

盾构隧道施工对邻近地铁线路的扰动影响及 防护措施研究

朱飞龙

武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年12月28日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

随着城市轨道交通网络密集化发展, 盾构隧道近距离穿越邻近地铁线路的工程场景日益增多, 施工扰动易导致地铁结构变形、轨道平顺性下降, 威胁运营安全。为揭示扰动影响规律并提出针对性防护技术, 本文通过理论分析、数值模拟与工程案例结合的方法开展研究: 明确盾构施工扰动的核心机理(地层损失、应力重分布、地下水扰动); 系统分析地层条件、施工参数、邻近距离等关键影响因素; 构建“源头优化-过程调控-工程防护”三级防护体系; 结合某城市盾构隧道穿越地铁3号线工程案例验证措施有效性。研究表明: 盾构施工对邻近地铁的最大沉降影响出现在掌子面通过后7~10天, 净距 $\leq 3 D$ (D 为盾构直径)时扰动显著加剧; 采用“地层预处理+隔离桩防护+动态参数调控”复合措施后, 地铁结构沉降量控制在3 mm以内, 满足GB 50446-2017规范要求。本文成果可为盾构隧道近距离穿越地铁线路的施工设计与安全管控提供理论支撑和工程参考。

关键词

盾构隧道, 邻近地铁线路, 施工扰动, 沉降控制, 防护措施, 数值模拟

Shield Broussonetia Papyrifera Study on Disturbance Effects and Protective Measures of Tunnel Construction on Adjacent Subway Lines

Feilong Zhu

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: December 28, 2025; accepted: January 19, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

With the intensive development of urban rail transit networks, engineering scenarios where shield tunnels cross adjacent metro lines at close distances have become increasingly common. Construction disturbance is prone to causing deformation of metro structures and a decline in track regularity, threatening operational safety. To reveal the law of disturbance impact and propose targeted prevention and control technologies, this study is conducted using a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and engineering cases: the core mechanisms of shield construction disturbance (stratum loss, stress redistribution, groundwater disturbance) are clarified; key influencing factors such as stratum conditions, construction parameters, and adjacent clear distance are systematically analyzed; a three-level prevention and control system of “source optimization - process regulation - engineering protection” is established; the effectiveness of the measures is verified through an engineering case of a shield tunnel crossing Metro Line 3 in a certain city. The results show that the maximum settlement impact of shield construction on adjacent metro lines occurs 7~10 days after the tunnel face passes, and the disturbance intensifies significantly when the clear distance $\leq 3D$ (D is the shield diameter); after adopting the composite measures of “stratum pre-treatment + isolation pile protection + dynamic parameter regulation”, the settlement of the metro structure is controlled within 3 mm, which meets the requirements of GB 50446-2017 Code. The results of this study can provide theoretical support and engineering reference for the construction design and safety management and control of shield tunnels crossing metro lines at close distances.

Keywords

Shield Tunnels, Adjacent Metro Lines, Construction Disturbance, Settlement Control, Prevention and Control Measures, Numerical Simulation

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

1.1. 研究背景与意义

我国城市地铁建设已进入网络化发展阶段，截至 2023 年，全国开通地铁的城市达 54 个，运营里程超 10000 公里。随着地下空间开发强度提升，新建盾构隧道与既有地铁线路的交叉穿越、平行邻近工程日益增多，最小净距已缩减至 1~2 倍盾构直径(D)^[1]。盾构施工过程中，地层开挖、渣土清运、同步注浆等环节会不可避免地引发地层损失、应力重分布及地下水渗流变化，导致邻近地铁隧道结构产生沉降、水平位移或开裂，轨道几何形态异常，严重时引发运营中断^[2]。例如，某城市地铁 5 号线盾构施工时，因邻近既有地铁 1 号线净距仅 2.8 D ，导致既有隧道沉降达 8.2 mm，触发轨道限速预警。

传统施工多依赖经验参数控制，缺乏对扰动机理的系统认知，防护措施针对性不足。因此，开展盾构施工对邻近地铁线路的扰动影响及防护措施研究，明确扰动传递路径与关键控制因素，研发经济有效的防护技术，对保障城市轨道交通建设与运营安全具有重要理论价值和工程意义。

1.2. 国内外研究现状

国外学者较早开展盾构施工扰动研究：Peck^[3]提出了地层损失引起的地表沉降预测公式，为扰动评

估提供了基础；Attewell 等[4]通过数值模拟分析了盾构推进速度与邻近结构变形的相关性。国内研究方面，刘建航院士[5]系统总结了盾构施工地层扰动控制技术；李兴高[6]基于 ABAQUS 建立了盾构-地层-地铁结构耦合模型，但未考虑地下水动态影响；张顶立等[7]研究了近距离穿越的防护措施，但缺乏多因素耦合作用下的优化分析。

综上，现有研究存在三大不足：扰动机理研究多聚焦单一因素，缺乏地层、施工、结构耦合作用分析；对复杂地质条件(如富水砂层、软土)下的扰动规律认知不足；防护措施的动态适配性与长期有效性验证欠缺。

1.3. 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：(1) 盾构施工对邻近地铁线路的扰动机理；(2) 关键影响因素量化分析；(3) 三级防护技术体系构建；(4) 工程案例验证。技术路线：理论分析→数值模拟→措施研发→工程验证→结论优化。

2. 盾构施工对邻近地铁线路的扰动机理

2.1. 核心扰动源分析

盾构施工对邻近地铁的扰动主要源于三大核心因素，形成“源头-传递-响应”的链式作用过程。

2.1.1. 地层损失扰动

盾构掘进时，刀盘切削地层与管片拼装之间存在间隙，渣土超挖或欠挖、同步注浆不饱满等会导致地层损失率(V_s/V_t , V_s 为损失地层体积, V_t 为掘进地层体积)达 1%~5% [8]。地层损失引发周边土体向隧道空腔移动，形成沉降槽，当邻近地铁线路位于沉降槽影响范围内时，结构会随土体产生沉降变形。

2.1.2. 应力重分布扰动

盾构开挖破坏了原始地层的应力平衡，在隧道周边形成塑性区(软土地区塑性区半径可达 1.5 D)，应力向邻近地铁结构传递。当盾构推进推力过大(超过地层承载力)时，会挤压周边土体，导致地铁结构产生水平位移；推力过小则易引发管片上浮，间接影响邻近结构受力状态。

2.1.3. 地下水扰动

富水地层中，盾构施工可能导致地下水流失或水压变化：一方面，地下水渗流会带走细颗粒土体，加剧地层沉降；另一方面，水压变化会改变地铁结构的受力平衡，引发结构开裂或渗漏。

2.2. 扰动传递路径

扰动从盾构施工区域向邻近地铁线路的传递路径可概括为：盾构掘进→地层损失/应力重分布/地下水变化→周边土体变形→地铁结构(隧道管片、轨道)响应→轨道平顺性下降/结构损伤。传递过程中，土体的物理力学性质(如弹性模量、黏聚力)决定了扰动衰减速率，软土地区扰动传递距离可达 3~5 D，而硬岩地区仅为 1~2 D。

2.3. 地铁线路响应特征

邻近地铁线路的扰动响应主要表现为：结构变形：隧道管片沉降(多为不均匀沉降)、水平位移，最大沉降易出现在盾构掌子面通过后 7~10 天；力学响应：管片接缝张开量增大、螺栓应力提升，超过设计阈值时易发生渗漏；功能影响：轨道高低偏差、水平偏差超标，影响列车通行平顺性与安全性。

3. 扰动影响因素量化分析

3.1. 关键影响因素分类

结合工程实践与数值模拟结果, 将扰动影响因素分为三大类, 其影响权重通过正交试验确定(见表 1):

Table 1. Disturbance influencing factors and their weights

表 1. 扰动影响因素及权重

影响因素类别	具体指标	影响权重(%)
地层条件	土体弹性模量、含水率、黏聚力	35
施工参数	推进推力、注浆压力、推进速度	40
空间条件	邻近净距(L/D)、穿越角度	25

3.2. 核心因素影响规律

3.2.1. 邻近净距(L/D)的影响

邻近净距是影响扰动程度的关键因素:

当 $L/D \geq 5$ 时, 地铁结构沉降量 ≤ 1 mm, 扰动影响轻微;

当 $3 \leq L/D < 5$ 时, 沉降量 $1\sim 3$ mm, 扰动影响中等;

当 $L/D < 3$ 时, 沉降量 > 3 mm, 扰动影响显著, 需重点防护。

数值模拟结果显示, $L/D = 2$ 时的沉降量是 $L/D = 5$ 时的 4.2 倍, 表明近距离穿越时扰动呈非线性增长[9]。

3.2.2. 施工参数的影响

推进推力: 推力控制在地层承载力的 80%~90%时, 扰动最小; 推力过大($> 110\%$ 地层承载力)会导致水平位移增加 30%;

注浆压力: 注浆压力宜为地层压力的 1.1~1.3 倍, 压力不足会导致地层损失率提升, 压力过高则易引发管片上浮;

推进速度: 软土地区推进速度以 20~30 mm/min 为宜, 速度过快(> 40 mm/min)会导致注浆不充分, 沉降量增加 25%。

3.2.3. 地层条件的影响

软土(弹性模量 $E = 5\sim 10$ MPa)地区: 扰动传递距离远, 沉降量大, 是硬岩地区的 2.5~3 倍;

富水砂层: 地下水渗流加剧细颗粒流失, 沉降量较非富水地层增加 40%, 且易引发不均匀沉降。

4. 扰动防护技术体系构建

基于扰动机理与影响因素分析, 构建“源头优化 - 过程调控 - 工程防护”三级防护技术体系, 实现全流程扰动控制。

4.1. 源头优化措施(一级防护)

4.1.1. 施工参数优化

推力动态调整: 基于地层承载力测试结果, 通过盾构机实时监测数据反馈, 调整推进推力, 控制在 80%~90%地层承载力范围内;

注浆参数优化：同步注浆采用水泥 - 水玻璃双液浆，凝结时间控制在 30~60 s，注浆压力为地层压力的 1.1~1.3 倍，注浆量为理论空隙体积的 1.2~1.5 倍；

推进速度控制：软土地区速度 20~30 mm/min，富水地层降至 15~25 mm/min，确保注浆充分[10]。

4.1.2. 地层预处理

注浆加固：对盾构隧道与地铁线路之间的地层进行超前注浆加固，采用水泥浆或复合注浆材料，加固后土体弹性模量提升至 15 MPa 以上，减小扰动传递；

降水处理：富水地层中，采用深井降水将地下水位降至盾构隧道底部以下 1~2 m，阻断地下水渗流路径。

4.2. 过程调控措施(二级防护)

4.2.1. 实时监测预警

建立“盾构参数 - 地层变形 - 地铁结构”三位一体监测体系：

盾构参数监测：实时监测推力、扭矩、注浆压力等，设定预警阈值(如推力超地层承载力 10% 报警)；

地层变形监测：采用测斜仪、沉降标监测土体位移，监测频率为每 2 小时 1 次；

地铁结构监测：在邻近地铁隧道内布设沉降观测点、应变计，轨道平顺性监测频率为每日 1 次，当沉降速率>0.5 mm/d 时启动应急响应。

4.2.2. 动态参数调整

基于监测数据，通过盾构机 PLC 控制系统动态调整施工参数：若监测到地铁结构沉降增大，立即降低推进速度，提高注浆压力；若出现水平位移超标，调整盾构姿态，减小侧向推力。

4.3. 工程防护措施(三级防护)

4.3.1. 隔离防护

隔离桩防护：在盾构隧道与地铁线路之间设置钢筋混凝土隔离桩(桩径 600 mm~800 mm，桩长超过盾构隧道底部 2 m~3 m)，桩间距为桩径的 1.5 倍，形成隔离屏障，阻断扰动传递；

注浆帷幕：采用高压旋喷注浆形成连续注浆帷幕(厚度≥1.5 m)，适用于富水砂层，兼具隔离与加固作用。

4.3.2. 地铁结构加固

管片加固：在邻近盾构施工一侧的地铁管片表面粘贴碳纤维布(层数 2~3 层)或钢板，提升结构抗变形能力；

轨道加固：临时增设轨距拉杆、轨枕加固装置，控制轨道变形，施工完成后拆除。

5. 工程应用案例

5.1. 工程概况

某城市新建盾构隧道(直径 D = 6.2 m)平行邻近既有地铁 3 号线(盾构隧道，直径 5.5 m)，邻近段长度 85 m，最小净距 L = 12.4 m(L/D = 2.0)，穿越地层为软土(弹性模量 E = 8 MPa，含水率 32%)，地下水位埋深 1.8 m。新建隧道施工若控制不当，易导致既有地铁结构沉降超标。

5.2. 防护措施实施

采用“源头优化 + 过程调控 + 工程防护”复合方案：源头优化：推进推力控制在 1200~1400 kN (地层承载力的 85%)，注浆压力 0.3~0.5 MPa，推进速度 25 mm/min；对两隧道之间地层进行超前注浆

加固, 加固范围宽 3 m、厚 2 m; 过程调控: 布设 20 个沉降观测点、10 个应变计, 监测频率 2 小时/次, 建立数据预警平台; 工程防护: 设置钢筋混凝土隔离桩(桩径 700 mm, 桩长 15 m, 桩间距 1.0 m), 形成隔离屏障。

5.3. 数值模拟对比设计

为量化防护措施效果, 建立 FLAC3D 数值模型, 设置 3 组对比工况, 模型涵盖盾构隧道、既有地铁线路、周边地层及防护结构, 地层采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 管片与隔离桩采用弹性本构模型, 模拟盾构掘进全过程(开挖 - 管片拼装 - 注浆)。(见表 2)

Table 2. Shield construction working condition parameters under different protective measures

表 2. 不同防护措施下的盾构施工工况参数表

工况编号	防护措施组合	核心模拟参数
工况 1	无任何防护措施	推进推力 1300 kN, 注浆压力 0.4 MPa, 无隔离桩、无地层预处理
工况 2	近地层预处理	推进推力 1300 kN, 注浆压力 0.4 MPa, 含地层超前注浆加固, 无隔离桩
工况 3	完整复合防护(地层预处理 + 隔离桩 + 动态参数调控)	推进推力 1200~1400 kN (动态调整), 注浆压力 0.3~0.5 MPa, 含地层加固 + 隔离桩

5.4. 模拟与实测结果对比分析

5.4.1. 不同工况沉降量对比

数值模拟与工程实测数据显示, 防护措施对沉降控制效果显著, 完整复合防护方案的控沉效率最优。(见表 3)

Table 3. Comparison of settlement amounts under different working conditions

表 3. 不同工况沉降量对比

监测指标	工况 1 (无防护)	工况 2 (仅地层预处理)	工况 3 (完整复合防护)	规范限值	实测值 (工况 3)
最大沉降量(mm)	11.6	5.3	2.7	3.0	2.8
最大水平位移(mm)	4.8	2.5	1.1	2.0	1.2
管片最大应力(MPa)	12.3	8.7	5.2	10.0	5.1

注: 工况 3 模拟值与实测值误差 $\leq 3.6\%$, 验证了数值模型的可靠性。

5.4.2. 既有线变形时程特征

既有三级防护技术体系逻辑关系显示(见图 1):

盾构掌子面前方 5D 范围内(掘进前期), 沉降量缓慢增长, 工况 1 增长速率达 0.32 mm/m, 工况 3 仅 0.08 mm/m, 隔离桩与地层预处理显著抑制了超前扰动;

掌子面通过当天至后续 7~10 天(掘进中期), 沉降进入快速增长阶段, 工况 1 日均沉降 0.9 mm, 工况 3 仅 0.15 mm, 动态参数调控有效抵消了注浆不充分引发的沉降增量;

掘进完成后 30 天(稳定期), 工况 1 最终沉降 11.6 mm, 工况 3 稳定在 2.7 mm, 无后期沉降回弹, 表明防护措施形成了长期稳定的抗扰体系。

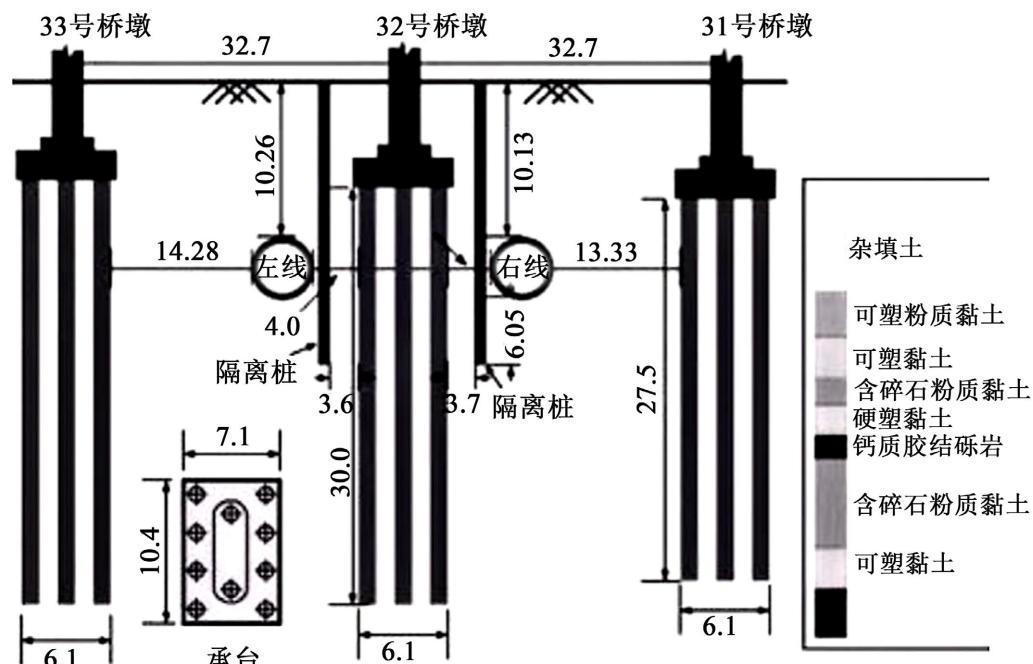


Figure 1. Three-level prevention and control technology system
图 1. 三级防护技术体系

5.4.3. 应用效果验证

施工期间及完成后 6 个月监测数据表明: (见表 4)

Table 4. Statistics of monitoring results
表 4. 监测结果统计

监测指标	最大值	规范限值	达标情况
结构沉降量(mm)	2.8	3.0	达标
水平位移(mm)	1.2	2.0	达标
接缝张开量(mm)	0.2	0.3	达标
轨道高低偏差(mm)	1.0	1.5	达标

- 1) 既有地铁隧道最大沉降量 2.8 mm, 满足 GB50446-2017 规范要求(≤ 3 mm);
- 2) 管片最大水平位移 1.2 mm, 接缝张开量 ≤ 0.2 mm;
- 3) 轨道高低偏差 ≤ 1 mm, 水平偏差 ≤ 0.8 mm, 未影响地铁正常运营。

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

- (1) 盾构施工对邻近地铁线路的扰动是地层损失、应力重分布、地下水扰动共同作用的结果, 扰动传递路径为“盾构掘进→土体变形→结构响应”;
- (2) 关键影响因素中, 施工参数(权重 40%)与邻近净距(权重 25%)是核心控制因素, $L/D < 3$ 时扰动显著加剧;

- (3) 构建的三级防护技术体系效果显著，“地层预处理 + 隔离桩防护 + 动态参数调控”复合措施可将地铁结构沉降控制在 3 mm 以内；
- (4) 软土、富水地层中，需重点控制注浆质量与地下水渗流，避免不均匀沉降。

6.2. 研究展望

未来可进一步开展以下研究：极端工况(如地震、暴雨)下施工扰动与运营荷载的耦合影响；新型智能监测技术(如光纤传感、数字孪生)在扰动预警中的应用；生态环保型防护材料(如生物注浆材料)的研发与应用。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 2023 中国城市轨道交通年度统计和分析报告[R]. 2024.
- [2] 李兴高, 张弥. 盾构隧道近距离穿越既有地铁的施工扰动控制[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(3): 45-52.
- [3] Peck, R.B. (1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 22-30 August 1969, 225-233.
- [4] Attewell, P.B. and Woodman, J. (2016) Settlement of Buildings Due to Tunneling. *Ground Engineering*, 49, 32-38.
- [5] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道施工技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [6] 张项立, 吕勇刚. 盾构施工对邻近结构的影响及防护[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 398-408.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50446-2017 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [8] 王梦恕. 隧道工程施工技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [9] 陈馈, 洪开荣. 盾构施工技术现状与发展趋势[J]. 施工技术, 2022, 51(10): 1-6.
- [10] 周文波. 盾构施工参数优化与地层扰动控制[J]. 地下工程与隧道, 2020(2): 35-39.