

邻近地铁区间电力迁改工程结构安全性研究

郝君亮

中国中铁股份有限公司, 北京 100039

DOI:10.61369/ME.2026010039

摘 要 : 本文针对城市地下空间开发中电力迁改工程邻近地铁区间施工的安全问题, 结合现场勘察、数值模拟及监测验证方法, 系统研究了施工过程对既有地铁结构的影响规律与风险控制。研究以冲洪积平原地层为背景, 采用 MIDAS GTS NX 建立三维地层—结构耦合模型, 模拟竖井开挖、顶管掘进及拉管施工全过程。通过计算与监测数据对比验证, 模型误差控制在 $\pm 10\%$ 以内。结果表明, 顶管施工为主要风险阶段, 地铁隧道最大竖向上浮 0.63mm、横向偏移 0.39mm, 均显著低于 1.5mm 控制限值, 地铁结构处于安全稳定状态。灵敏度分析显示, 地层弹性模量、地下水位及掘进推力为关键影响因素。基于研究结果, 提出“预测—监测—校核—修正”闭环风险控制体系和适用于地铁保护区施工的变形控制标准。

关 键 词 : 地铁区间; 电力迁改; 数值模拟; 结构变形; 风险控制

Research on Structural Safety of Adjacent Metro Section Power Relocation Project

Hao Junliang

China Railway Group Limited, Beijing 100039

Abstract : This study systematically investigates the impact of construction activities on existing subway structures and risk control measures in urban underground space development, focusing on safety issues during power relocation projects adjacent to subway sections. Through field surveys, numerical simulations, and monitoring validation methods, the research establishes a 3D stratum–structure coupling model using MIDAS GTS NX software, simulating the entire process of shaft excavation, pipe jacking, and pipe pulling operations. Comparative analysis between computational results and monitoring data confirms model accuracy within $\pm 10\%$ error margin. Findings indicate that pipe jacking constitutes the primary risk phase, with maximum vertical displacement of 0.63mm and lateral deviation of 0.39mm in subway tunnels—both significantly below the 1.5mm safety threshold—demonstrating structural stability. Sensitivity analysis identifies three critical influencing factors: stratum elastic modulus, groundwater level, and excavation thrust. Based on these findings, the study proposes a closed-loop risk control system (predict—monitor—verify—correct) and deformation control standards tailored for subway protection zone construction.

Keywords : subway section; power relocation; numerical simulation; structural deformation; risk control

引言

城市地下空间开发的密集化导致轨道交通与市政管线设施的空间重叠愈加频繁。地铁区间结构通常位于复杂地层中, 其长期稳定性不仅受地应力与地下水位影响, 还受到邻近施工扰动的直接作用^[1]。近年来, 电力迁改、综合管廊及顶管工程的大量实施, 使得地铁保护区施工安全问题逐渐成为城市建设管理的重点。已有研究指出, 邻近地铁施工可导致隧道附加变形、结构受力重分布及地层扰动扩散, 对既有结构及轨道几何状态造成潜在影响。若控制不当, 可能诱发隧道裂缝、管片错台、渗漏及轨道不平顺等安全隐患。因此, 建立科学的安全评估体系与风险控制标准, 对保障地铁安全运营与市政施工协调具有重要意义。本文以某城市电力迁改工程邻近地铁区间为研究对象, 采用地层—结构耦合数值分析与实测数据对比验证方法, 研究施工引起的结构响应规律及风险等级, 为城市轨道交通保护区施工提供理论支持与工程指导。

一、研究方法

（一）研究思路与技术路线

研究采用“现场勘察—数值模拟—监测验证—风险评估”四阶段技术路线。通过地质勘察与结构检测掌握场地及地铁区间的现状条件；基于三维有限元软件建立地层—结构耦合模型；模拟顶管、竖井与拉管全过程施工；最后结合现场监测数据，对模型进行验证并提出控制标准。

（二）地质与结构条件

研究区位于冲洪积平原中部，地形平缓，地层以粉质黏土、粉细砂及人工填土为主，地下水埋深约4~14m，属潜水类型。地铁区间结构为双线盾构隧道，外径6.0m、环厚0.3m、环宽1.2m，采用C60钢筋混凝土管片，接缝以橡胶垫圈密封防水。结构检测结果表明混凝土强度与防水性能优良，钢筋保护层厚度36~49mm，无结构裂缝与渗漏，综合评定等级为一级（TCI>98），具备良好的安全储备条件。

（三）模型构建与参数设置

基于MIDAS GTS NX平台建立三维地层—结构模型。模型范围沿线路方向150m、横向100m、深度23m，以消除边界效应。施工过程划分如表2-2所示。

表2-2 模型施工工序表

工序	说明
阶段1	2#、3#、5#竖井分段开挖1（3.5m）；恢复井挖土约2.0m。
阶段2	2#、3#、5#竖井分段开挖2（3.5m）。
阶段3	2#、3#、5#竖井分段开挖3（开挖至设计井底）
阶段4	M-PP拉管施做
阶段5	2#~3#竖井间顶管顶进，约17m
阶段6	3#~5#竖井间顶管顶进1，约3.0m。
阶段7	3#~5#竖井间顶管顶进2，约3.0m。
阶段8	3#~5#竖井间顶管顶进3，约3.0m。
阶段9	3#~5#竖井间顶管顶进4，约3.0m。
阶段10	3#~5#竖井间顶管顶进5，约3.0m。
阶段11	3#~5#竖井间顶管顶进6，约3.0m。
阶段12	3#~5#竖井间顶管顶进7，约3.0m。

隧道结构按线弹性模型模拟，土体采用修正Mohr-Coulomb本构模型。底部设固定边界，侧面法向约束，顶面自由。顶管施工推力与土体摩擦通过面荷载模拟；拉管及恢复井开挖采用分步卸载法。列车荷载以静动组合加载，动荷载按简谐函数施加以反映运行扰动效应。模型计算采用全量更新法求解，残差精度控制在 1×10^{-5} 以内。

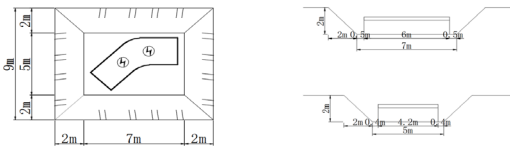


图1 恢复转角井基槽开挖设计图

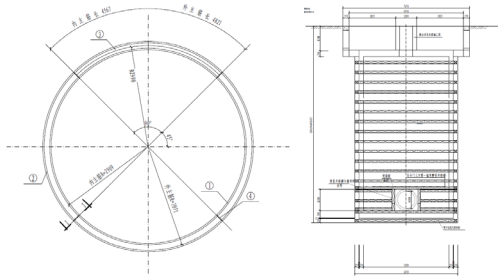


图3 5.2m顶管工作井支护设计图

（四）模型验证与监测方案

为验证模拟精度，在施工前布设地铁隧道监测点。监测内容包括隧道竖向沉降、横向偏移及环缝错台；测点间距10m，施工期每日监测一次。通过与实测数据对比，模型预测误差控制在±10%以内，表明计算模型具有良好的可靠性与工程适用性。

二、结果与讨论

（一）地层与结构变形特征

模拟结果表明，施工扰动对地层应力分布与隧道结构变形影响显著。隧道竖向上浮为主要变形形式，最大值出现在右线拱顶邻近恢复井位置，上浮0.63mm；横向最大偏移为0.39mm，位于左线北侧。轨道结构最大竖向变形0.60mm、横向0.35mm，均远低于1.5mm控制限值。竖向变形沿线路方向平缓分布，影响范围约15m；横向变形范围约10m（见图4）。顶管掘进引起的反压与卸载效应是主要变形源。

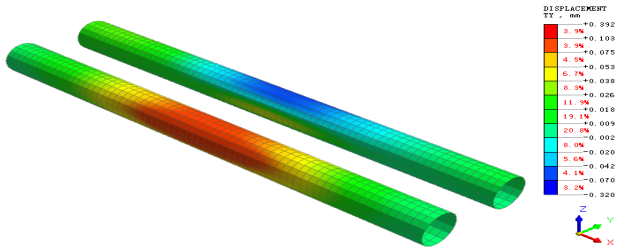


图4 既有地铁区间横向变形云图（极值）

粉质黏土层因黏聚力高、压缩模量大，结构响应较弱；粉细砂层抗剪强度低、孔隙比高，易发生附加变形，隧道上浮量增幅约25%。地下水位波动对上浮趋势具有放大作用，当水位上升0.5m时，竖向上浮增加约0.05mm。因此需通过降水控制和排水措施稳定地下水环境。

（二）工况对比与灵敏度分析

对比顶管与拉管施工阶段可知，顶管施工引起的地层扰动明显大于拉管。顶管推进压力增大5%时，隧道竖向上浮增长约8%；而注浆压力提高10%可有效减小变形约12%。灵敏度分析表明，地层弹性模量、地下水位与施工推力为影响结构响应的三大关键因素。相较之下，黏聚力与内摩擦角的变化对隧道响应影响较小，说明施工控制较地层固有性质更为主导。

（三）风险分区与控制标准

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》及表3-1分区标准，结合结构响应分析结果，该工程影响区划分为“邻近一般

影响区”，风险等级判定为二级。结合表3-2计算结果，各监测点变形均未超过规范限值。为保障地铁运营安全，建议控制标准如下：竖向与横向变形控制值1.5mm，报警值1.2mm，预警值1.0mm，变形速率不超过0.5mm/d。当监测结果接近报警值时应立即减缓掘进、加密注浆并启动应急评估。风险控制应采用“预测—监测—校核—修正”闭环管理，形成动态响应机制。

表 31 基坑工程周边影响分区表

受影响程度分区	邻近度
强烈影响区	基坑周边 0.7L 范围内
显著影响区	基坑周边 0.7L~1.0L 范围内
一般影响区	基坑周边 1.0L~2.0L 范围内
弱影响区	基坑周边 2.0L 范围外
注：1、 $L=H\tan\left(45^{\circ}+\frac{\phi}{2}\right)$ ，H为基坑开挖深度， ϕ 为土的平均内摩擦角；	
2、本表适用于深度大于5m的基坑。	

表 3-2 既有地铁区间隧道结构变形结果（mm）				
变形种类	计算工序	变形值	变形方向	变形部位
竖向变形	阶段1	0.633	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段2	0.627	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段3	0.628	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段4	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段5	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段6	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段7	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段8	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段9	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段10	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段11	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段12	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
横向变形	最不利工况	0.392	偏向恢复井挖土侧	区间隧道左线管片北侧

（四）施工优化与监测措施

研究结果显示，竖井开挖与顶管推进阶段为主要风险阶段。建议采用“分层开挖、分区注浆、限速掘进”施工策略。掘进压力应控制在平衡土压力 $\pm 5\%$ 范围内，同步注浆压力为 1.1~1.3 倍土压力。顶管与竖井交汇处应实施地层加固以减小扰动，优选水泥－水玻璃双液浆法。监测系统需覆盖隧道结构、轨道形位与地表沉降三部分，并以信息化系统实现实时数据传输与预警联动。

三、结论

（一）建立的三维地层－结构耦合模型可有效反映邻近地铁施工引起的结构响应，验证误差控制在 $\pm 10\%$ 。

（二）顶管及竖井施工阶段为主要风险源，最大坚向上浮 0.63mm、横向偏移 0.39mm，均低于控制限值，结构安全可控。

（三）风险等级判定为二级，施工扰动范围有限，轨道与隧道结构处于稳定状态。

（四）提出的控制标准与监测体系具备工程可实施性，可推广应用于地铁保护区内的市政迁改工程。

（五）未来研究应引入流固耦合与列车动载作用，以提升模型预测精度并完善邻近施工风险控制理论。

综上，本文通过数值模拟与实测数据结合的研究方法，系统揭示了邻近地铁区间电力迁改施工的变形规律与风险机理，为城市轨道交通保护区施工安全评估与科学管理提供了理论基础与实践依据。

参考文献

[1] 龙彪. 地铁隧道与邻近建筑工程施工相互影响的数值分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(08): 86–88+93. DOI: 10.16037/j.1007–869x.2019.08.019.
[2] 朱建明. 深基坑施工对邻近运营地铁车站影响的数值分析 [J]. 建筑施工, 2010, 32(04): 299–301.
[3] 陈涛, 翟超, 范鹏程, 等. 基坑开挖对邻近既有地铁结构变形影响的数值分析与研究 [J]. 勘察科学技术, 2018, (03): 1–6+31..