

复杂地质条件下地铁车站深基坑支护体系优化设计

——以上海嘉闵线丰茂路站为例

文 / 张明忠 中铁十五局集团有限公司

摘要：目前我国许多城市在如火如荼地进行轨道交通建设，随着轨道交通建设进程的加快，地铁车站基坑也向着超大超深发展，相应岩土工程问题（变形、失稳等）日益突出。^[1]针对地铁深基坑工程中软土流变、砂层渗透及多层承压水等复杂地质风险，以上海丰茂路站为背景，提出支护体系多目标协同优化方法。通过整合地下连续墙-内支撑刚度差异化匹配、动态施工模拟与智能监测预警系统，构建涵盖设计、施工、运维的全生命周期管控体系，为超长基坑在密集城区环境的支护优化提供系统性解决方案。

关键词：复杂地质条件；深基坑支护；协同优化；动态施工模拟；全生命周期

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.051

引言

城市化进程的快速推进带来了土地资源日益紧张的问题，尤其在核心城区，地面空间已经趋于饱和。^[2]为适应现代化城市的多功能需求，地下空间开发逐渐成为解决城市用地问题、改善城市功能布局的重要途径之一。在轨道交通、商业空间、地下停车场、综合管廊等工程建设中，地下空间的应用广泛，基坑工程因此成为确保地下建设安全的重要环节。基坑支护施工作为基坑工程的重要部分，其合理性、稳定性和施工质量直接关系到施工安全。^[3]以上海嘉闵线丰茂路站为例，工程需穿越淤泥质软土、松散砂层及多条河道，存在流砂、管涌等地质风险；同时周边商业区密集、地下管线交错，对支护体系的安全性及环境扰动控制提出严苛要求。

一、工程背景概况及工程地质情况

上海轨道交通市域线嘉闵线丰茂路站位于嘉定区澄浏中路，为地下二层双岛四线车站，总长1285.6m，基坑宽度11.65m~62.334m，标准段净宽20.52m，基坑最大开挖深度24.7m（南端头井），覆土厚度3.4m（河道处6.95m）。车站主体划分为7个工区，采用“先施工1、3、5、7区，后施工2、4、6区”的分阶段明挖顺作法，围护结构采用1000mm厚地下连续墙，工字形型钢接头，支撑体系包含钢筋混凝土支撑及 $\Phi 609$ （ $t=16$ ）、 $\Phi 800$ （ $t=20$ ）钢支撑组合。场地地质条件复杂，揭露土层共9层，其中浅部③层灰色淤泥质粉质黏土（层厚2.10~10.10m，流塑状，压缩系数0.80~1.11）及④层灰色淤泥质黏土（层厚0.90~8.30m，流塑状）为典型软土层，具高压缩性、高灵敏度特性；⑦1层草黄色砂质粉土（层厚0.80~6.80m，中密状）渗透性强，易引发流砂、管涌；⑧层粉质黏土及砂质粉土互层（顶标高-24.34~-48.10m）为承压含水层，与下部⑨层灰色粉砂（密实状）构成复合承压水系统。场地内存在盛桥

港（河宽31m，淤泥厚1.1m）及北横泾（河宽20m，淤泥厚0.86m）两条明浜，填土局部厚度达4.5m，且周边分布密集商业建筑（基础埋深1.0~25.0m）及电力、燃气、给排水等管线（埋深0.5~5.8m）。基坑开挖面临软土流变、承压水突涌（⑧层未完全隔断）及环境敏感区变形控制等多重挑战。

二、复杂地质条件与支护体系适配性分析

场地复杂的地层特性对支护选型形成多维度约束。软土层具有高压缩性、低强度及流变特性，易引发围护结构侧移和坑底隆起。此类地层要求支护体系具备高刚度和止水性能，采用1000mm厚地下连续墙配合工字形型钢接头，通过刚性墙体阻断浅层潜水渗流路径，并设置六道支撑分层控制变形。砂性土层及承压含水层易诱发流砂和突涌风险，需通过“疏干+降压”组合控制。基坑内布设真空深井泵降低浅层潜水水位，同时针对⑧层承压水增设降压井，确保抗突涌安全系数 ≥ 1.05 。填土区及明浜导致地基承载力不均，采用三轴搅拌桩和高压旋喷桩复合加固，提升被动区土体抗力至150kPa。^[4]

三、地铁车站深基坑支护体系优化设计方法与关键技术

（一）多目标协同优化框架

复杂地质条件下的支护体系优化需建立安全、经济与环境扰动控制的多目标协同框架。针对丰茂路站超长基坑（1285.6m）、多层软土（③、④层）及多重承压水（⑧层）特性，优化框架以“地质适配性”为核心，整合结构选型、施工时序、监测反馈三大模块。结构选型层面，基于土层渗透性差异（如⑦1层砂质粉土高渗透性）匹配地下连续墙（1000mm厚）与组合支撑（混凝土+钢支撑），通过刚度梯度分配平衡变形控制需求与材料成本；施工时序层面，结合多工区划分（7个基坑）与支撑拆换逻辑（如端头井六道支撑分阶段拆除），建立动态开

挖顺序模型，降低软土流变累积效应；监测反馈层面，集成围护结构位移（限值 $< 30\text{mm}$ ）、支撑轴力波动及水位变化数据，构建风险预警阈值，实时修正支护参数。

（二）支护结构参数化设计与优化算法

支护结构参数化设计以地层特性与工程需求为驱动，将地下连续墙厚度、支撑刚度组合及降水系统配置等关键参数转化为可量化变量。针对丰茂路站多层软土与承压水交互作用特征，基于有限刚度分配原则，建立墙-撑耦合作用模型，通过调整钢筋混凝土支撑布局（端头井六道支撑）与钢支撑预应力施加时序（ $12 \sim 16\text{h}$ 限时架设），实现变形控制与材料用量的协同优化。算法层面，引入多目标遗传算法，以围护结构位移阈值（ $< 30\text{mm}$ ）、抗突涌安全系数（ ≥ 1.05 ）及经济性指标为约束条件，迭代求解支撑间距、降水井密度与地基加固范围的最优

匹配方案。结合工程分区特性（7个区、45个施工段），算法动态适配不同基坑单元的差异化需求。

（三）动态施工模拟与风险预警

动态施工模拟基于时空耦合效应，通过多工区分层分段开挖与支撑时序的数值建模，预测支护体系在软土流变、承压水波动及施工扰动下的响应。针对丰茂路站分段工况（7个区、45个施工段），构建“开挖-支撑-降水”协同作用模型，模拟支撑架设滞后（超 12h ）对墙体变形（阈限 $< 30\text{mm}$ ）的累积影响，并优化降水井启停时序以平衡⑧层承压水降压需求与周边沉降风险。风险预警系统集成实时监测数据（位移、轴力、水位），结合地质参数动态修正预警阈值。根据目前开挖工况，基坑开挖时对第⑧-2-1层和第⑧-2-2层承压含水层进行减压降水，建立沉降预测模型。

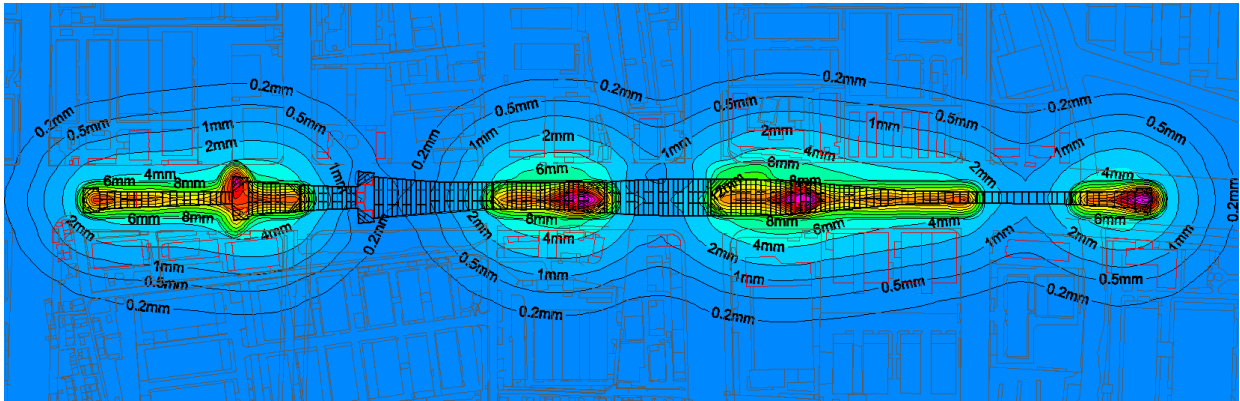


图 4-1 1、3、5、7 区第⑧-2-1 层减压降水完成后的累积地面沉降预测分布图

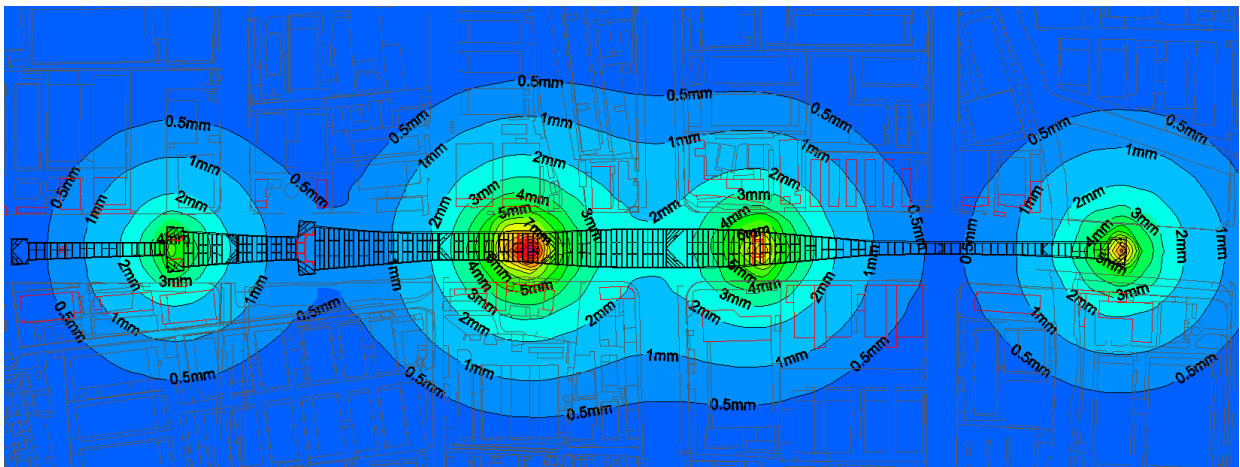


图 4-1 1、3、5、7 区第⑧-2-2 层减压降水完成后的累积地面沉降预测分布图

四、关键技术措施与施工控制策略

（一）地层加固与预处理技术

1. 软土加固

针对③、④层淤泥质软土高压缩性（压缩系数 $0.80 \sim 1.11$ ）、低抗剪强度（黏聚力 $< 20\text{kPa}$ ）及流变特性，采用复合加固技术提升地基稳定性。对于浅层软土（埋深 $< 6\text{m}$ ），采用三轴搅拌桩（水泥掺量 20% ）形

成格栅式加固区，通过桩土协同作用提高被动区土体抗力；深层软土（埋深 $> 10\text{m}$ ）结合RJP高压旋喷桩（桩径 800mm ，搭接 300mm ）形成止水帷幕，阻断承压水渗流路径。填土区（局部厚度 4.5m ）采用清障回填+分层压实工艺，消除松散填土对成槽施工的不利影响。

2. 富水地层处理

富水地层处理需统筹潜水和承压水的协同控制。针

对⑦1层砂质粉土（渗透系数 $1.06 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ）及⑧层承压含水层，采用“止水帷幕+分层降水”的综合方案。通过地下连续墙（墙深40~46m）穿透砂层并嵌入低渗透性黏土层，阻断潜水和浅部承压水渗流路径；对未完全隔断的⑧层承压水，在深坑区布设降压井（单井降深 $\geq 18.5\text{m}$ ），结合水位监测动态调整降水速率，控制抗突涌安全系数 ≥ 1.05 。针对地下连续墙接缝渗漏风险，采用RJP高压旋喷桩（桩径800mm）进行接缝补强，形成连续止水屏障。

（二）支护结构施工优化技术

1. 地下连续墙施工

地下连续墙施工以应对软土渗透性差异及承压水控制为核心，采用工字形型钢接头（止水板宽度 $\geq 350\text{mm}$ ）与高压旋喷桩接缝补强协同工艺，确保墙体完整性。针对填土区（厚度达4.5m）松散土层，优化成槽工艺，采用“预清障+泥浆护壁”分段成槽技术，通过调整膨润土泥浆比重（ $1.15 \sim 1.25\text{g/cm}^3$ ）平衡槽壁稳定性与施工效率。邻近既有建筑段（桩基埋深25m）严格控制成槽速度（ $\leq 2\text{m/h}$ ），并增设超声波检测实时监控槽壁垂直度偏差（ $< 1/300$ ）。明浜段（如盛桥港）施工前实施淤泥清除及素土回填，避免软弱夹层引发槽段塌孔。针对⑦1层砂质粉土高渗透性，施工中动态调整泥浆黏度（ $25 \sim 35\text{s}$ ），防止流砂渗透破坏。成槽后采用“双导管法”浇筑混凝土，严格控制导管理深（ $2 \sim 6\text{m}$ ）以避免夹泥断桩。

2. 内支撑体系优化

内支撑体系优化基于基坑分区特性与地层刚度差异，采用差异化支撑类型组合与预应力动态调控策略。针对端头井深基坑（深度24.7m）的软土流变效应，采用“钢筋混凝土支撑+大直径钢支撑”组合（六道支撑， $\Phi 800 \times 20\text{mm}$ 钢支撑轴力设计值4500kN），通过逐层架设与轴力补偿抑制深层土体侧移；标准段（深度 $20.8 \sim 21.6\text{m}$ ）则以混凝土支撑为主，利用其刚度优势平衡浅层土压力。施工中严格执行“限时支撑”原则，每层土方开挖后12~16h内完成支撑架设与预应力施加，避免软土蠕变导致围护变形累积。

（三）信息化施工与全生命周期管理

1. 智能监测系统

智能监测系统集成多维传感网络与BIM协同平台，实现支护体系全生命周期动态管控。系统布设高精度测斜仪（位移分辨率0.1mm）、轴力计（量程 $\geq 5000\text{kN}$ ）及孔隙水压计（精度 $\pm 0.5\text{kPa}$ ），实时采集围护结构位移（阈值 $< 30\text{mm}$ ）、支撑轴力波动（阈值 $\pm 10\%$ 设计值）及承压水头变化数据。针对⑦1层砂质粉土渗透突

变风险，通过光纤渗压传感器（灵敏度0.1kPa）捕捉地下连续墙接缝渗漏信号，联动BIM平台可视化模拟流砂路径，触发高压旋喷堵漏预案。邻近建筑段（桩基埋深25m）增设自动化沉降监测点（精度0.01mm），结合机器学习算法预测差异沉降趋势，动态修正支撑轴力补偿策略。施工中同步关联降水井运行状态（单井疏干效率 $> 30\text{m}^3/\text{d}$ ），通过水位-土压耦合分析优化降水速率，防止过度降水诱发地面塌陷。

2. 全生命周期管控

全生命周期管控以“设计-施工-运维”协同为主线，贯穿支护体系全周期风险防控。设计阶段基于地质条件（软土、砂层、承压水）建立支护选型与参数优化模型，通过BIM平台模拟多工况下围护结构变形趋势，预判支撑拆换对邻近建筑（桩基25m）的附加影响，制定差异化加固方案。施工阶段依托智能监测系统，实时关联降水井运行、支撑轴力及墙体位移数据，动态调整开挖时序（分段限时12~16h）与承压水降水速率，抑制软土流变累积效应。运维阶段聚焦长期沉降控制与结构耐久性，基于施工期监测数据构建结构健康档案，针对⑧层承压水未完全隔断区域，建立周期性水位监测与堵漏维护机制。

结语

复杂地质条件下地铁深基坑支护体系优化需兼顾地质适配性、施工动态调控与风险预见性。本文以上海嘉闵线丰茂路站工程为背景，针对软土流变、砂层渗透及多层承压水特性，提出地下连续墙与组合支撑的协同优化方法，构建多目标协同设计框架及动态施工预警机制，有效控制围护变形与突涌风险，提升支护体系在复杂地层中的适用性。

参考文献

- [1] 周振华. 复杂地质环境下超深地铁基坑支护施工技术研究[J]. 价值工程, 2024, 43(16): 146-149.
 - [2] 姜忠华. 复杂地质条件下地铁深基坑设计与地下水控制方案研究[J]. 中国高新科技, 2024, (10): 149-151.
 - [3] 刘新良, 吴超, 邱进强, 等. 复杂地质下临近地铁车站的深基坑支护变形研究[J]. 四川建材, 2024, 50(2): 94-95, 114.
 - [4] 王甲凯, 王建强. 超复杂地质条件下地铁车站基坑支护设计与施工[J]. 江西建材, 2023, (8): 217-219.
- 作者简介: 张明忠(1989.04-), 男, 汉, 安徽省阜阳市, 本科, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通施工管理。