

城市地铁施工周边建筑物保护施工措施研究

岳双存

中国建筑第六工程局有限公司 天津 300450

摘要：本文围绕地铁施工周边建筑物保护展开研究，梳理深基坑、盾构、浅埋暗挖三类主流施工工艺，剖析地层变形、建筑损伤机理，结合建筑结构、空间位置完成施工风险三级分级。从前期防控、地层加固、建筑本体防护、分工艺管控搭建全套保护体系，构建动态监测与应急管控机制，依托实际工程验证措施成效，剖析现场施工短板，结合数字化、绿色施工理念提出优化对策，可为城区密集建筑群地铁施工防护提供实操参考。

关键词：城市地铁施工；周边建筑物；保护施工措施

引言：现阶段城市地铁建设多穿行中心城区，沿线老旧砖混、浅基础建筑密集，基坑开挖、掘进降水极易诱发土体沉降，引发建筑开裂、倾斜甚至失稳病害，施工安全管控难度大幅提升。为规避施工扰动损伤既有建筑，本文立足地铁三类核心施工工艺，深挖地层变形与建筑破坏机理，划分施工风险等级，整合差异化防护施工技术，配套动态监测管控方案，结合工程实例验证方案可行性，破解城区地铁施工建筑保护难题。

1 城市地铁施工对周边建筑物损伤机理及风险分级分析

1.1 城市地铁主流施工工艺梳理

(1) 地铁深基坑开挖施工工艺特点：采用分层分段开挖、及时架设支撑体系，依靠围护结构（地连墙、灌注桩等）控制侧向变形，但开挖卸荷仍会导致坑底隆起及坑外土体沉降，影响临近建筑物基础。(2) 盾构法隧道施工工艺扰动特性：盾构推进过程中刀盘切削土体、盾壳摩擦、同步注浆及二次注浆等环节均产生地层扰动，主要表现为地表沉降、水平位移及深层土体移动，注浆不足或超挖时扰动加剧。(3) 浅埋暗挖法施工地层扰动规律：遵循“管超前、严注浆、短进尺、强支护、快封闭、勤量测”原则，开挖引起地层应力重分布，产生先行沉降、开挖面沉降及后期固结沉降，扰动范围与埋深、跨度密切相关。

1.2 地铁施工诱发地层变形机理

(1) 土体开挖卸荷引发地层沉降机理：开挖卸除原状土体应力，坑底产生回弹，围护墙后土体向坑内位移，形成地层损失，导致地表沉降槽，沉降量与开挖深度、土质及支撑刚度相关。(2) 施工降水造成土体固结收缩原理：降水降低地下水位，土体有效应力增加，孔

隙水压力消散，土颗粒重新排列，产生体积压缩，引发分层沉降及地表长期沉降，粉细砂层中易产生流砂、管涌。(3) 盾构注浆、掘进扰动土体位移机制：盾构超挖形成环形空隙，注浆填充不及时导致地层向空隙移动；掘进时正面压力过大或过小分别引起地表隆起或塌陷，注浆压力及浆液收缩性直接影响土体最终位移。

1.3 建筑物损伤类型与破坏机理

(1) 建筑物基础不均匀沉降病害：地基差异沉降导致基础拉裂或折断，上部结构产生附加应力，表现为门窗倾斜、地面开裂，严重时基础失稳。(2) 建筑墙体、梁柱结构性裂缝损伤：沉降引起的拉、剪应力超过构件抗拉强度时，墙体产生八字形、倒八字形或斜向裂缝；梁柱节点处出现受剪裂缝，降低结构整体性。(3) 建筑整体倾斜、构件脱空破坏机理：差异沉降使建筑物产生刚体转动，倾斜率超限导致重心偏移、稳定性丧失；局部基础脱空使上部构件处于悬挑状态，引发梁柱节点脱开、楼板断裂。

1.4 周边建筑物风险等级划分

(1) 建筑物自身基础、结构、建成年限评估指标：基础形式（条形、独立、筏板、桩基）、结构类型（砌体、框架、框剪）、建成年限及现状完好度，老旧砖混结构抗力最弱。(2) 建筑与地铁隧道空间位置风险判定标准：隧道正上方或邻近侧方、水平距离（0.5~1 倍洞径）、重叠段夹角、埋深比（H/D）及偏转角，越近风险越高。(3) 施工扰动下建筑物三级风险分级标准：Ⅰ级（红色）——沉降超 30mm、倾斜超 3‰、出现严重结构裂缝；Ⅱ级（橙色）——沉降 15~30mm、倾斜 2~3‰、轻微裂缝；Ⅲ级（黄色）——沉降小于 15mm、倾斜小于 2‰、无结构损伤^[1]。

2 城市地铁施工周边建筑物通用及专项保护施工措施

2.1 施工前期前置防控保护措施

(1) 施工前建筑物现状勘察、裂缝建档检测: 采用高精度全站仪、水准仪对周边建筑物进行初始沉降与倾斜测量, 建立三维位移基准点; 对墙体、梁柱及门窗洞口进行裂缝普查, 记录裂缝位置、形态、长度及宽度, 使用裂缝测宽仪量化并拍照建档, 绘制裂缝分布图, 对既有损伤设置示踪标记, 为施工期监测提供原始依据^[2]。(2) 施工方案优化与建筑避让线路调整: 结合地质勘察报告和建筑物分布, 优化隧道纵断面线形, 优先从建筑物侧方绕行或增大垂直净距, 避免正下方穿越高敏感建筑; 深基坑设计时加大围护结构嵌固深度、增设角撑或对撑控制变形量; 对无法避让的重要建筑, 预设跟踪注浆管并制定动态调整参数等预案。(3) 施工场地地下水预处理管控措施: 施工前开展抽水试验, 查明水文地质参数及降水影响半径; 采用深井降水结合帷幕截水技术, 在基坑外侧设置高压旋喷桩或 TRD 水泥土墙, 切断坑内外水力联系; 布设回灌井系统, 根据水位变化自动控制回灌量, 维持周边地下水平衡, 防止因降水引发土体固结沉降。

2.2 地层土体加固施工保护措施

(1) 隧道周边土体袖阀管注浆加固工艺: 在盾构或暗挖隧道轮廓外 0.5~2.0m 范围内布设袖阀管, 孔间距 1.0~1.5m, 采用分段后退式注浆工艺; 浆液选用水泥-水玻璃双液浆, 初凝时间 30~60 秒, 注浆压力 0.3~0.8MPa, 通过注浆填充孔隙、提高地层弹性模量, 减少开挖引起的土体位移。(2) 基坑外侧隔离桩、地下连续墙阻隔施工技术: 在基坑围护结构与受保护建筑物之间设置隔离桩(钻孔灌注桩或钢板桩), 桩径 600~1000mm, 形成“桩墙”屏障; 对变形要求严格的建筑采用地下连续墙作为永久隔离结构, 切断土体剪切滑动面和应力传递路径, 有效减小基坑开挖对建筑物的水平及竖向扰动^[3]。(3) 软土、砂卵石地层土体预固结施工措施: 针对软土地层采用真空联合堆载预压法, 铺设排水砂垫层并插入塑料排水板, 抽真空维持 80kPa 以上负压, 使土体提前完成固结沉降; 针对砂卵石地层采用超前深孔注浆或化学浆液填充架空孔隙; 对富水砂层可辅助采用人工地层冻结法, 从源头抑制地层变形。

2.3 建筑物本体加固防护施工措施

(1) 老旧建筑基础锚杆静压桩托换加固技术: 在条形或独立基础两侧开凿压桩孔, 埋设锚杆并安装压桩架, 利用建筑物自重反力将预制方桩分段压入持力层,

桩顶与原基础通过微膨胀混凝土浇筑连接, 有效限制差异沉降, 适用于浅基础老旧建筑。(2) 建筑墙体、承重构件补强加固施工工艺: 对开裂墙体清除抹灰层后铺设双向钢筋网, 喷射 M10 水泥砂浆或 C20 细石混凝土, 厚度 40~60mm; 对混凝土梁柱根据裂缝宽度选择粘贴碳纤维布或包钢加固, 必要时采用增大截面法, 提高构件刚度和抗裂能力, 加固前需对裂缝进行低压注浆封闭^[4]。(3) 古建筑、砖混结构专项轻量化保护措施: 采用微孔压力注浆修复墙体内部裂隙, 注浆压力不超过 0.2MPa, 材料选用无收缩环氧树脂或石灰基浆液; 在关键节点设置可调钢支撑或木楔临时顶撑; 施工中禁止使用强振设备, 隧道通过时采用人工挖掘或铣槽机, 同时布设光纤光栅传感器进行 24 小时微变形监测, 预警值按常规标准 50% 控制。

2.4 分施工工艺差异化保护措施

(1) 深基坑开挖分段分层开挖控损措施: 严格遵循“分层、分段、对称、均衡、限时”原则, 每层开挖高度 1.5~2.0m, 分段长度 15~20m; 每开挖一段后在 6 小时内完成支撑安装并施加预应力; 在邻近建筑物一侧增设土体深层位移监测孔, 并预留补偿注浆管, 变形超预警时立即进行跟踪注浆抬升。(2) 盾构掘进参数优化、同步注浆控沉降措施: 土压平衡盾构机设定密封舱压力为静止土压力的 0.9~1.1 倍, 掘进速度 3~5cm/min, 刀盘转速 1.5~2.0rpm; 同步注浆量按理论空隙的 150%~200% 控制, 注浆压力 0.2~0.5MPa, 浆液采用高流动性、低收缩性水泥砂浆; 每环掘进后及时二次补压注浆, 确保管片背后空隙完全充填, 将地表沉降控制在 10mm 以内。(3) 暗挖法小导洞、短进尺弱扰动施工管控措施: 采用交叉中隔壁法或双侧壁导坑法, 将大断面分割为多个小导洞, 每个导洞宽 ≤ 3.5m、高 ≤ 3.0m; 每循环进尺 0.5~1.0m, 开挖后立即喷射混凝土封闭掌子面, 架设钢拱架并施作锁脚锚管; 超前支护采用小导管注浆(长 3.0~3.5m, 环向间距 0.3m), 注浆压力 0.4~0.6MPa, 通过“分块开挖、快支早强”最大限度减少对地面建筑物的扰动累积。

3 城市地铁施工监测管控、工程案例与优化对策

3.1 建筑物全过程动态监测体系搭建

(1) 地表沉降、建筑基础沉降监测点位布设: 沿隧道中线垂直方向布设沉降监测断面, 区间段间距 15~30m, 车站基坑周边加密至 10~15m; 每个断面布设 5~11 个地表测点, 覆盖沉降槽范围。建筑物基础四角、沉降缝两侧及承重墙每隔 6~10m 布设静力水准仪, 实现自动化采集与实时传输。(2) 建筑倾斜、墙体裂缝

自动化监测技术：在建筑物顶部四角及长边中点安装高精度倾角仪（精度 $\pm 0.01^\circ$ ），实时监测倾斜发展；对既有裂缝粘贴振弦式裂缝计或光纤光栅传感器（分辨率 0.01mm），数据通过无线网上传云平台，实现 24 小时在线超限报警。（3）监测预警阈值分级与应急响应机制：按风险等级设定黄、橙、红三级预警。黄色（达预警值 80%）加密监测至 1 次/天；橙色（达预警值）启动注浆补偿及加固预案；红色（超预警值 20%）立即停工、疏散人员并组织专家现场处置。

3.2 施工全过程质量与安全管控措施

（1）防护加固施工工序质量管控要点：袖阀管注浆实行压力与浆量双控，每 300~500m²取芯检验抗压强度；锚杆静压桩控制终压条件（达设计值 1.2 倍稳定 10min）及桩顶锚固质量；隔离桩墙采用声波透射法检测垂直度与完整性。（2）高危建筑周边施工人员作业管控要求：划定红色警戒区，人员实名登记并佩戴定位标签；盾构通过时隧道内作业人员限 5 人以内，暗挖掌子面设紧急呼叫装置；每季度组织防坍塌、防管线破坏应急演练。（3）极端工况下施工应急处置方案：暴雨橙色预警时加强抽排水并储备应急水泵，加密水位监测至 2 小时/次；突涌水时启用应急注浆及大功率抢险泵组，同步对建筑物顶撑临时加固；地震后迅速开展全站仪复测及结构安全评估^[5]。

3.3 实际工程案例应用分析

（1）项目工程概况、周边建筑物分布情况：某地铁区间埋深 12~18m，穿越粉质黏土及富水砂层。沿线分布 6 栋砖混老旧住宅（距基坑 8~15m）及 2 栋框架商业楼，条形基础，房龄超 30 年，已有微裂缝，评定为Ⅱ级高风险保护对象。（2）本文防护措施现场落地施工应用：施工前完成裂缝建档与线位优化；隧道周边 2m 内袖阀管注浆，基坑外侧设 $\Phi 800@1000$ 隔离桩；老旧建筑实施锚杆静压桩托换及墙体钢筋网喷混凝土加固；盾构采用土压平衡模式，同步注浆填充率 180% 并二次注浆。（3）监测数据对比与保护效果成效验证：监测显示建筑物最大沉降 9.6mm、倾斜 0.8‰，裂缝无扩展；地表沉降 8~12mm，均小于黄色预警值。与未采取综合保护的类似区段相比，建筑物沉降减小约 55%，验证了防护措施

有效性。

3.4 现存问题与措施优化改进对策

（1）现有建筑保护施工措施现场落地短板：注浆参数执行偏差，隔离桩垂直度偶有超标；场地狭窄导致托换设备无法就位；监测数据整理周期长，难以及时反馈指导施工。（2）复杂地层、密集建筑群防护措施优化方案：研发智能注浆系统实现压力/流量闭环控制；推广装配式可回收隔离桩（H 型钢 + 水泥土墙）；搭建 BIM+GIS 数字孪生平台，实现实时预警与方案自动调优。（3）绿色低碳型建筑保护施工技术发展建议：采用碱激发矿渣注浆材料，降低碳排放约 40%；推广低功耗无线电动监测设备及太阳能供电；发展微扰动冻结法和静力铣挖工艺，减少噪声及泥浆污染。

结束语

研究明确了地铁施工建筑损伤核心诱因与分级标准，形成全流程、分工艺建筑保护施工体系，工程应用证实综合措施可大幅降低建筑沉降与结构损伤。同时指出参数管控、场地施工、数据反馈现存短板，提出智能注浆、数字孪生管控、绿色低碳注浆材料等优化方案。后续可结合复杂复合地层、文保建筑工况深化技术改良，完善精细化微扰动施工工艺，持续提升城市地铁建筑保护施工水平。

参考文献

- [1] 张帅. 城市中心区地铁线路下穿既有建筑物保护技术研究 [J]. 工程技术, 2025, 8(4): 28-31.
- [2] 吴中洲, 赵洋, 徐幼建. 市域铁路盾构隧道侧穿施工对紧邻建筑物影响分析及保护措施 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(12): 162-166.
- [3] 何晟亚, 李恒一, 王志杰. 地铁盾构隧道下穿老旧建筑物结构扰动规律及精细化保护施工措施 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(5): 98-102.
- [4] 付强. 软土地区地铁深基坑施工周边建筑物风险控制与防护措施 [J]. 工程机械与维修, 2025, 4(1): 20-22.
- [5] 王鹏飞, 邹丽. 双线地铁盾构掘进周边建筑沉降机理与分级保护施工方案 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 114-118.