.
- [8] 朱雁飞,毕湘利,潘伟强,等. 富水软土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(6):278-285.
ZHU Y F, BI X L, PAN W Q, et al. Research on the active-control press-in prefabricated shaft construction method applied in the central urban areas with water-rich soft soils[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(6):278-285.
- [9] 刘杰. 竖井掘进机在抽蓄电站建设中的应用[J]. 水电站设计, 2023, 39(4):66-69.

- Wood processing machinery, 2016, 27(4): 28-32.
- [8] 李频. 重组竹的力学性能试验[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2018, 30(2): 53-57.
- LI P. Experimental study on mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (natural science edition), 2018, 30(2): 53-57.
- [9] ZOU Z H, WU J, ZHANG X M. Influence of moisture content on mechanical properties of bamboo scrimber [J]. Journal of materials in civil engineering, 2019, 31(7): 06019004.
- [10] KUMAR A, VLACH T, LAIBLOVA L, et al. Engineered bamboo scrimber; influence of density on the mechanical and water absorption properties [J]. Construction and building materials, 2016, 127: 815-827.
- [11] DU B C, HE Q, YANG D Y, et al. The influence of immersion order of low concentration ammonium polyphosphate on the interphase, mechanical and combustion properties of Moso bamboo scrimber[J]. Industrial crops and products, 2022, 180: 114664.
- [12] 王弘历, 曹学剑, 郑维, 等. 老化和饱和水处理对重组竹抗压性能的影响[J]. 林业工程学报, 2023, 8(3): 64-70.
- WANG H L, CAO X J, ZHENG W, et al. Effects of aging and fiber-saturated treatments on compression behavior of bamboo scrimber[J]. Journal of forestry engineering, 2023, 8(3): 64-70.
- [13] 束必清, 张文娟, 陶玉鹏, 等. 重组竹力学性能及设计强度取值研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 216-222.
- SHU B Q, ZHANG W J, TAO Y P, et al. Mechanical properties and strength design value of bamboo scrimber [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 216-222.
- [14] 苏光荣, 李贤军, 胡嘉裕, 等. 重组竹尺寸稳定性及力学特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 159-168.
- SU G R, LI X J, HU J Y, et al. Dimensional stability and mechanical properties of bamboo scrimber [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 159-168.
- [15] 张秀华, 鄂婧, 李玉顺, 等. 重组竹抗压和抗弯力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 7-12.
- ZHANG X H, E J, LI Y S, et al. Experimental research on compression and flexural mechanical performance of recombinant bamboo [J]. Industrial construction, 2016, 46(1): 7-12.
- [16] HUANG D S, ZHOU A P, BIAN Y L. Experimental and analytical study on the nonlinear bending of parallel strand bamboo beams [J]. Construction and building materials, 2013, 44: 585-592.
- [17] 魏洋, 纪雪微, 端茂军, 等. 重组竹轴向应力-应变关系模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 572-579.
- WEI Y, JI X W, DUAN M J, et al. Model for axial stress-strain relationship of bamboo scrimber [J]. Acta materiae compositae sinica, 2018, 35(3): 572-579.
- [18] GOONEWARDENA J, ASHRAF M, REINER J, et al. Constitutive material model for the compressive behaviour of engineered bamboo [J]. Buildings, 2022, 12(9): 1490.
- [19] 江凤娇, 邵文哲, 盛叶, 等. 重组竹剪切应力-应变关系及强度特征值提取[J]. 竹子学报, 2023, 42(2): 23-30.
- JIANG F J, SHAO W Z, SHENG Y, et al. Shear stress of bamboo scrimber-strain relationship and extraction of strength characteristic values [J]. Journal of bamboo research, 2023, 42(2): 23-30.
- [20] 王骁睿. 竹、木构件受压性能及其极限承载力研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- WANG X R. Study on the compression performance and load carrying capacity of bamboo/wood columns [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [21] 苏相宇. 三种截面形式重组竹柱轴心受力性能试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- SU X Y. Axial behavior of bamboo scrimber columns with three different cross-sections [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [22] 肖忠平, 李晨, 苏相宇. 不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 231-235.
- XIAO Z P, LI C, SU X Y. Experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 231-235.
- [23] 肖纲要, 李霞镇, 钟永. 结构用重组竹的顺纹抗压力学性能试验研究 [J]. 木材加工机械, 2019(3): 4-8.
- XIAO G Y, LI X Z, ZHONG Y. Experimental study on the compressive properties parallel to grain of structural bamboo scrimber [J]. Wood processing machinery, 2019(3): 4-8.
- [24] ZHAO S X, ZHOU Q L, XIONG F, et al. Mechanical properties of bamboo scrimber made from sinocalamus affinis under monotonic axial compression; longitudinal, tangential and radial [J]. Construction and building materials, 2025, 460: 139899.

(上接第 91 页)

- LIU J. Application of shaft-drilling machine in construction of pumped storage power station [J]. Design of hydroelectric power station, 2023, 39(4): 66-69.
- [10] 张振光, 周洁, 徐杰, 等. 悬吊装配式竖井自动化掘进工法地层变形沉降实测及数值模拟分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(5): 1496-1510.
- ZHANG Z G, ZHOU J, XU J, et al. Ground settlement measurement and numerical simulation analysis of vertical shaft machine [J]. Journal of basic science and engineering, 2024, 32(5): 1496-1510.
- [11] 余龙, 徐志兵, 管攀峰, 等. 超深、超大直径装配式竖井在软土地层中的应用 [J]. 隧道与轨道交通, 2024(1): 6-13, 80.
- YU L, XU Z B, GUAN P F, et al. Application of ultra-deep and ultra-large diameter assembled shafts in soft ground [J]. Tunnel and rail transit, 2024(1): 6-13, 80.
- [12] 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(2): 201-207.
- ZHAI Z Y, NIE D Q, ZHANG Y, et al. Application of vertical shaft sinking method in soft soil area [J]. Journal of ground improvement, 2024, 6(2): 201-207.
- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数数值方法及工程验证 [J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
- GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 833-845.