

文章编号: 1007-2993(2026)02-0193-09

基于多源监测的深基坑组合支护结构 时变演化与环境影响分析

汪子奇¹ 蔡记华¹ 徐俊²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 湖北省城市地质工程院, 湖北武汉 430050)

【摘要】 临江深基坑工程面临软土、高承压水以及周边敏感环境等多重挑战, 因此深入研究其变形规律至关重要。目前针对动态施工活动与基坑变形响应之间的内在关联及演化规律的探讨尚不充分。以武汉某临江深基坑工程为例, 通过将施工节点与基坑周边及深层水平位移、支撑轴力及周边沉降等多源监测数据进行时序关联分析, 并结合数值模拟方法加以验证, 揭示了动态施工过程中通过调控支护结构等效刚度直接影响基坑变形大小与形态的内在机理。研究成果可为临江深基坑工程的支护设计优化与施工风险动态预警提供技术依据。

【关键词】 深基坑; 多源监测; 组合支护结构; 变形控制; 时变演化; 环境影响

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0214

Analysis of time-varying evolution and environmental impact on combined deep excavation support structures based on multi-source monitoring

WANG Ziqi¹ CAI Jihua¹ XU Jun²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Hubei Institute of Urban Geological Engineering, Wuhan 430050, Hubei, China)

【Abstract】 Deep foundation pit projects near rivers are confronted with multiple challenges such as soft soil, high confined water, and sensitive environments. Therefore, it is of great significance to study their deformation laws. Currently, the exploration of the internal relationship and evolutionary laws between dynamic construction activities and foundation pit deformation responses is still insufficient. Taking a deep foundation pit project near the Yangtze River in Wuhan as an example, this study conducts a time-varying correlation analysis between construction nodes and multi-source monitoring data, including the horizontal displacements around and at depth of the foundation pit, the axial forces of supports, and the surrounding settlements. The analysis results are verified by numerical simulation methods. It is revealed that the dynamic construction process directly affects the magnitude and shape of foundation pit deformation by adjusting the equivalent stiffness of the supporting structure. The research results can provide a technical basis for the optimization of the supporting design of deep foundation pits near rivers and the dynamic early warning of construction risks.

【Key words】 deep foundation pit; multi-source monitoring; composite support structure; deformation control; time-varying evolution; environmental impact

0 引言

随着我国城市化进程加速推进, 大规模地下空间开发利用产生了大量的深基坑工程。城市核心区的深基坑工程更呈现出“超深”^[1]、“近接”^[2]、“敏感”^[3]的显著特征。基坑开挖和降水过程不可避免地会打破原有土体的应力场平衡, 使基坑周边地表及

土体产生变形, 并对邻近的既有设施产生不利影响^[4]。施工监测作为深基坑工程安全控制与信息化施工的核心技术手段, 贯穿于工程实施全过程。基于监测数据的风险预警及基坑变形演化规律的研究已成为保障工程安全、实现基坑精准管控的关键课题。许多学者进行了相关研究, 尚思宏等^[5]将自动化监测技术

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2023AFD214); 湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA035)

作者简介: 汪子奇, 男, 1992年生, 博士研究生, 从事基坑工程、地下工程等方面的研究工作。E-mail: geoziqiwan@cug.edu.cn

通信作者: 蔡记华, 男, 1978年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事基础工程、钻探工程等领域的教学与研究。E-mail: caijh@cug.edu.cn

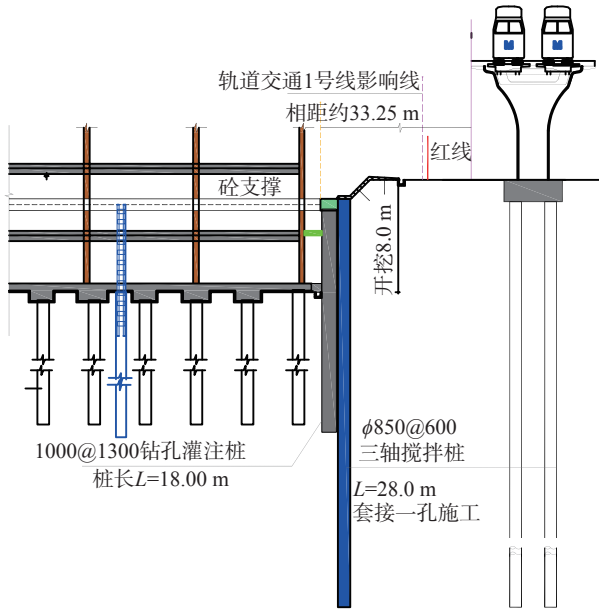


图3 围护桩+水平撑支护结构剖面图
Fig. 3 Profile of retaining pile + horizontal brace support structure

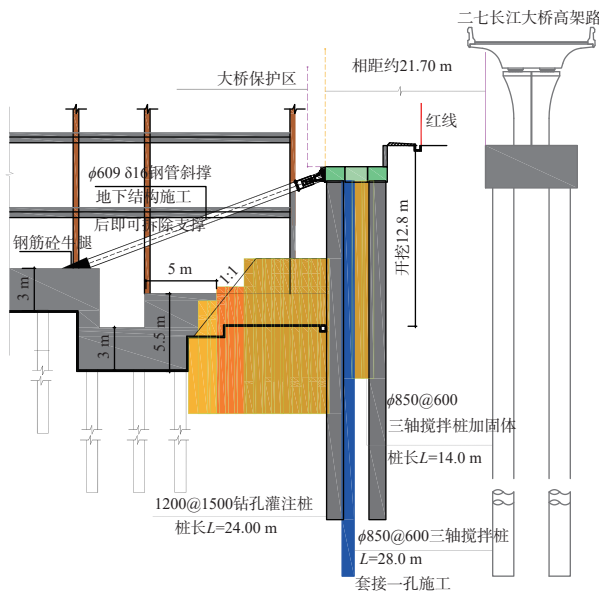


图4 围护桩+斜撑支护结构剖面图
Fig. 4 Profile of retaining pile + inclined brace support structure

2.2.3 基坑东侧近中山大道地下综合管廊

基坑东侧周边环境相对宽松。设计采用型钢水泥土搅拌墙(深28 m)密插 H700×300×13×24 mm 型钢(长21.0 m)。桩身设三排 φ500 mm 大直径高压旋喷锚索, 竖向间距 2.5 m, 因锚索出用地红线, 芯材使用玻纤筋。支护结构剖面见图5。

2.2.4 基坑南侧近武汉市普仁江岸医院

基坑外侧为武汉市普仁江岸医院。设计采用 φ1000@1200 mm 双排桩, 桩长 20.0 m, 前后桩一对

一设置, 排距约 3.5 m。桩间土加固深度 12 m。支护结构剖面如图6所示。

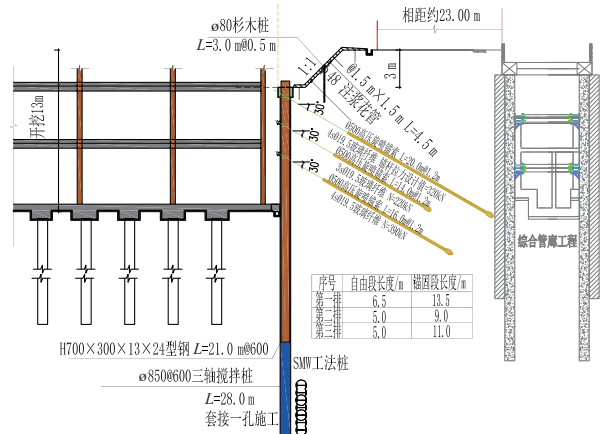


图5 型钢水泥土搅拌墙+锚索支护结构剖面图
Fig. 5 Profile of steel-reinforced cement-soil mixing wall + anchor cable support structure

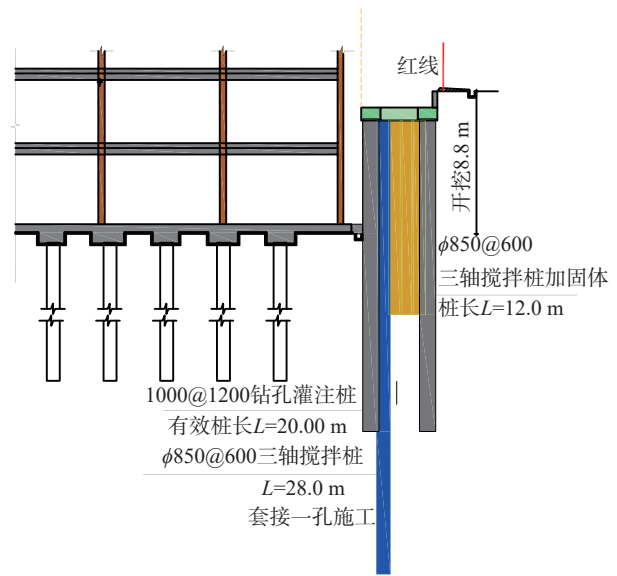


图6 双排桩支护结构剖面图
Fig. 6 Profile of double-row pile support structure

3 施工过程及监测布置

本项目地下室施工跨长江水文年, 为满足防汛要求避免汛期开挖, 整体土方开挖分为1—4区。一阶段完成1区、2区开挖, 二阶段完成3区、4区开挖, 其中2023-01-05至2023-02-10春节前后土方作业强度低。基坑开挖分区及监测点布置如图7所示, 施工节点-监测响应如图8所示。

4 数值仿真计算

4.1 模型构建

本研究基于 Midas 有限元平台, 模型计算域构建, 沿基坑长轴方向扩展3倍基坑开挖深度, 深度方向延伸至立柱桩桩长的2倍, 最终形成420 m×

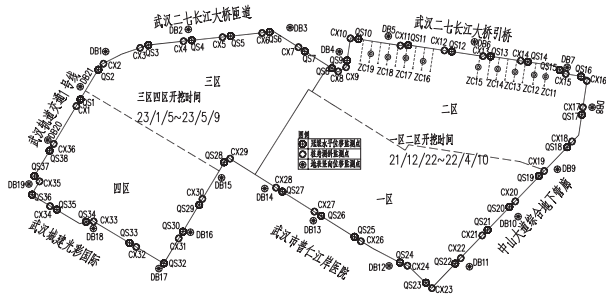


图7 基坑开挖分区及监测点布置图
Fig. 7 Profile of foundation pit excavation zoning and monitoring point layout

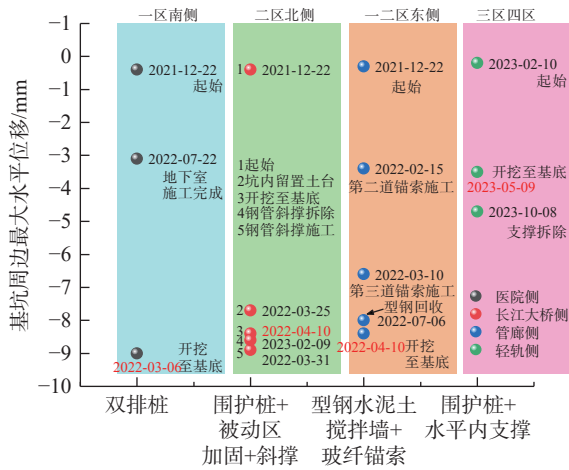


图8 施工节点-监测响应图
Fig. 8 Construction node-monitoring response diagram

250 m×52 m 的拟无限域模型,如图9所示。

土体采用修正莫尔-库仑(MMC)本构模型,桩间及被动区加固土未加固状态下采用 MMC 本构,加固后采用弹性本构,均采用实体单元模拟。地层参数见表1。

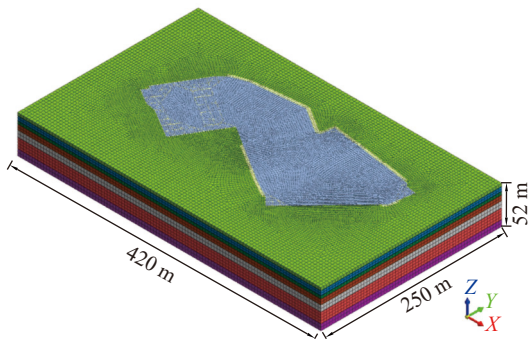


图9 计算模型图
Fig. 9 Computational model diagram

4.2 支护结构模拟

(1) 支护桩

支护桩采用板单元模拟,按式(1)、式(2)等效为地下连续墙,参数见表2。

表1 地层物理力学参数

Tab. 1 Table of physico-mechanical parameters of strata

| 地层编号及名称 | 重度 (kN·m ⁻³) | 压缩模量 /MPa | 黏聚力 /kPa | 内摩擦 角/(°) |
|-----------------|-----------------------------|--------------|-------------|--------------|
| (1)杂填土 | 20.0 | 3.0 | 8 | 18 |
| (2)粉质黏土夹粉土 | 18.3 | 4.0 | 15 | 9 |
| (3)粉土、粉砂、粉质黏土互层 | 18.0 | 7.0 | 10 | 16 |
| (4-1)粉细砂 | 19.1 | 19.0 | 0 | 33 |
| (4-2)粉细砂 | 19.3 | 24.0 | 0 | 35 |
| (4-3)粉细砂 | 19.4 | 29.0 | 0 | 36 |
| (5)泥岩 | 25.0 | 44.0 | 38 | 16 |

表2 支护桩等刚度代换计算表

Tab. 2 Calculation table for equivalent stiffness substitution of supporting piles

| 序号 | 围护桩/mm | 等效地连墙厚度/m |
|----|------------|-----------|
| 1 | φ1000@1300 | 0.8 |
| 2 | φ1200@1500 | 1.0 |
| 3 | φ1000@1200 | 0.8 |
| 4 | 型钢水泥土搅拌墙 | 0.82 |

混凝土桩等效厚度计算公式:

$$\frac{(D+d)h^3}{12} = \frac{\pi d^4}{64} \tag{1}$$

式中: D 为支护桩间的净距离; d 为支护桩直径; h 为等效厚度。

型钢水泥土搅拌墙等效厚度计算公式:

$$h' = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot E_s \cdot I_s}{E_c \cdot s}} \tag{2}$$

式中: h' 为型钢水泥土搅拌墙等效厚度; E_s 为型钢弹性模量; I_s 为单根型钢的截面惯性矩; E_c 为混凝土弹性模量; s 为型钢中心距。

(2) 冠梁、支撑梁、立柱桩及钢支撑

对于梁、柱等构件可以通过 1D 梁单元来模拟,考虑到节点耦合问题,采用析取线上网格的方式获得一维梁单元。结构有限元参数见表3。

表3 结构有限元参数

Tab. 3 Structural finite element parameters

| 围护类型 | 截面尺寸 | 弹性模量/MPa | 泊松比 |
|------|---------------|----------|-----|
| 冠梁 | 1.2 m×0.8 m | 30000 | 0.2 |
| 支撑梁 | 0.8 m×0.8 m | 30000 | 0.2 |
| 立柱桩 | φ800 mm | 30000 | 0.2 |
| 钢格构 | 440×440×10 mm | 210000 | 0.2 |
| 钢支撑 | φ609×16 mm | 210000 | 0.2 |

(3) 锚索

锚索按照分段设计方案, 采用植入式桁架单元模拟, 并施加预应力。锚索弹性模量取 210 GPa。

基坑开挖后的整体支护结构数值模拟效果如图 10 所示。基坑开挖按 3 m 分层模拟。

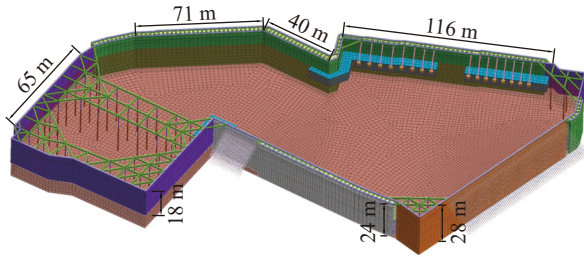


图 10 有限元支护结构图

Fig. 10 Finite element support structure diagram

4.3 数值分析结果与监测结果对比分析

本文选取基坑开挖至基底工况下周边位移计算结果(见图 11)与实测结果(见图 8)进行对比分析。数据表明, 计算值与实测值间具有良好的 consistency, 部分区段位移计算值略大于实测值, 是因为计算模型土体设置为水平地层, 忽略了土体参数的空间变异性。故监测数据可作为基坑受力变形分析的依据。

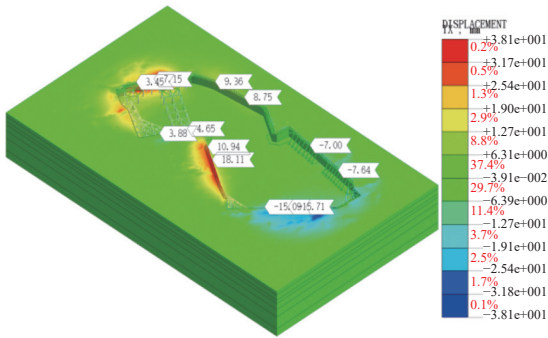


图 11 基坑开挖至基底周边变形云图

Fig. 11 Deformation contour map of surrounding area after foundation pit excavation to the bottom

5 基坑变形监测分析

5.1 围护桩+水平支撑监测分析

5.1.1 压顶梁水平位移分析

图 12 表明桩撑支护体系可有效控制梁顶位移。开挖期间, 压顶梁水平位移速率约 0.05 mm/d, 开挖至设计标高时累计位移值-3.8 mm。地下室施工期间, 位移值呈波动性收敛, 均值约-3.6 mm。支撑拆除引起应力重分布^[12], 桩顶位移增大至-4.8 mm。

5.1.2 深层水平位移分析

图 13 表明初始开挖阶段, 围护体系深层水平累计位移较小, 位移场呈刚性平移。随挖深增大, 位

移呈非线性增长, 单日增量约 0.037 mm。开挖至基底时, 深层水平最大位移出现在开挖面附近, 位移值约 2.4 mm。支撑拆除后, 位移增长 63.6%, 位移值 3.6 mm。回筑阶段位移回弹 22%, 位移值 2.8 mm。监测数据说明内支撑体系主要控制浅层土体变形, 围护桩嵌固段稳定性决定支护体系整体安全。

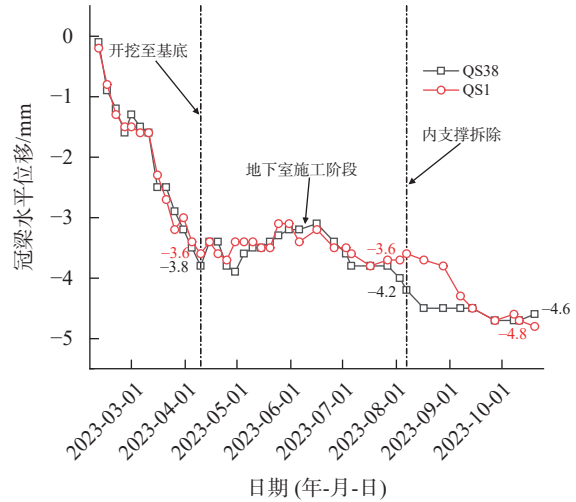


图 12 围护桩+水平撑压顶梁水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of capping beam in retaining pile + horizontal brace support system

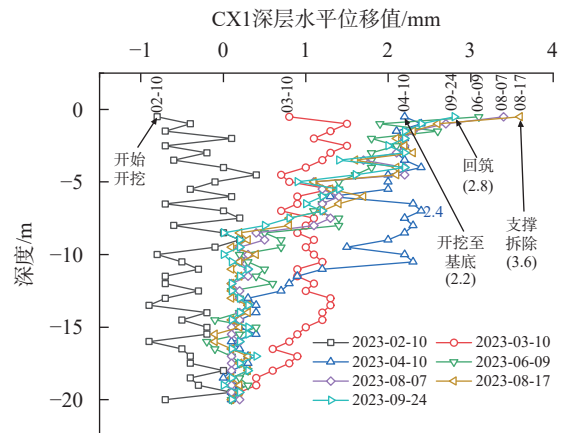


图 13 围护桩+水平撑深层水平位移

Fig. 13 Deep horizontal displacement of retaining pile + horizontal brace support system

5.2 围护桩+被动区加固+斜撑监测分析

5.2.1 压顶梁水平位移分析

图 14 表明压顶梁水平位移呈阶段性变化: ①基坑大面积开挖阶段, 水平位移急剧上升至峰值-9.5 mm; ②斜撑体系形成后, 后续开挖过程中位移小幅回弹, 稳定值-8.5 mm; ③地下室结构施作阶段, 位移随结构刚度形成渐进式减小, 稳定值-6.1 mm; ④斜撑拆除引发位移突增, 瞬时增幅达 41%, 最终变形值-8.6 mm。监测位移如图 14 所示。根据结构刚

度的定义, $K = F/\delta$ 。拆撑前后支护结构刚度比值计算为: $\frac{K_2}{K_1} = \frac{F}{\delta_2} / \frac{F}{\delta_1} = \frac{6.1}{8.6} = 0.71$, 斜撑拆除后, 支护体系的整体刚度降至原刚度的 71%。

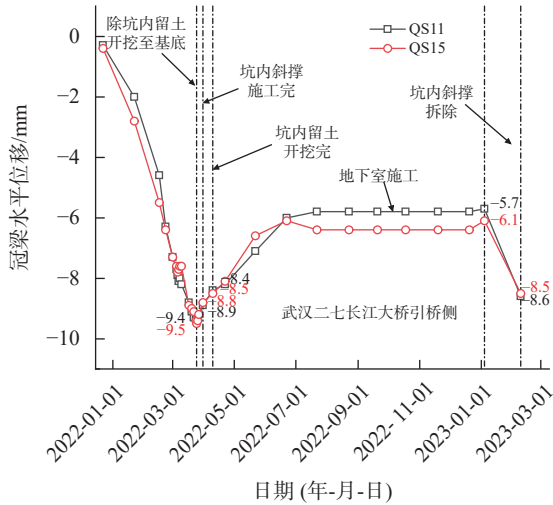


图 14 围护桩+斜撑压顶梁水平位移
Fig. 14 Horizontal displacement of capping beam in retaining pile + inclined brace support system

5.2.2 深层水平位移分析

图 15 表明基坑分层开挖阶段围护桩上部位移随挖深逐渐增大, 开挖至基底时达峰值 6.1 mm。钢支撑设置后桩身位移显著回弹, 6 d 内位移减小 11.5% 至 5.4 mm, 体现了斜撑对桩身变形的主动控制机制。留土开挖阶段, 位移因支撑刚度效应收敛至 4.6 mm, 但随土体应力重分布, 稳定值约 4.9 mm。

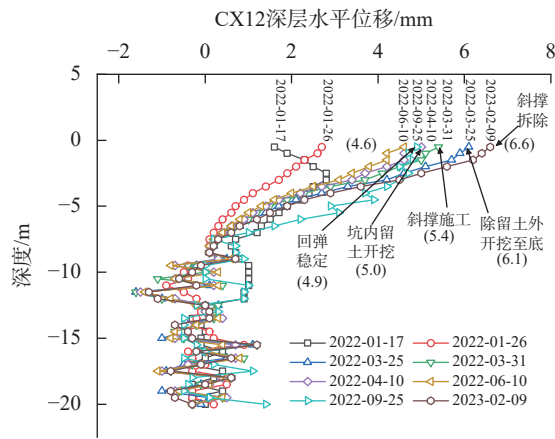


图 15 围护桩+斜撑深层水平位移
Fig. 15 Deep horizontal displacement of retaining pile + inclined brace support system

斜撑拆除后桩身上部位移突增, 位移增长 34.7% 至 6.6 mm。桩身嵌固段位移(-10.5 ~ -20 m)在整个施工过程中始终稳定在-1 ~ 1.2 mm。本案例斜撑拆除刚度下降约 71%, 理论位移增量应为 29%, 与实测位移增量 34.7% 相对应。

5.2.3 坑内斜撑钢管轴力分析

钢支撑架设初期, 轴力呈线性增长, 初始轴力约 275 kN, 增长速率约 4.8 kN/d。坑中坑开挖引发应力重分布, 轴力 48 h 内陡增 165%, 自 406 kN 增长至 1079 kN。开挖完成后轴力波动平缓, 最终稳定值 1195 kN, 增长 10.8%。监测发现 ZC18 支撑轴力异常, 峰值仅 883 kN, 为同工况均值的 75%。

超声波检测显示, 其对接焊缝存在未熔合缺陷, 导致支撑截面刚度降低, 局部轴力损失近 25%。监测轴力如图 16 所示。

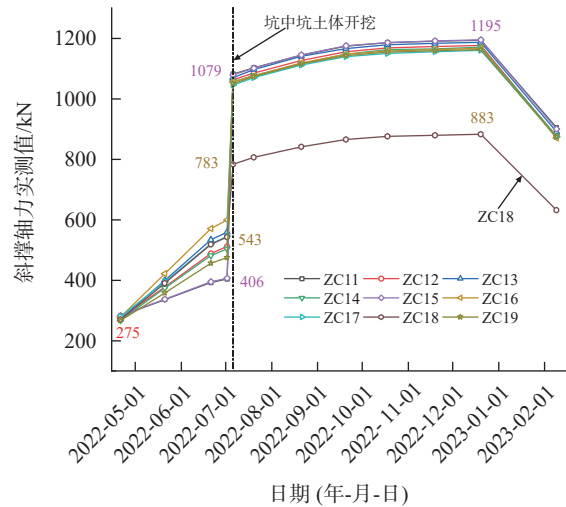


图 16 斜撑轴力监测
Fig. 16 Axial force monitoring of inclined braces

5.3 型钢水泥土搅拌墙+大直径高压旋喷玻纤锚索监测分析

5.3.1 压顶梁水平位移分析

图 17 表明压顶梁位移与施工节点关系密切:

- 1) 开挖至第三排锚索作业面时, 位移量 -6.6 mm。
- 2) 锚索张拉后开挖至设计标高时位移增大 27.3%, 位移值 -8.4 mm。
- 3) 地下室楼板换撑后, 位移减小 26.2% 至 -6.1 mm。
- 4) 型钢拔除导致支护体系抗弯能力显著降低, 引发位移突变, 单日增幅约 32.8%, 位移值 -8.1 mm。

5.3.2 深层水平位移分析

随开挖深度增加, 深层水平位移呈“上凸”形态, 开挖至第三排锚索作业标高时最大值约 6.0 mm。锚索施工锁定后对桩身变形产生显著约束作用, 开挖至基底标高时, 桩身位移仅 4.4 mm。地下室结构施作期, 位移进一步减小至 2.2 mm。工字钢拔出后桩身

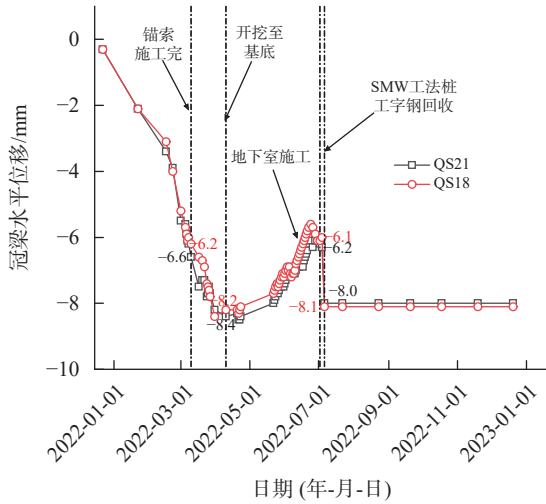


图 17 型钢水泥土搅拌墙+锚索压顶梁水平位移

Fig. 17 Horizontal displacement of capping beam in steel-reinforced cement-soil mixing wall + anchor cable support system

位移回弹至 5.8 mm, 位移量约为初始最大变形量的 96.7%。型钢水泥土搅拌墙桩身嵌固段(-10 ~ -20 m)变形量约 2.0 mm, 较钻孔灌注桩偏大, 原因是型钢水泥土搅拌墙截面抗弯刚度低于钻孔灌注桩, 监测位移如图 18 所示。研究表明型钢水泥土搅拌墙支护体系变形具有显著可逆特性, 锚索与换撑系统可有效减小桩身位移值, 但型钢回收导致刚度降低, 桩身变形增长迅速, 在施工中应重视^[13]。

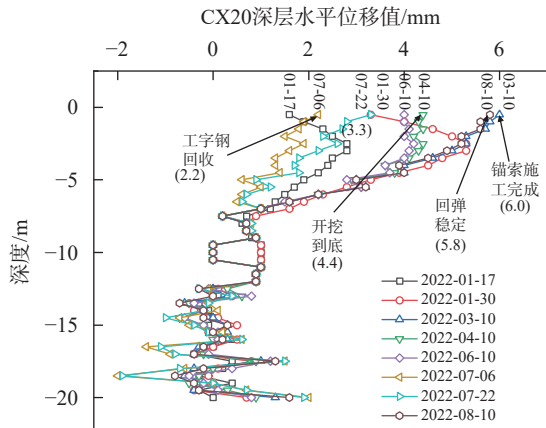


图 18 型钢水泥土搅拌墙+锚索深层水平位移

Fig. 18 Deep horizontal displacement of steel-reinforced cement-soil mixing wall + anchor cable support system

5.4 双排桩监测分析

5.4.1 压顶梁水平位移分析

如图 19 所示, 压顶梁水平位移最大值 9.3 mm 出现在基坑开挖至基底时, 位移速率约 0.09 mm/d, 符合深基坑弹性变形理论。地下室施作后, 位移值回弹 69.8% 至 -2.8 mm, 显著高于常规单排桩支护体系。监测位移见图 19。

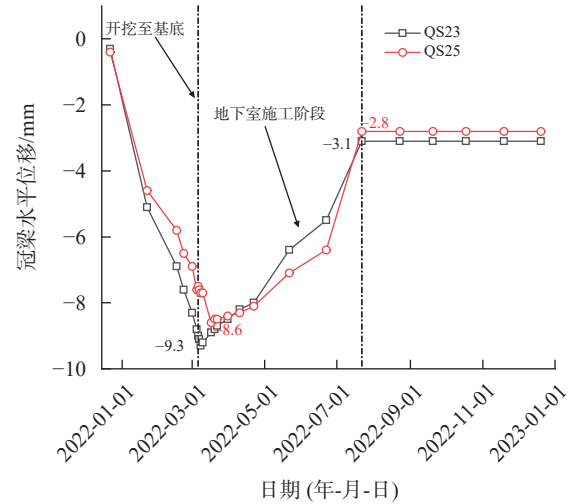


图 19 双排桩压顶梁水平位移

Fig. 19 Horizontal displacement of capping beam in double-row pile support system

机理分析: 地下室施工后双排桩等效刚度提升, 根据结构刚度的定义 $K = F/\delta$, 刚度与位移成反比。假设在位移发生过程中, 坑外土压力基本保持不变。等效刚度计算为:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{F}{\delta_2} / \frac{F}{\delta_1} = \frac{9.3}{2.8} = 3.32$$

地下室施工并发挥作用后, 支护体系整体刚度提升了约 232%。

5.4.2 深层水平位移分析

图 20 表明深层水平位移随开挖深度增大呈“上大下小”的“悬臂式”分布。开挖至基底时, 位移最大达 6.4 mm。地下结构施作后, 桩身位移由“悬臂型”向“桩撑型”演化, 上部位移减小至 2.0 mm, 桩身最大位移点向开挖面移动, 下降至桩顶下约 4.5 m。嵌固段(-9 ~ -20 m)位移稳定在 -0.8 ~ 1.5 mm。研究表明双排桩支护体系可同步控制浅层位移与嵌固段

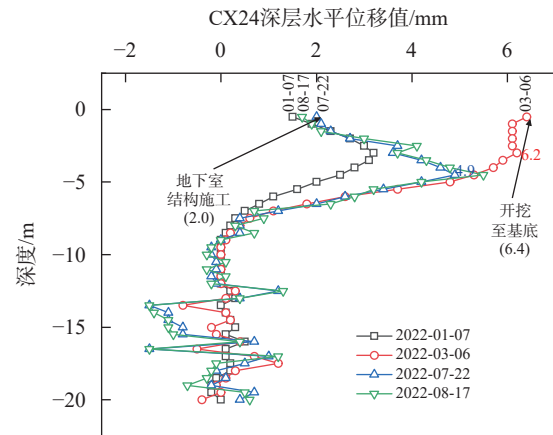


图 20 双排桩深层水平位移

Fig. 20 Deep horizontal displacement of double-row pile support system

稳定,位移场变化与结构刚度相关^[14]。

5.5 基坑开挖降水周边地表沉降分析

本项目基坑开挖降水分为3阶段:(1)首阶段开挖降水期(2021-12-22至2022-04-10),受连续降水影响,周边地表沉降速率达0.12 mm/d,累计沉降量-7.7 mm。(2)结构施作调控期(2022-04-11至2023-01-04),停止降水后产生显著回弹效应,210 d内沉降量最大减少50%至-3.6 mm,回弹速率0.017 mm/d。(3)次阶段开挖激活期(2023-01-05至2023-05-09)局部降水开挖引发二次沉降,累计最大沉降量-6.5 mm,为首阶段的84.4%。分阶段施工通过“降水开挖-结构补偿”动态平衡机制,可有效控制沉降变形量。

基于弹性地基梁理论,“结构补偿沉降”机制可解释为基坑开挖降水与结构施作过程中,地基土体应力状态动态调整所引发的回弹与沉降现象。降水开挖导致土体卸荷,初始应力释放,地基土发生弹性回弹并引起周边地表沉降;随后结构施作提供刚性支撑,通过地基反力对土体施加补偿性荷载,部分抵消卸荷效应,从而使沉降量减小。

二次降水构成了二次卸荷。由于前期结构施作已改变了系统的边界条件和刚度分布,土体应力历史及模量均不同于初始状态。此次卸荷作用下,土体变形受到既有结构的约束,因此其沉降发展幅度(-6.5 mm)小于首次沉降变形量(-7.7 mm),约为初始变形的85%。监测位移见图21。

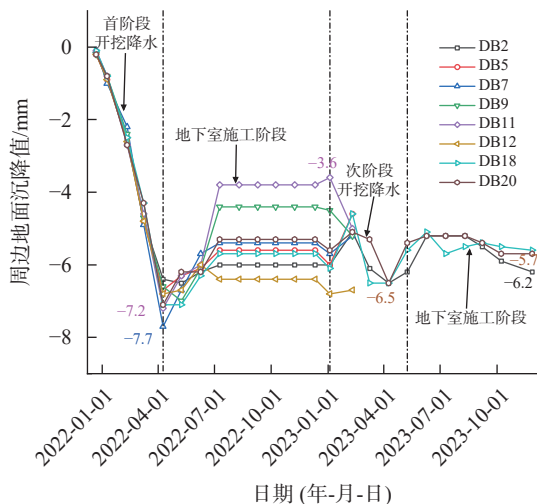


图21 基坑周边地表沉降位移

Fig. 21 Ground surface settlement and displacement around the foundation pit

6 结论及建议

(1)武汉临江深基坑工程具有地层物理力学性质差、地下水条件复杂、周边环境敏感及工期紧张等特点。针对性采用单排桩、内支撑、双排桩、坑内斜撑、

预应力锚索等多种组合支护结构。监测数据分析表明,支护方案有效保证了基坑支护体系和周边建筑物、道路、管线等的安全。可为同类地层条件下深基坑支护结构选型提供参考。

(2)围护桩+水平/斜撑体系相比其他支护体系能更有效控制基坑位移,其中水平支撑体系位移控制能力及围护桩嵌固稳定性最优。

(3)围护结构的等效刚度是控制基坑变形的决定性因素,其数值变化与变形响应之间存在显著的相关性。斜撑支护体系中,斜撑拆除引起系统刚度下降约30%,围护结构侧向位移增加约34.7%。双排桩支护体系下,结构完工后围护结构等效刚度提高232%,基坑变形回弹70%。

(4)基坑采用分阶段施工时,“降水开挖-结构补偿”动态平衡机制可有效控制周边地表沉降。

(5)本研究通过融合多源监测数据与施工关键点信息,系统分析基坑在施工过程中的位移演变规律,为工程变形安全控制提供可靠依据。该方法具备较强的通用性,可推广至类似地质与工程条件下的基坑施工监测与风险评估中。

参考文献

- [1] 徐中华,王卫东,宗露丹,等.软土地层45 m级超深基坑工程实测变形性状分析[J].建筑结构,2024,54(10): 118-127. (XU Z H, WANG W D, ZONG L D, et al. Analysis on measured deformation performance of 45 m class ultra-deep foundation pit project in soft soil layer[J]. Building Structure, 2024, 54(10): 118-127. (in Chinese))
- [2] 刘鑫菊,郑刚,周海祚,等.临近基坑开挖引起的隧道变形预测分析[J].重庆大学学报,2022,45(7): 37-44. (LIU X J, ZHENG G, ZHOU H Z, et al. Prediction of the tunnel displacement induced by adjacent excavations[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(7): 37-44. (in Chinese))
- [3] 向朱锋,徐金明.悬挂式止水帷幕条件下深基坑开挖变形特性研究[J].水文地质工程地质,2023,50(5): 96-106. (XIANG Z F, XU J M. Deformation characteristics of deep foundation pit with suspended waterproof curtain during excavation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 96-106. (in Chinese))
- [4] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1): 1-36. (ZHENG G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36. (in Chinese))

- Chinese))
- [5] 尚思宏, 彭伟珂. 临江基坑自动化监测方法研究 [J]. 人民长江, 2025, 56(S1): 298-302. (SHANG S H, PENG W K. Study on automatic monitoring method for riverfront foundation pits[J]. Yangtze River, 2025, 56(S1): 298-302. (in Chinese))
- [6] 祝建勋, 杨春阳, 罗正高, 等. 北京地铁地连墙基坑变形规律研究 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36(3): 35-42. (ZHU J X, YANG C Y, LUO Z G, et al. Deformation law of foundation pit connecting Beijing subway and ground[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(3): 35-42. (in Chinese))
- [7] 缪丹, 聂竹林, 何楚韶. 基于数理统计分析法的基坑监测预警值研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55(24): 136-143. (MIAO D, NIE Z L, HE C S. Research on early warning value for foundation pit monitoring based on mathematical statistical analysis method[J]. Building Structure, 2025, 55(24): 136-143. (in Chinese))
- [8] 张浩, 吕培印, 张晓阳. 多信息融合的地铁基坑安全状态评价方法 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36(3): 16-21. (ZHANG H, LYU P Y, ZHANG X Y. Evaluation method for safety status of subway foundation pit based on multi-information fusion[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(3): 16-21. (in Chinese))
- [9] 张世民, 冯婷, 李哲辉, 等. 下穿地铁深基坑开挖影响的监测分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2016, 49(05): 674-682. (ZHANG S M, FENG T, LI Z H, et al. Analysis of monitoring of deep foundation pit above subway tunnel[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(05): 674-682. (in Chinese))
- [10] 范士凯, 杨育文. 长江一级阶地基坑地下水控制方法和实践 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 63-68. (FAN S K, YANG Y W. Groundwater control and practice of deep foundation pits in 1st terrace along Yangtze River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 63-68. (in Chinese))
- [11] 袁广坤. 武汉二七商务区地下水动态模拟及最高水位预测 [J]. 重庆大学学报, 2020, 43(9): 109-117. (YUAN G K. Groundwater dynamic simulation and maximum water level prediction of Erqi business district in Wuhan[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(9): 109-117. (in Chinese))
- [12] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985-994.
- [13] 崔文平. SMW 工法+锚索联合支护结构作用机理研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2018. (CUI W P. Study on the mechanism of the combined support structure of SMW and anchorage cable[D]. Hengyang: University of South China, 2018. (in Chinese))
- [14] 杜鹏超, 彭勋, 马雷, 等. 不同参数对于深基坑双排桩支护结构的变形影响研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2038-2043. (DU P C, PENG X, MA L, et al. Research on spatial effect of double-row piles supporting structure for deep foundation pit[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 2038-2043. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-16