

岩土工程盾构隧道施工对周边环境影响研究

刘鹏峰

江西省中环岩土工程勘察院有限公司 江西南昌 330000

摘要: 本文以岩土工程盾构隧道施工为研究对象,通过理论分析、数值模拟与工程案例相结合的方法,系统探讨了盾构施工对周边环境的影响机制、关键影响因素及防控措施。研究表明,盾构施工引起的地层位移、地下水扰动、振动与噪声是主要环境问题,其影响程度与地质条件、施工参数及支护措施密切相关。基于三维有限元模拟与现场监测数据,提出了以“地层预加固-施工参数优化-实时监测反馈”为核心的环境影响控制体系,为类似工程的环境风险管理提供了理论依据与技术支持。

关键词: 岩土工程;盾构隧道施工;影响机制;关键影响因素;防控措施

引言

随着城市化进程的加速,地下空间开发已成为缓解城市交通拥堵、优化城市布局的重要手段。盾构隧道凭借其施工效率高、对地面交通干扰小等优势,被广泛应用于地铁、市政管道等工程领域。然而,盾构施工过程中不可避免地会对周边地层产生扰动,可能导致地表沉降、管线破裂、建筑物倾斜等环境问题。据统计,2010-2022年我国因盾构施工引发的周边环境事故占地下工程事故总数的35%,造成直接经济损失超50亿元。因此,深入研究盾构施工对周边环境的影响机制,建立科学的预测与防控方法,对保障工程安全与环境稳定具有重要意义。

一、盾构施工对周边环境的影响机制

(一) 地层位移效应

盾构施工引起的地层位移是最主要的环境问题,其过程可分为三个阶段:开挖面失稳、盾体摩擦与管片拼装、盾尾注浆不足。开挖面失稳是由于支护压力不足导致前方土体坍塌,形成径向位移,根据太沙基极限平衡理论,安全系数需满足 $K \geq 1.2$,否则易引发塑性区扩展。盾体与地层间的摩擦产生剪切变形,管片拼装间隙(通常为10-30mm)造成地层损失,引起环向沉降,该阶段地层损失占总损失量的40%-60%。盾尾空隙若未及时填充,将形成“空洞效应”,导致后期沉降,工程实践表明同步注浆填充率需达95%以上,方可有效控制地层位移^[1]。

(二) 地下水扰动效应

盾构施工对地下水的影响主要表现为水位下降和水质污染。盾构机穿越含水层时,若密封性能不佳,将导

致地下水流失,形成降落漏斗,某地铁区间施工曾因盾尾密封失效使周边300m范围内地下水位下降2.5m,引发地面塌陷。施工废浆含膨润土、添加剂等,若处理不当,可能渗入地下水系统,导致pH值升高1-2个单位及重金属离子超标,如 Cr^{3+} 浓度可达0.5mg/L。

(三) 振动与噪声影响

盾构施工振动主要源于刀盘切削地层及盾构机推进,其振动频率多为10-50Hz,传播距离可达50-100m。根据《城市区域环境振动标准》(GB10070-88),居民区内昼间振动限值为70dB,而盾构施工振动峰值可达85dB,易引发周边建筑物结构疲劳损伤。噪声污染主要来自机械运转,声压级通常为80-95dB(A),需采取隔声屏障、消声器等措施控制^[2]。

二、关键影响因素的量化分析

(一) 地质条件的影响

地质条件作为环境影响程度的基础性决定因素,其对盾构施工扰动的控制作用通过地层物理学特性直接体现。基于100组典型工程案例的统计分析显示,不同岩土层的地表最大沉降呈现显著差异:淤泥质黏土地层沉降值达25-40mm,粉细砂地层为15-25mm,中风化砂岩地层仅5-10mm,软弱地层沉降量约为硬质岩层的4-8倍。进一步回归分析表明,在渗透系数 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 区间内,每提升一个数量级,地表沉降速率呈指数型增长,增幅达1.8倍,揭示了地下水渗透路径对地层稳定性的放大效应。

(二) 施工参数的敏感性分析

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计,选取盾构推进速度($v=30-50\text{mm/min}$)、刀盘扭矩($T=2000-3000\text{kN}\cdot\text{m}$)、同

步注浆压力 ($P=0.3\sim 0.5\text{MPa}$)、出土量 ($Q=95\%\sim 105\%$ 理论值) 四个关键参数, 以地表累积沉降为响应指标进行方差分析。结果显示各参数敏感性系数排序为: 注浆压力 (0.32) > 出土量 (0.28) > 推进速度 (0.22) > 刀盘扭矩 (0.18), 其中注浆压力的贡献率占比达 32%, 验证了注浆参数通过控制管片间隙填充率 ($R^2=0.87$) 成为地层位移控制的核心变量。

(三) 周边构筑物的响应特性

基于 PLAXIS3D 建立的三维耦合模型显示, 邻近建筑物基础形式对施工扰动响应存在显著差异。以三层砖混结构为例, 采用 $\Phi 600$ 钻孔灌注桩 (桩长 15m) 时, 基础最大沉降量为 12.5mm, 较天然地基 (21.6mm) 减少 42%, 桩土应力比达 3.8。规范对比分析表明, 框架结构水平位移限值 ($H/500$, H 为建筑高度) 较砌体结构 ($H/400$) 严格 20%, 需针对桩基础建筑物采用预加固措施 (如袖阀管注浆), 使差异沉降控制在 $0.002L$ (L 为基础长度) 以内。

三、环境影响预测与监测技术

(一) 数值模拟模型构建

基于 MidasGTSNX 软件, 建立盾构施工三维有限元模型, 采用修正剑桥模型模拟软黏土的弹塑性行为, 摩尔-库伦模型模拟砂土剪切破坏^[3]。通过“单元生死”技术实现盾构机推进与管片拼装的动态模拟, 注浆体采用时间硬化模型模拟强度增长。以某地铁区间施工为例, 将模型计算的地表沉降值 (28.5mm) 与现场监测值 (27.8mm) 对比, 误差仅 2.5%, 验证了模型的可靠性。

(二) 现场监测方案设计

监测内容包括地层位移监测、地下水监测和振动与噪声监测。沿隧道轴线布设沉降观测点, 间距 10~15m, 采用全站仪按二等水准精度测量, 数据采样频率为 1 次/天。在隧道两侧 30m、50m、100m 处设置水位观测孔, 实时记录水位变化, 每月采集水样检测 pH 值、COD、重金属离子等指标。采用振动加速度传感器 (量程 $0\sim 100\text{m/s}^2$) 和噪声频谱分析仪, 在施工区周边 20m、50m 处布设监测点, 连续监测 24 小时。

(三) 预测模型的工程验证

以某地铁 2 号线区间隧道工程为实例, 选取穿越密集既有建筑群的关键施工段, 运用本文构建的三维地层-结构耦合预测模型开展地表沉降模拟分析。数值模拟结果表明, 隧道施工全过程中地表沉降槽呈现典型正态分布特征, 最大沉降值 32.6mm 出现在隧道轴线上正

方, 沉降影响范围横向扩展至隧道中线两侧约 1.5 倍洞径区域。通过与自动化监测系统获取的 128 组实测数据对比, 实际施工引发的最大沉降量为 31.9mm, 预测值与监测值的相对误差仅 2.2%, 且沉降随施工工序的变化趋势高度吻合, 验证了该预测模型在复杂地质条件下的高精度预测能力。

四、环境风险防控技术体系

(一) 地层预加固技术

针对富水软弱地层施工易引发塌方、涌水及过量沉降的风险, 创新采用“超前注浆改良+管棚刚性支护”的复合加固体系。超前小导管注浆设计参数为: 选用 $\Phi 42\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 热轧无缝钢管, 单根长度 3~5m, 环向间距 30cm 呈梅花形布置, 采用水泥-水玻璃双液浆 (水灰比 1: 1, 水玻璃浓度 35Be¹) 进行分段注浆, 有效加固范围达开挖轮廓线外 2m, 经现场取芯检测显示加固后地层弹性模量提升至 1.5~2 倍, 黏聚力提高 40% 以上。管棚支护体系采用 $\Phi 108\text{mm} \times 6\text{mm}$ 无缝钢管, 单节长度 6m, 通过丝扣连接形成 15~20m 长管棚, 利用管棚钻机以 1° 外插角精准打入, 形成跨度达 12m 的刚性棚架结构, 配合管内注浆工艺, 可将开挖面上方地层变形控制在 3mm 以内。

(二) 施工参数优化策略

基于敏感性分析结果, 提出施工参数优化区间。注浆压力宜控制在 1.2~1.5 倍静止土压力, 对淤泥质地层取上限, 砂卵石地层取下限。出土量严格控制在理论开挖量的 98%~100%, 超挖量每增加 1%, 地表沉降增加 3~5mm。软弱地层中宜采用 20~30mm/min 的低速推进, 减少对土体的扰动。

(三) 实时监测与智能预警系统

构建“监测-分析-预警-调控”闭环系统。数据采集层采用物联网技术, 集成 GPS、倾角传感器、渗压计等设备, 实现环境参数的实时传输 (采样频率 1Hz)。数据分析层基于 BP 神经网络算法, 建立地表沉降与施工参数的映射模型, 预测未来 24 小时变形趋势。预警调控层设定三级预警阈值 (黄色 20mm、橙色 30mm、红色 40mm), 当达到橙色预警时, 自动触发注浆压力调整指令, 实现施工参数的动态优化。

五、工程案例验证

(一) 工程概况

上海地铁 14 号线某区间隧道, 全长 1.8km, 采用直径 6.34m 土压平衡盾构机施工。该隧道需穿越北外滩历

史建筑群，其中距隧道轴线仅8m处有一栋百年砖木结构老宅（2层，条形基础，基础埋深1.2m），其墙体已存在多条裂缝（最大宽度0.5mm），对沉降极为敏感（设计允许最大沉降 $\leq 10\text{mm}$ ）。穿越段地层从上至下为：①填土层（厚2m）、②淤泥质黏土层（厚10m，天然含水率58%，压缩模量2.3MPa）、③粉质黏土层（厚5m），地下水位埋深0.8m，施工难度极大。

（二）防控措施实施

针对既有建筑保护需求，采取“分层加固+精细施工+动态监测”的综合方案：

1. 地层预加固

隧道开挖轮廓外3m范围采用 $\Phi 800\text{mm}$ 高压旋喷桩（间距60cm，桩长15m）形成止水帷幕，水泥掺量30%，28d无侧限抗压强度达2.5MPa；

老宅基础下方采用袖阀管注浆（注浆压力0.3–0.5MPa），注入水泥–水玻璃双液浆（凝胶时间30–60s），使基础下3m范围内土体承载力特征值从80kPa提升至150kPa。

2. 施工参数优化

推进速度严格控制在15–20mm/min（常规速度的50%），刀盘扭矩维持在2200–2500kN·m（避免超扭矩切削扰动）；

同步注浆采用早强型浆液（水灰比1:1.1，掺加3%膨胀剂），注浆压力0.4–0.45MPa（为静止土压力的1.3倍），确保盾尾空隙填充率达98%以上；

出土量精确控制在理论值的99%（每环超挖量 $\leq 0.5\text{m}^3$ ），通过土压平衡系统实时调节仓内压力（波动范围 $\leq \pm 0.02\text{MPa}$ ）。

3. 监测系统布设

老宅墙体布设12个裂缝监测点（精度0.01mm）、4个沉降观测点（采用LeicaTS60全站仪，测量精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ），数据采集频率1次/2h；

隧道轴线两侧20m范围内布设20个地表沉降点（间距5m）、3个测斜管（深度15m），实时监测地层位移；

盾构机搭载姿态监测系统（精度 $\pm 1\text{mm}$ ），与地面监测数据联动分析。

（三）实施效果

盾构穿越老宅期间（历时12天），监测数据显示：地表最大沉降11.2mm（位于隧道轴线正上方），老

宅基础累计沉降8.7mm，差异沉降0.0012L（L为基础长度），均小于设计限值；

墙体原有裂缝宽度最大增加0.1mm，未出现新裂缝；地下水位波动幅度 $\leq 0.3\text{m}$ ，振动峰值（72dB）和噪声值（昼间75dB、夜间55dB）均符合国家标准。

工程通过精细化管控，实现了百年建筑的“零损伤”保护，其“微扰动施工”技术被纳入《历史建筑周边地下工程施工技术规程》。

结语

本研究通过理论分析、数值模拟与工程实践相结合的方法，系统探讨了盾构隧道施工对周边环境的影响机制及其防控措施。研究表明，地层位移、地下水扰动、振动与噪声是主要的环境问题，其影响程度受地质条件、施工参数及支护措施的显著制约。针对软弱地层，超前注浆与管棚支护技术可有效提升地层稳定性；施工参数优化则需重点关注注浆压力、出土量与推进速度的合理控制。此外，实时监测与智能预警系统的应用为环境风险管理提供了重要保障。研究成果不仅为类似工程提供了科学依据和技术支撑，也为进一步深化多因素耦合作用及长期环境效应的研究奠定了基础。未来研究应加强大数据与人工智能技术的融合，以实现更精准的预测与更高效的防控。

参考文献

- [1] 魏纲, 郝威, 魏新江, 等. 盾构隧道内竖向顶管施工室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022(001): 044.
- [2] 魏纲, 张鑫海, 林心蓓, 等. 基坑开挖引起的旁侧盾构隧道横向受力变化研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 11. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0340.
- [3] 王瑞, 朱航骏, 王哲, 等. 近距离叠交盾构隧道施工技术研究[J]. 江西建材, 2022(4): 221–222.
- [4] 毕景佩, 易领兵, 杜明芳, 等. 紧贴桥梁桩底某暗挖区间施工对桥桩的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 020(006): 2448–2456. DOI: CNKI: SUN: KXJS.0.2020–06–049.
- [5] 李铮, 于静涛, 许浩东. 船舶抛锚和沉船对跨海盾构隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S01): 480–487.