

邻近运营铁路深基坑开挖施工技术优化及桥墩变形控制研究

汪庚寅

上海东华地方铁路开发有限公司, 上海

收稿日期: 2026年5月17日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年6月22日

摘要

锡澄运河市区段涉铁航道工程为下穿京沪铁路、沪宁城际高铁的三级航道深基坑工程, 施工区域地质复杂、周边环境敏感、工期紧张, 且面临铁路设备微变形控制(沪宁城际 ± 2 mm、京沪铁路 ± 3 mm)等严苛要求。本文以该工程为研究对象, 系统分析工程地质水文特征及施工重难点, 重点阐述杂填土换填、桩基施工(高低机型搭配、振动改静压)、基坑降水、土方开挖(快挖快撑、分层分区优化)、支撑拆除等关键工序的技术优化方案。结合第三方自动化监测数据, 分析深基坑施工对邻近铁路桥墩的变形影响规律, 提出“技术优化 + 动态监测 + 过程管控”的施工体系。工程实践表明, 施工期间铁路桥墩变形零报警、工程质量优良、工期提前完成。该体系可为同类邻近运营铁路深基坑工程提供技术参考和实践借鉴。

关键词

邻近运营铁路, 深基坑开挖, 施工技术优化, 变形监测, 桥墩位移控制

Research on Optimization of Adjacent Operating Railway Deep Foundation Pit Excavation Technology and Pier Deformation Control

Gengyin Wang

Shanghai Donghua Local Railway Development Co., Ltd., Shanghai

Received: May 17, 2026; accepted: June 9, 2026; published: June 22, 2026

Abstract

The urban section of the Xicheng Canal railway-related waterway project is a deep foundation pit

project for a class III waterway that passes under the Beijing-Shanghai Railway and the Shanghai-Nanjing Intercity High-speed Railway. The construction area has complex geological conditions, sensitive surrounding environment, and tight schedule, and faces stringent requirements such as micro-deformation control of railway equipment (± 2 mm for Shanghai-Nanjing Intercity High-speed Railway and ± 3 mm for Beijing-Shanghai Railway). This paper takes this project as the research object, systematically analyzes the engineering geological and hydrological characteristics as well as the key difficulties and challenges in construction, and focuses on elaborating the technical optimization schemes for key processes such as replacement of miscellaneous fill with soil, pile foundation construction (combination of high and low-level machines, vibration-to-static pressure conversion), foundation pit dewatering, earth excavation (rapid excavation and support, layered and zoned optimization), and support removal. Combined with third-party automated monitoring data, the deformation impact of deep foundation pit construction on adjacent railway piers is analyzed, and a construction system of "technical optimization + dynamic monitoring + process control" is proposed. Engineering practice shows that there were no alarms for railway pier deformation during construction, the project quality is excellent, and the construction period was completed 5 days ahead of schedule. This system can provide technical reference and practical guidance for similar deep foundation pit projects near operational railways.

Keywords

Adjacent Operating Railway, Deep Foundation Pit Excavation, Optimization of Construction Technology, Deformation Monitoring, Control of Bridge Pier Displacement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市交通基础设施一体化发展,下穿运营铁路的航道、道路等工程日益增多,此类工程中深基坑施工因邻近铁路运营线,普遍存在施工空间受限、地质条件复杂、变形控制严苛、安全风险高等突出问题[1],基坑开挖、降水、支撑拆除等工序均可能引发周边土体扰动,进而导致铁路桥墩沉降或位移超限,影响铁路运营安全[2]。国内学者对此有较多的研究,陈义[3]基于上海市静安区某租赁住房深基坑项目,基坑距离运营铁路最近约 5.7 m,通过对深基坑开挖各施工阶段围护结构深层水平位移与邻近铁路路基及轨道位移的监测数据对比,分析了不同施工阶段对邻近铁路的影响情况;刘玉明等[4]基于数字化监控技术,提出构建一套系统完整的安全风险动态监测与识别体系方法;李新军[5]采用 FLAC3D 数值模拟软件,建立三维有限差分模型,对基坑开挖与支护全过程进行动态模拟,分析深基坑施工对邻近货运铁路路基沉降的影响机制;但各学者对涉铁航道工程下穿高速铁路的研究较少。

本项目基于锡澄运河市区段涉铁航道工程,深基坑开挖深度达 8.19 m,基坑面积约 9600 m²,下穿京沪铁路、沪宁城际铁路两大运营线路,铁路桥梁最小净空仅 5.75 m,且施工处于主汛期,环保要求高、工期仅 9 个月。本文结合该工程施工实践,针对关键施工技术优化及铁路桥墩变形控制开展研究,通过多工序方案迭代优化、全过程动态监测及精细化施工管控,解决了邻近运营铁路深基坑施工过程控制的技术难题,验证了技术方案的可行性和有效性;可为同类临近运营铁路深基坑工程提供技术参考和实践借鉴。

2. 工程概况

锡澄运河市区段涉铁航道工程施工里程 K0 + 687~K0 + 833.5,全长 146.5 m,为陆上新开三级航道,

由南向北穿越京沪铁路锡澄运河特大桥 29#~30#桥孔、沪宁城际无锡西特大桥 96#~97#桥孔, 航道中线与京沪铁路夹角约 76°、与沪宁城际夹角约 70°。工程设计最高通航水位 2.88 m、最低通航水位 0.81 m, 航道底标高-4.19 m, 开挖深度 8.19 m, 基坑采用“钻孔灌注桩 + 拉森钢板桩 + MJS 桩”围护结构, 设置两道混凝土支撑。

3. 水文地质条件

3.1. 地质条件

施工场地 50.0 m 深度内岩土层以第四系全新统及上更新统的冲积黏性土、砂类土和粉性土为主, 基坑开挖深度范围内从上至下为 1-2 杂填土、1-3 暗浜土、3-1-1 淤泥质粉质黏土、3-2-2 粉质黏土。其中, 杂填土厚 1.5~10 m, 含大量碎砖块、建筑垃圾及大块混凝土; 淤泥质粉质黏土含水量高、承载能力低、压缩性大, 易引发基坑坍塌。场地岩土层主要物理力学参数见表 1。

Table 1. Summary of main physical and mechanical parameters of rock and soil layers at the site

表 1. 场地岩土层主要物理力学参数汇总表

层号	地层名称。	重度 (kN/m ³)	黏聚力 ck (kPa)	内摩擦角 φ pk (°)	水平渗透系数 Kh ($\times 10^{-6}$ cm/s)	垂直渗透系数 Kv ($\times 10^{-6}$ cm/s)	地基承载力特征 fak (kPa)
03-1-10	淤泥质粉质黏土	18.1	12.0	14.2	8.6	12.5	60
3-2-2	粉质黏土	19.6	36.7	17.3	1.7	0.9	130
3-2-3	粉质黏土夹粉土	18.5	19.6	16.8	1.8	0.8	80
3-3-1	粉土	19	10.6	52.6	24.4	460	100

3.2. 水文条件

场地周边水系发达, 西 500 m 为锡澄运河、东北 300 m 为梅泾浜、东 20 m 为在建景观河; 地下水以孔隙潜水为主, 微承压水赋存于 5-3-1、5-3-2 层粉土, 浅部基坑开挖易引发突涌、流土流砂问题, 勘察期间钻孔稳定水位埋深 1.00~6.00 m, 标高 0.35~3.75 m。

4. 工程重难点及优化措施

4.1. 工程重难点

(1) 设备选型难度大: 施工区域位于铁路正下方及两侧, 铁路桥梁最小净空仅 5.75 m, 施工工艺繁多, 设备倾覆易触碰铁路设施[6], 设备高度及作业范围受限。

(2) 铁路变形控制严苛[7]: 沪宁城际桥墩位移控制值 ± 2 mm、京沪铁路 ± 3 mm, 基坑工程施工破坏原有水土压力平衡体系, 极易导致周边铁路桥墩水平和竖向位移超限。

(3) 地质条件处理复杂[8]: 场地内存在大量深埋混凝土障碍物, 影响围护桩基施工进度, 淤泥质黏土易导致基坑渗漏、坍塌。

(4) 汛期施工风险高: 基坑开挖处于主汛期, 地下水发育, 南北两端航道蓄水导致地下水位升高, 基坑防洪防汛压力大[9]。

(5) 支撑拆除安全风险高: 混凝土支撑切割量近 7000 m³, 多为 8 m 高空作业, 大型机械作业受限, 且拆除过程易引发围护结构变形[10]。

(6) 邻近营业线管控严格: 施工设备数量多, 需确保全程不侵入铁路限界, 环保要求高, 施工现场紧邻环保国控点[11]。

4.2. 施工工艺优化

针对上述重难点,对杂填土换填、桩基施工、基坑降水、土方开挖、混凝土支撑拆除等核心工序进行技术优化,形成适配邻近运营铁路深基坑的施工技术体系。

(1) 杂填土换填技术:桩基施工揭露地下 4.5 m 范围内存在大量混凝土块、建筑垃圾。为保障桩基施工质量,对水泥搅拌桩 7 m 强加固区进行 4.5 m 深度换填;同时为保障铁路行车安全,制定“小段间隔换填”原则:每次换填长度 ≤ 5 m,开挖两分区间隔 ≥ 20 m,并增加土方换填设备,实现桩位提前换填,确保桩基施工进度。

(2) 桩基施工技术优化:桩基施工包括钻孔灌注桩、水泥搅拌桩、MJS 桩、拉森钢板桩,核心优化设备选型和施工工艺,规避铁路净空限制及设备倾覆风险,同时对钢板桩施工方案进行迭代优化。钻孔桩施工:高低机型搭配;根据铁路桥梁净空高度及桩机与桥墩的距离,采用高低桩机分区施工方案(表 2),调整泥浆池选址于南侧已开挖未通水航道内,存浆量 600 m³,满足 20 根桩同时施工需求,同步解决场地小、泥浆池选址难的问题。

Table 2. Statistical table of drilling pile machines by height zones

表 2. 钻孔桩机高低分区统计表

施工区域	铁路净空	桩机高度	钢筋笼长度	施工要求
京沪铁路桥下及两侧 12 m 内	5.75 m	5 m	4 m	避免设备倾覆至桥梁
京沪铁路桥下 12 m 外		11.8 m		桩机机身配合下笼
沪宁城际桥下及两侧 10 m 内	8.65 m	8 m	6 m	机架下笼,规避倾覆风险
沪宁城际桥下 10 m 外		11.8 m		桩机机身配合下笼

搅拌桩/MJS 桩施工:矮机作业;单轴水泥搅拌桩、MJS 桩均采用 5 m 高桩机施工,有效解决京沪铁路桥下净空受限问题,消除设备倾覆至铁路桥梁的风险。

钢板桩施工:振动改静压;原方案采用振动锤施工,存在振动影响桥墩稳定、天窗时段短导致施工效率低等问题。优化后全线采用静压桩机施工,将邻营 B 类施工调整为 C 类,无振动、无倾覆风险,大幅提升施工效率(表 3)。

Table 3. Optimization and comparison of steel sheet pile construction schemes

表 3. 钢板桩施工方案优化对比

施工区域	原方案	优化后方案	施工类别调整
京沪铁路桥下 3 m 内/3~10m 内	振动锤, 4 m/6m 分节焊接	静压桩机, 4 m/6m 分节施工	B 类→C 类
沪宁城际桥下/桥下 10 m 内	振动锤, 6 m/12m 接桩插打	静压桩机, 6 m/12m 接桩施工	B 类→C 类

(3) 基坑降水施工优化

原设计 14 口 $\Phi 700$ mm 浅层疏干井无法满足施工需求,因汛期地下水发育、建筑垃圾导致地层渗透性强、南北航道蓄水抬升地下水位,对降水方案进行双维度优化:降水井数量优化:由 14 口增加至 26 口,井深 13 m,深入基坑底部 4.8 m,每口井有效降水范围 367 m²,满足 9545.46 m² 基坑疏干要求。抽水设备优化:采用气动抽水泵替代传统电动潜水泵,利用气动原理抽水,避免电线布设带来的安全隐患,提升基坑降水施工安全性。

(4) 土方开挖施工优化

土方开挖总量近 80,000 m³，原方案分层过浅、步序不合理，通过开挖步序两次优化和基坑见底方案优化，实现“快挖快撑”，减少土体扰动时间。

(5) 开挖步序优化

原方案分 8 层开挖，每层 ≤ 1 m，机械无法正常作业。第一次优化分区分层，分 5 区 4 层开挖(第一层 2.5 m、第二层 1.5 m、第三层 2.5 m、第四层 1.69 m)；第二次优化开挖步序，结合出土口及长臂挖机作业平台位置，将开挖步序调整为先挖一区/三区/五区，再挖二区/四区，二区、四区仍最先开挖至基坑底，兼顾机械作业效率和基坑稳定性。

(6) 混凝土支撑拆除施工优化

原方案采用 16T 叉车配合拆除 8 m 高空的混凝土支撑，风险高、效率低。优化后在基坑内增加 2 台 50T 汽车吊，辅助吊梁下放，将每格支撑梁“分两段切割”调整为“分一段切割”，减少工序增加安全保障；第一道支撑拆除比计划提前 5 天、第二道提前 3 天，施工效率提升 50%以上。

(7) 航道驳岸施工技术细化

针对驳岸混凝土浇筑爆模、浇筑困难问题，采取两项细化措施：

- 1) 模板加固优化：将驳岸挡墙模板对拉螺杆与永久锚固植筋焊接，避免 5.37 m 高浇筑时出现爆模；
- 2) 浇筑孔预设：冠梁施工时每隔 2 m 预埋 $\phi 20$ cm PVC 管作为浇筑孔，驳岸模板开设 2 排浇筑孔，确保混凝土软管至浇筑面高度 ≤ 2 m，解决混凝土浇筑离析问题。

5. 变形监测及数据分析

5.1. 铁路桥墩监测

监测对象为沪宁城际 95#~98#桥墩、京沪铁路 28#~31#桥墩，重点监测竖向位移、水平位移(横向 + 顺向)、桥墩倾斜；每个桥墩底部(地面以上 0.5 m)和墩顶各布设 2 个监测点，采用全站仪自动化监测，频率 1 次/小时，沪宁城际报警值 1.6 mm、控制值 2.0 mm，京沪铁路报警值 2.4 mm、控制值 3.0 mm。

5.2. 基坑结构监测

监测内容包括围护桩顶部沉降/水平位移、围护桩侧向变形(测斜)、地表竖向位移、地下水位、立柱沉降、支撑轴力等，采用人工监测，频率 1 次/天，各监测项目均设定报警值，确保基坑围护体系稳定。

5.3. 关键施工阶段监测数据分析

选取桩基施工阶段、基坑开挖阶段、支撑拆除阶段三个关键阶段，对监测数据进行统计分析，研究施工对铁路桥墩的变形影响规律。

5.3.1. 桩基施工阶段(2024.3.8~2024.8.7)

桩基施工期间地基扰动对桥墩影响较小，沪宁城际 97#桥墩最大下沉 0.53 mm，京沪铁路 29#桥墩最大上抬 0.45 mm，均在控制值范围内，桥墩变形整体平稳，表明桩基施工的低扰动方案有效规避了对铁路桥墩的影响。

5.3.2. 基坑开挖阶段(2024.8.8~2024.10.25)

基坑开挖为土体卸载过程，原本处于平衡状态的应力场被打破，导致坑外土体向坑内方向位移，进而引起围护结构产生向坑内的水平变形。这一应力释放和土体位移的过程会向外传播，对周边铁路桥墩产生不利影响，监测数据显示：

- (1) 沪宁城际 96#、97#桥墩、京沪铁路 29#、30#桥墩，靠近基坑侧，受基坑开挖影响更显著。受开

挖顺序影响，东西两侧桥墩变形不同步。

(2) 靠近基坑侧铁路桥墩因土体应力释放、列车动荷载作用逐渐下沉并稳定，整体呈“先上抬后下沉再稳定”趋势。

(3) 所有桥墩变形均未超过控制值，基坑“快挖快撑”工艺有效控制了基坑开挖对桥墩的影响。

5.3.3. 支撑拆除阶段(2024.10.25~2024.11.28)

支撑拆除期间，铁路桥墩、基坑围护体系各项监测数据无异常、无报警，京沪铁路 30#桥墩累计竖向位移最大值 1.32 mm，沪宁城际 97#桥墩累计竖向位移最大值 0.78 mm，均远低于控制值。支撑拆除完成后，桥墩周边水土压力恢复平衡，监测数据趋于稳定，表明支撑拆除的“吊机辅助、分段切割”方案控制得当。

6. 结论

锡澄运河市区段涉铁航道工程深基坑项目通过技术优化、动态监测和过程管控，成功解决了邻近运营铁路深基坑设备选型难、变形控制严、地质条件复杂、工期紧张等技术难题，通过工程实践得出以下结论：

1) 设备选型优化：采用“高低机型搭配、振动改静压、矮机作业”的桩基施工方案，可有效规避倾设备覆风险，适用于铁路净空受限的深基坑工程。

2) 开挖核心控制技术：深基坑“快挖快撑 + 分层分区优化 + 垫层封底”能大幅减少土体扰动时间，控制铁路桥墩变形。

3) 关键监测体系：“自动化全站仪监测(铁路桥墩) + 人工监测(基坑结构)”双重体系，实现变形实时精准把控，为施工决策提供科学依据，是保障铁路运营安全的关键。

4) 综合施工管理体系：结合工程特点制定的“技术优化 + 动态监测 + 过程管控”施工体系，可实现工程质量有保证、施工工期可锁定、铁路变形零超限等目标，具备较强的实操性和推广价值。

本工程的施工技术和变形控制经验，可为国内同类邻近运营铁路、城市核心区敏感构筑物的深基坑工程提供重要的技术参考和实践借鉴，具有良好的推广应用价值。

参考文献

- [1] 李斯. 盾构隧道下穿高速铁路基沉降监测与预警[J]. 铁道建筑, 2023, 63(11): 127-130.
- [2] 肖飞. 新建盾构隧道下穿施工对既有铁路影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 201-205.
- [3] 陈义. 深基坑开挖对邻近铁路的影响分析[J]. 价值工程, 2026, 45(15): 19-23.
- [4] 刘玉明, 王彦辰, 熊彬臣, 等. 数智赋能铁路建设安全风险动态监测识别研究[J]. 铁道工程学报, 2026, 43(3): 86-92.
- [5] 李新军. 基于数值模拟的基坑开挖对邻近铁路的影响[J]. 土工基础, 2026, 40(2): 323-326.
- [6] 李晓龙, 廖炜炼, 肖飞, 等. 邻近高速铁路营业线基坑分坑施工变形控制[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 223-226+233.
- [7] 梁艳春. 富水软土地基深基坑开挖对周边建筑的影响及沉降监测分析[J]. 科学技术创新, 2025(21): 174-178.
- [8] 林文龙. 软土地区地下五层超深地铁车站基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(S2): 169-175.
- [9] 王璋. 繁忙干线铁路跨桥上跨桥在复杂工况下隐患整治处理措施[J]. 建筑科技, 2023, 7(1): 46-48.
- [10] 李晓龙. 软土地区盾构隧道长距离穿越铁路群组施工技术研究[J]. 建筑科技, 2022, 6(1): 32-36.
- [11] 左坤. 新建高铁对紧邻运营铁路路基服役状态影响研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.