

城市中心地带狭小空间深基坑开挖支护技术研究

丘道展

(中铁七局集团西安铁路工程有限公司,陕西 西安 710032)

[摘要] 针对狭小空间深基坑工程面临的周边环境复杂、施工空间受限及变形控制难题,以深圳市宝岗小学改扩建工程为背景,提出分区分段组合支护方案。通过软土区采用土钉墙加坡率开挖,基坑周边采用排桩结合三轴搅拌桩形成止水帷幕,并设置钻孔咬合桩提高支护刚度,实现基坑安全施工。施工过程中,采用限速注浆技术控制三轴搅拌桩施工速率,通过套管钻进并辅以垂直度监测确保钻孔咬合桩成桩质量。同时,布设监测系统实时采集支护结构和周边建筑物变形数据。结果表明,该组合支护体系可有效隔离施工扰动,结合实时监测反馈机制,可兼顾安全性与经济性。

[关键词] 深基坑;支护;三轴搅拌桩;止水帷幕;钻孔咬合桩;变形

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0040-05

Research on Excavation and Support Technology of Deep Foundation Excavation in Narrow Space in Urban Center

QIU Daozhan

(Xi'an Railway Bridge Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract: In response to the complex surrounding environment, limited construction space, and deformation control challenges faced by narrow space deep foundation excavation project, a zoning and segmented combined support scheme is proposed based on the Baogang Primary School renovation and expansion project in Shenzhen. Excavation is carried out in the soft soil area using soil nail walls and slope ratios. A waterproof curtain is formed around the foundation excavation by combining row piles with three-axis mixing piles, and drilled interlocking piles are installed to improve the support stiffness, achieving foundation excavation construction safety. During the construction process, the speed limiting grouting technology is used to control the construction rate of three-axis mixing pile, and quality of drilled interlocking pile is ensured through casing drilling and verticality monitoring. At the same time, a monitoring system is deployed to collect real-time deformation data of support structures and surrounding buildings. The research results indicate that the combined support system can effectively isolate construction disturbances, combined with real-time monitoring feedback mechanisms, while balancing safety and economy.

Keywords: deep foundation excavation; supports; triple-axis mixing pile; waterproof curtain; interlocked bored pile; deformation

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进,土地资源日益紧张,城市建设逐渐向高密度、集约化方向发展^[1-2]。在此背景下,深基坑工程在狭小空间场地条件下的施工需求显著增加,尤其是在城市中心区、老旧城区改造及学校、医院等公共建筑项目中。

然而,此类工程往往面临周边环境复杂、施工空间受限、地下管线交错、既有建筑密集等诸多制约因素,使基坑开挖与支护施工难度大幅增加^[3]。若施工控制不当,易引发支护结构变形、周边建筑物沉降,甚至基坑坍塌等工程事故,严重影响施工安全、进度及成本。众多学者对深基坑设计与变形监控进行了相关研究。宫鹤等^[4]在基坑开挖过程中对基坑进行监测和分析,提出边坡采用微型桩加洞室

内支撑加固,基坑采用桩锚结构支护,保证了基坑边坡的稳定性;范龙尧等^[5]针对某狭窄场地深基坑工程特点,在国内首次采用人工挖孔桩加预应力锚索、土钉墙加喷锚支护、型钢内支撑支护的复合型支护体系,有效降低了工程造价;江焕钊等^[6]基于淮安黄泛平原区某超大深基坑工程,对基坑支护结构进行选型设计,采用地下连续墙和钻孔灌注桩作为围护结构,满足控制周边环境和周期的要求;崔向阳等^[7]基于分级开挖和分级支护理念研发了多级深基坑支护结构体系,解决了常规基坑支护方案存在的问题;Li^[8]对某超大型深基坑施工过程中顶梁水平位移、地表沉降、锚索轴力、地下水位等进行动态监测,总结了深基坑开挖变形规律及开挖对周边建筑物的影响。本文以深圳市坂田街道宝岗小学改扩建工程为背景,围绕其工程特点开展狭小空间深基坑开挖与支护技术研究,结合现场监测数据对支护体系的安全性与适用性进行分析验证。

1 工程概况

深圳市坂田街道宝岗小学改扩建工程位于宝岗小学校内,如图1所示,施工场地总面积约6 100m²,支护体系外轮廓面积5 454.75m²,基坑底面积5 100.5m²,周边环境复杂,场地狭小。基坑呈南北走向,南北直线距离145m,东西宽介于37~44m。基坑狭长,标高复杂,各种桩类型多,施工难度较大。



图1 拟建项目

Fig. 1 Proposed project

2 施工难点

1)作业空间小:城市中心地带施工场地受限,设备布置和作业空间高度紧张;大型吊装机械受吊运半径限制难以开展作业,土方车辆进出困难,材料转运效率低,施工组织复杂;基坑内部支护桩与水平支撑间距较小,进一步压缩了挖掘设备的操作空间,长臂挖掘机难以正常施展,降低了作业精度,也增加了与支护结构碰撞的风险;有限的作业面难以实现多设备协同配合作业,传统分层分段开挖方式难以实施,严重影响施工进度。

2)施工监测难度大:狭窄施工场地严重影响了

关键区域监测点的合理布置,尤其是在基坑深处和局部狭窄区域,传统监测手段难以有效获取数据。同时,部分监测设备需在极为紧凑的空间中安装,易受施工过程中振动、位移等动态影响而失效,如光纤传感器和GPS定位系统常因环境变动产生数据偏差或断联。

3)难点间的相互作用:场地狭窄与支护结构之间形成相互制约关系,支护桩与水平支撑布置过于紧密,不仅压缩了机械作业空间,还影响了支护结构本身的稳定性,进而形成施工效率下降与结构风险增加的恶性循环。同时,施工效率的降低也限制了监测设备的及时维护与调整,使得监测系统更易失效,造成数据获取困难,进一步削弱了施工过程中对风险的动态感知与控制能力。

3 施工方案

根据SJG 05—2020《基坑支护技术标准》,结合场地各剖面地质条件、基坑深度、周边环境,本工程基坑安全等级总体按一级控制(结构重要性系数 $\gamma_0=1.1$),局部环境要求较低区域按二级控制($\gamma_0=1.0$)。

3.1 支护方案

本工程划分为多个剖面段,分别采用不同的支护结构形式。

1)分级放坡加土钉墙支护,适用于地形起伏平缓、开挖深度较浅、周边环境干扰较小的区域。支护边坡坡面按1:1.2分级放坡,坡面设置HRB400级钢筋土钉,直径16mm,长1 200mm,间距1 500mm。坡面铺设 $\phi 6@200\times200$ 双向钢筋网片,网片表面喷射C20混凝土封闭,采用P·O 42.5水泥,形成整体支护面。

2)旋挖灌注桩加三轴搅拌桩止水帷幕,适用于基坑开挖深度大、邻近重要建筑物或管线、地下水丰富需严格止水的区域。支护桩采用旋挖灌注桩,桩径1 000mm,桩心距1 500mm,桩顶设置1 000mm×1 000mm冠梁。在支护桩外侧连续设置 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩,搭接250mm,形成封闭止水帷幕。

3)钻孔咬合桩支护,适用于地质条件较复杂、地下水丰富、施工空间受限、对止水要求高的区域。钻孔咬合桩间距为1 500mm,相邻咬合宽度250mm。A型桩为C20素混凝土桩,直径1 000mm。B型桩为C30钢筋混凝土桩,直径1 000mm,主筋采用HRB400级钢筋,箍筋采用HPB300级钢筋。桩顶设置1 000mm×1 000mm冠梁。

3.2 施工工艺

3.2.1 三轴搅拌桩施工

采用 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩,设计搭接250mm,

桩长 7.9~11.5m, 共 151 幅。采用 P·O 42.5 水泥, 水灰比 0.8, 使用自动拌浆系统, 确保浆液均匀。在搅拌桩浇筑过程中, 钻头下沉速度 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$ 、提升速度 $\leq 1\text{m}/\text{min}$, 下沉与提升过程均需连续、均匀喷浆, 到达设计深度后, 应持续搅拌注浆一定时间, 确保桩端质量。

3.2.2 旋挖灌注桩施工

采用 $\phi 1\ 000 @ 1\ 500$ 旋挖灌注桩, 实桩桩长 11.5~12.6m, 空桩桩长 2.40~2.65m, 共计 134 根。安排 1 台履带式旋挖机施工, 1 台挖掘机负责旋挖机出土的搬移, 1 台 25t 汽车式起重机负责支护桩钢筋笼的吊装。施工时先埋设钢护筒(埋设深度 $\geq 3.0\text{m}$), 钢筋笼采用均匀配筋, 分 2 节制作, 孔口连接, 桩底沉渣厚度控制在 100mm 内。最后吊放格构柱与钢筋笼进行连接, 安装到位后下放导管浇筑水下混凝土。

3.2.3 钻孔咬合桩施工

钻孔咬合桩桩径 1 000mm, 桩间距 1 500mm, 咬合 250mm, 共计 109 根。其中 A 型桩为无筋桩, 采用超缓凝水下 C20 混凝土; B 型桩为有筋桩, 采用 C30 水下混凝土。钻孔咬合桩采用全套管+旋挖机方式施工, 严格按 A-B-A-B 顺序交错布置, 相邻单桩之间互相咬合, 应在 A 桩混凝土初凝前完成 B 桩的套管切割与混凝土浇筑^[9], B 桩浇筑时使用全套管钻机切割紧挨着 A 桩相交区域的混凝土, 实现咬合, 如图 2 所示。

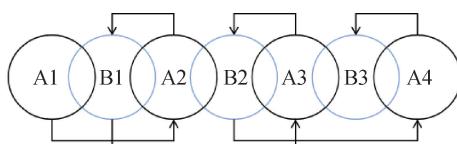


图 2 钻孔咬合桩施工顺序

Fig. 2 Construction sequence of drilled interlocking piles

在施工过程中, 机械设备均能实现分区独立操作, 同时也支持多台设备协同作业(见图 3)。具体成桩顺序为: 先完成 A 组桩, 待其混凝土初凝后, 再穿插进行 B 组桩, 如此循环推进。

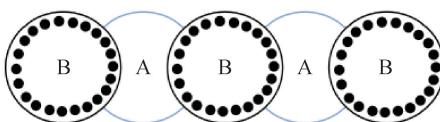


图 3 桩基交错施工布置

Fig. 3 Staggered layout of pile foundation

4 基坑监测分析

在基坑施工期间进行基坑变形与周围环境监测工作, 测点平面布置如图 4 所示。

为实现基坑施工期间的全过程动态监测与风

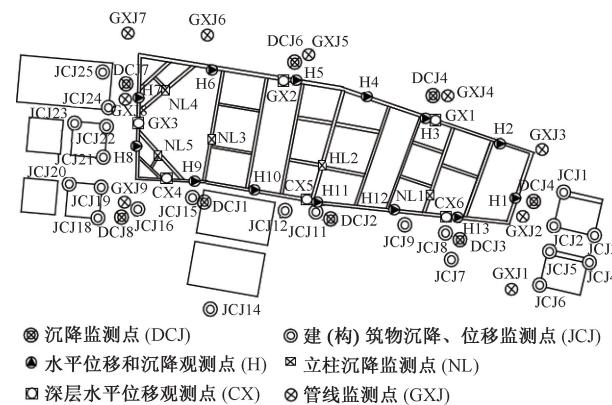


图 4 基坑监测平面

Fig. 4 Foundation excavation monitoring plan

险管控, 依据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》及相关规范要求, 结合本工程地质条件、支护结构形式和周边环境敏感性, 分别对各类监测项目设置了明确的预警值与控制值, 如表 1 所示。

表 1 基坑监测预警值及控制值

Table 1 Monitoring warning values and control values of foundation excavation

监测项目	变化速率/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	预警值/mm	报警值/mm	控制值/mm
桩顶垂直位移及桩顶水平位移	4	30	40	50
地表沉降	3	24	32	40
建筑物沉降	2	12	16	20
地下管线(燃气、供水)	2	12	16	20
地下管线(雨污水管)	2	9	12	15
桩体水平位移	2	30	40	50

4.1 桩体水平位移

选取桩体深层水平位移观测点的监测数据, 绘制桩体水平位移随时间变化曲线, 如图 5 所示, 其中“+”表示监测点向基坑内侧位移, “-”表示监测点向基坑外侧位移。

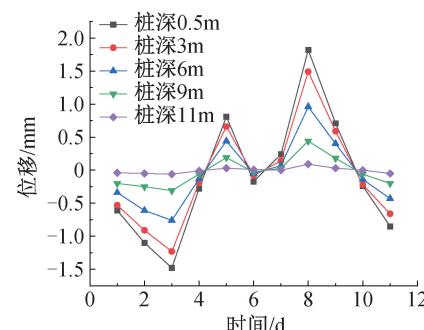


图 5 桩体水平位移变化曲线

Fig. 5 Horizontal displacement change curves of the pile body

由图 5 可知, 随着埋深增加, 土体的水平位移变

化幅度显著减小,曲线逐渐趋于平缓,表明基坑开挖扰动主要集中在浅层土体,深部土体稳定性较好,整体变形可控。开挖初期,随着土体支撑条件的改变,支护桩受到主动土压力作用,产生一定水平位移,且增速较快。中期随着基坑逐步开挖至中下部,支护桩位移增幅有所减缓,这是由于桩间设置了支撑体系,增强了结构的整体稳定性,后期随着基坑底部结构施工的推进,尤其是底板混凝土浇筑完成,进一步限制了支护桩体的水平位移发展,使得整体变形进入稳定阶段。整个施工过程中,支护桩水平位移发展过程平稳,无突变情况发生,反映出支护结构刚度匹配合理,施工过程控制得当,支护体系变形处于设计允许范围内。

4.2 周边建筑水平位移

选取部分代表性位移监测点的监测数据,分析周边建筑水平位移的变化趋势,如图 6 所示,其中“+”表示内侧位移,“-”表示外侧位移。

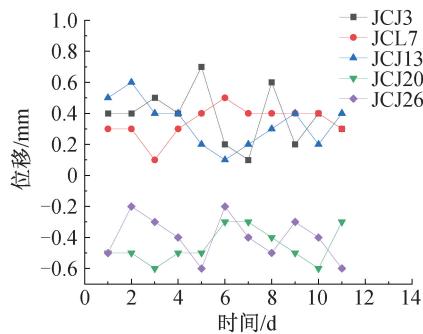


图 6 周边建筑水平位移变化曲线

Fig. 6 Horizontal displacement change curves of surrounding buildings

由图 6 可知,基坑周边不同位置的建筑物在施工期间表现出明显的水平位移差异。尽管各监测点在整体上分别保持正向或负向趋势,但其位移变化量随施工天数的增加呈现出一定的上下波动,这种波动属于建筑物对基坑开挖过程中不同施工阶段的渐进响应。基坑分阶段开挖过程中,土体应力状态持续调整,不同工序以及施工荷载都可能会引起土体位移变化。在监测过程中,周边建筑单次水平位移未超出控制标准范围,表明本次施工对周边建筑物的水平稳定性影响较小,支护体系及监测措施总体有效。

4.3 周边地表沉降

选取部分代表性周边地表沉降监测点的观测数据,分析地表沉降的变化趋势,如图 7 所示。

由图 7 可知,基坑周边地表选取的观测点沉降随时间变化规律基本一致,呈现竖向累计沉降量逐步增加的趋势。前期由于土体受力突变、支护尚未

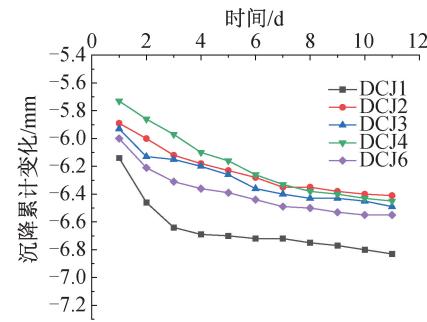


图 7 周边地表沉降变化曲线

Fig. 7 Surface subsidence change curves around the area

形成,沉降发展较快;中后期随着支护结构逐步完善、坑内结构施工完成,土体应力逐渐稳定,沉降速率明显减缓,曲线趋于平缓。最大沉降出现在靠近施工频繁区域的测点,累计沉降量未超出控制值,表明本工程基坑支护及沉降控制措施总体有效,地表变形处于安全可控状态。

4.4 周边管线沉降

选取部分代表性管线沉降监测点的观测数据,分析管线沉降的变化趋势,如图 8 所示,其中“+”表示上升,“-”表示下降。

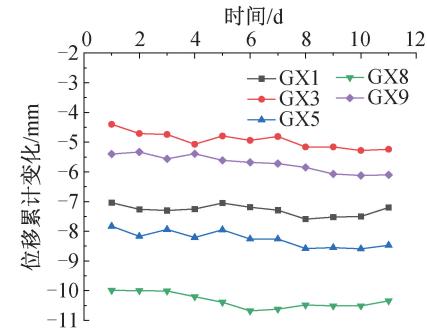


图 8 周边管线沉降变化曲线

Fig. 8 Surface settlement change curves of surrounding pipelines

由图 8 可知,周边管线的累计沉降整体呈逐渐增大的趋势,符合基坑开挖阶段地基土体分布及结构变形影响下的渐进式响应特征。不同监测点管线的沉降幅度存在一定差异,与其距离基坑边缘的远近、埋深等因素有关。所有监测点的沉降变化曲线均较为平缓,未出现明显突变,表明施工过程中对既有管线的影响较小,沉降过程稳定可控,保障了周边管线的结构安全与正常运行。

4.5 支护结构顶部水平位移

选取部分冠梁代表监测点的观测数据,分析冠梁水平位移变化趋势,如图 9 所示。其中“+”表示内侧位移,“-”表示外侧位移。

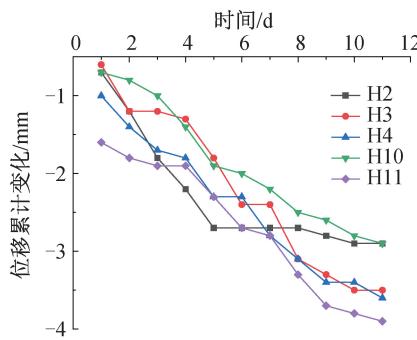


图 9 冠梁水平位移变化曲线

Fig. 9 Horizontal displacement change curves of crown beam

由图 9 可知, 冠梁水平位移在施工期间呈逐步增大趋势。初期由于基坑开挖导致土体侧向失稳, 支护结构位移增长较快; 中期随着腰梁及支撑体系的逐步设置, 支护结构整体刚度提升, 位移增长速率减缓; 后期随着底板浇筑完成, 基坑结构形成闭合体系, 支护结构变形趋于稳定。冠梁水平位移始终未超过设计控制值, 说明支护结构设计合理、施工过程受控良好, 基坑在施工期间保持稳定, 支护体系能够有效抵抗土体侧压力并限制结构变形, 确保了施工安全与周边环境的稳定性。

5 结语

1) 针对复杂地质与周边环境, 通过坡率法联合土钉墙、排桩止水帷幕、钻孔咬合桩组合支护设计, 结合三轴搅拌桩限速注浆、钻孔咬合桩超缓凝混凝土软切割、旋挖桩沉渣控制施工工艺, 实现基坑安全施工, 验证了支护体系可靠性。

2) 基坑开挖过程中, 支护结构变形随施工阶段动态变化, 浅层土体扰动显著但整体可控; 支护体系与支撑设置有效抑制位移发展, 周边建筑及冠梁水平位移均未超限, 验证了设计合理性与施工控制有效性。

3) 基坑施工期间, 地表与管线沉降随开挖进程呈增长趋势, 前期沉降速率较快, 中后期支护体系完善后显著减缓; 最大沉降量均未超出控制阈值, 且变形曲线平缓无突变, 表明支护结构动态控制措施有效, 结合实时监测, 保障周边环境安全稳定。

参考文献:

[1] 赵玉波, 代跃强, 卢守龙, 等. 狹小场地条件下深基坑建筑废弃泥浆固化回填施工技术 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52 (10): 95-98, 134.

[2] 李涛涛. 某狭窄场地深基坑支护方案优选与施工过程分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.

[3] LI T T. Optimization of supporting scheme and construction process analysis of deep foundation pit in a narrow [J]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021.

[4] 梁永辉, 刘青, 沈鸿辉, 等. 低净空狭窄空间大直径超长灌注桩试验研究 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(1): 122-127.

[5] LIANG Y H, LIU Q, SHEN H H, et al. Experimental study of large diameter and ultra deep cast-in-place piles in narrow spaces [J]. Construction technology, 2025, 54(1): 122-127.

[6] 宫鹤, 熊智彪, 宋世豪, 等. 复杂周边环境深基坑支护结构设计及监测分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (3): 732-738.

[7] GONG H, XIONG Z B, SONG S H, et al. Structural design and monitoring analysis of deep foundation pit supporting under complex surroundings [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(3): 732-738.

[8] 范龙尧, 谢惠庆, 康清泉, 等. 狹窄场地超深基坑综合支护技术 [J]. 施工技术, 2012, 41(2): 50-52, 88.

[9] FAN L Y, XIE H Q, KANG Q Q, et al. Integrated supporting technology for some ultra-deep foundation excavation in narrow site [J]. Construction technology, 2012, 41(2): 50-52, 88.

[10] 江焕钊, 李俊才, 赵久凤, 等. 超大环形支撑深基坑支护设计与监测分析 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45 (2): 181-187.

[11] JIANG H Z, LI J C, ZHAO J F, et al. Design and monitoring of a super-large and deep circular foundation pit support structure [J]. Journal of Nanjing Tech University (natural science edition), 2023, 45(2): 181-187.

[12] 崔向阳, 何华飞, 王佳豪, 等. 紧邻高铁站多级深基坑支护结构一体化设计分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S2): 783-792.

[13] CUI X Y, HE H F, WANG J H, et al. Integrated design and analysis of multi-level deep foundation pit support structure adjacent to high-speed railway station [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2024, 20(S2): 783-792.

[14] LI Z Q. Displacement monitoring during the excavation and support of deep foundation pit in complex environment [J]. Advances in civil engineering, 2021(1): 5715306.

[15] 吴岑佳, 陈秋南, 陈正红, 等. 深基坑咬合桩力学性状影响因素及敏感性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20 (1): 190-200, 209.

[16] WU C J, CHEN Q N, CHEN Z H, et al. Influence factors and sensitivity analysis of mechanical properties of deep foundation pit occluding pile [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2024, 20 (1): 190-200, 209.