

市政工程对既有地铁结构的影响分析

王 洋

天津国际工程建设监理有限公司 天津 300000

摘要：市政工程对既有地铁结构的影响具有多维性。基坑开挖、顶管施工等市政作业易引发周边土体应力重分布，导致地铁结构产生沉降、位移。软土地层中土体压缩性强，沉降持续时间长；砂土地层易发生流沙管涌。施工扰动、机械荷载还会造成结构材料疲劳。需通过三维数值模拟分析位移规律，结合实时监测数据优化施工参数，严格控制变形与振动指标，确保地铁结构安全。

关键词：市政工程；既有地铁结构；影响

引言：随着城市化进程加速，市政工程建设与地下轨道交通网络的交织愈发紧密。市政工程（如基坑开挖、顶管施工、桩基工程等）在邻近既有地铁结构时，其施工扰动可能引发土体变形、振动传递及地下水环境改变，进而对地铁隧道与车站结构的稳定性、耐久性造成威胁。如何科学评估施工影响、制定有效的风险控制措施，成为保障城市轨道交通运营安全运营的关键问题。本文系统分析了相互作用机理、影响因素及控制标准，为工程实践提供理论支撑。

1 市政工程与既有地铁结构的相互作用机制

1.1 市政工程类型及施工特点

（1）基坑开挖多为明挖作业，需分层开挖并设置支护，易引发周边土体应力重分布；顶管施工属暗挖工艺，通过顶进设备推送管节，对地表扰动较小但施工空间受限；桩基工程需钻孔或静压成桩，会产生挤土效应或振动荷载，不同类型桩基（如钻孔灌注桩、预制桩）施工流程差异显著。（2）明挖基坑对地下环境影响直观，易导致土体沉降和侧向位移；顶管施工因密闭性好，对土体扰动范围较小，但顶进力过大会造成管节周边土体压缩；桩基施工中，钻孔过程可能引发水土流失，静压桩的挤土效应则易导致周边土体隆起，不同工艺对地下管线和既有结构的影响程度存在明显差异。

1.2 既有地铁结构受力特性分析

（1）地铁隧道常用圆环或矩形力学模型，需承受土压力、水压力及列车振动荷载，安全阈值通常要求结构沉降量不超过10mm，水平位移不大于5mm；车站结构多为框架式模型，需考虑竖向承载力和水平抗侧移能力，混凝土结构裂缝宽度需控制在0.2mm以内。（2）地铁隧道的薄弱环节集中在管片接缝处，此处防水和受力性能较弱；车站结构的敏感区域包括出入口通道与主体结构衔接处、换乘节点，这些部位易因应力集中产生损伤^[1]。

1.3 相互作用机理分析

（1）市政工程施工会打破原有土体平衡，基坑开挖导致坑周土体沉降，顶管施工引起管周土体径向位移，位移通过土体颗粒传递至地铁结构，引发结构变形。

（2）动态施工荷载（如打桩振动、机械碾压）会反复作用于地铁结构，导致结构材料疲劳，产生累积损伤，长期影响结构承载能力。（3）施工若破坏地下水隔水层，会引发地下水渗流，水流携带泥沙侵蚀地铁结构混凝土，降低结构耐久性，同时渗流压力可能导致结构附加变形。

2 市政工程对既有地铁结构的影响因素

2.1 地质条件因素

（1）软土地层颗粒细、压缩性高，市政工程施工易引发大幅土体沉降，且沉降持续时间长，对地铁隧道结构产生长期竖向附加力，可能导致管片开裂；砂土地层渗透性强，施工扰动易引发流沙或管涌，造成局部土体失稳，直接威胁地铁结构安全；岩层地质强度高、稳定性好，施工对周边土体扰动较小，但钻孔、爆破等作业可能产生振动波，通过岩层传递至地铁结构，引发结构微小振动累积。（2）地下水位较高时，施工若未采取有效降水措施，易导致基坑涌水、管涌，破坏土体原有结构，引发周边土体沉降，进而影响地铁结构；地下水富含腐蚀性离子（如氯离子、硫酸根离子）时，施工扰动导致地下水循环加快，会加剧对地铁结构混凝土的侵蚀，降低结构耐久性；地下水流速较快的区域，施工产生的土体颗粒流失会被水流加速，形成空洞，增加地铁结构不均匀沉降风险。

2.2 施工工艺因素

（1）明挖法施工开挖深度大、范围广，对土体扰动直接且显著，易导致地铁结构产生较大位移；暗挖法（如盾构、顶管）施工对土体扰动相对较小，但施工精

度要求高,若支护结构强度不足或支护不及时,仍可能引发土体坍塌,影响地铁结构;支护类型中,钢板桩支护整体性好、抗侧移能力强,对地铁结构保护效果较好,而土钉墙支护适用于浅基坑,在深基坑或软土地层中,对地铁结构保护作用较弱;降水措施若采用管井降水,降水速度快但易导致周边土体固结沉降,轻型井点降水对土体沉降影响较小,但降水深度有限^[2]。(2)打桩机、破碎机等施工机械作业时产生的振动荷载,会使地铁结构产生共振,导致结构连接部位松动、混凝土开裂;冲击钻钻孔时产生的冲击荷载,会直接作用于周边土体,使土体产生瞬时位移,传递至地铁结构后,引发结构短期变形;大型起重机吊装作业时,机械接地压力大,会对土体产生局部压缩,导致地铁结构局部沉降。

2.3 空间距离因素

(1)市政工程与地铁结构水平净距越小,施工对地铁结构的扰动越直接,土体位移传递距离短,地铁结构位移量越大;当水平净距小于5倍基坑开挖深度时,地铁结构受施工影响显著;垂直净距较小时,若市政工程施工位于地铁结构上方,施工机械荷载、土体自重变化会直接作用于地铁结构,导致结构竖向受力增加;若施工位于地铁结构下方,易引发地铁结构下方土体掏空,造成结构“悬空”,增加坍塌风险。(2)当多个市政工程在地铁结构周边同时施工时,各工程产生的土体扰动会相互叠加,导致土体位移量增大、变形范围扩大,地铁结构受影响程度远超单个工程施工;邻近施工的时间间隔较短时,前一工程引发的土体变形尚未稳定,后一工程施工再次扰动土体,会导致土体变形持续累积,加剧地铁结构损伤。

2.4 时间效应因素

(1)施工周期越长,地铁结构受施工扰动的持续时间越长,土体变形、振动荷载等影响因素的累积效应越明显,结构变形会随施工时间延长而逐渐增大;若施工过程中出现工期延误,长时间的基坑暴露会导致支护结构老化、土体蠕变加剧,进一步增加地铁结构的安全风险;施工完成后,土体固结沉降仍会持续一段时间,长期作用于地铁结构,可能导致结构后期变形超标。(2)软土地层中,土体在施工荷载作用下会发生蠕变,表现为土体变形随时间缓慢增加,这种变形会持续传递至地铁结构,导致结构产生长期缓慢沉降;地铁结构混凝土在长期荷载作用下会发生徐变,表现为结构变形随时间延长而增大,土体蠕变与结构徐变相互耦合,会使地铁结构变形不断累积,超出安全阈值,影响结构正常使用^[3]。

3 市政工程对既有地铁结构的影响评估方法与控制标准

3.1 评估方法体系

(1)经验公式法以Peck公式为代表,基于大量工程实践数据建立,通过输入基坑开挖深度、地层参数等指标,快速计算坑周土体沉降量及影响范围,适用于前期方案比选阶段,但未考虑地质条件复杂性,精度受限于公式适用场景,需结合实际地质修正。(2)数值模拟法借助有限元(如ABAQUS)、有限差分(如FLAC3D)等软件,构建包含土体、地铁结构、施工工序的三维模型,模拟施工全过程的土体变形与结构受力,可精准反映复杂地质与施工条件下的相互作用,但对参数选取要求高,需结合现场试验校准。(3)现场监测通过布设沉降观测点、测斜管、应力传感器等设备,实时采集地铁结构变形、土体位移数据,结合数据反演分析,修正数值模型参数,验证评估结果准确性,形成“监测-反演-优化”的闭环,为施工动态调整提供依据^[4]。

3.2 安全控制标准

(1)地铁结构变形限值需严格把控:隧道沉降/隆起量通常不超过 $\pm 10\text{mm}$,差异沉降控制在5‰以内;车站结构倾斜率不得大于3‰;混凝土结构裂缝宽度需小于0.2mm,且不得出现贯通裂缝,防止结构承载力下降。(2)振动控制方面,地铁隧道周边施工振动速度需 $\leq 5\text{mm/s}$,加速度 $\leq 0.1\text{g}$,避免振动引发结构共振或管片接缝松动;邻近地铁车站施工时,振动阈值需进一步降低,确保站内设备正常运行与乘客舒适度。(3)地下水水位变化允许范围需结合地层特性:软土地层水位降深不得超过2m,防止土体过度固结;砂土地层需控制水位下降速率,每小时不超过0.5m,避免引发流沙,同时禁止施工导致地铁结构周边水位骤升骤降。

3.3 风险评估与分级管理

(1)采用风险识别矩阵,从地质复杂度、施工难度、空间距离三个维度划分风险等级(低、中、高):如软土地层+近接($\leq 3\text{m}$)施工为高风险,岩层地质+远距($\geq 10\text{m}$)施工为低风险,明确各等级对应的管控要求。(2)基于风险评估优化施工方案:高风险项目需采用微扰动工艺(如非开挖顶管),增设抗浮锚杆或止水帷幕;中风险项目需加强监测频率(每小时1次);低风险项目可简化防护措施,实现风险与成本的平衡。

4 市政工程对既有地铁结构的影响控制与保护措施

4.1 设计阶段控制措施

(1)保护范围划定需结合地铁结构安全阈值与地质条件,通常以地铁隧道/车站结构边缘为基准,软土地层划定30-50m保护范围,砂土地层划定20-30m保护范围,岩层地质划定15-20m保护范围;避让原则优先选择与地

铁结构水平/垂直净距满足安全要求的线路,若无法避让,需通过方案论证,确保施工对地铁结构的影响控制在允许范围内,例如避开地铁结构薄弱环节(如管片接缝、车站换乘节点)。(2)结构加固方案需针对地铁结构特性制定:对隧道管片,可采用粘贴碳纤维布、外包钢套等方式增强抗变形能力;对车站结构,若施工可能引发较大沉降,可预设抗浮锚杆、增设支撑柱;预处理方案包括施工前对地铁结构周边土体进行注浆加固(软土地层采用水泥-水玻璃双液注浆,砂土地层采用高压喷射注浆),提高土体稳定性,减少施工扰动对地铁结构的传递。

4.2 施工阶段控制措施

(1)分步开挖需遵循“分层、分段、对称、限时”原则,基坑开挖每层深度不超过2m,每段长度控制在10-15m,开挖后及时施作支护结构(如土钉墙、排桩+内支撑),避免基坑长时间暴露;支护优化需根据监测数据动态调整,若发现地铁结构位移接近限值,可增加支撑密度、提高支护结构刚度(如将钢支撑替换为混凝土支撑),控制土体变形发展。(2)降水技术需采用分层降水、按需降水,通过管井或井点系统将地下水位控制在施工面以下0.5-1m,避免过度降水;回灌技术与降水同步实施,在地铁结构周边布设回灌井,将降水抽出的地下水经处理后回灌至地下,维持地铁结构周边地下水位稳定,防止因水位差引发土体固结沉降;回灌量需根据水位监测数据调整,确保回灌效果与降水速率匹配。(3)实时监测需加密监测点布设,地铁隧道每5-10m布设1个沉降观测点,车站结构每个出入口、换乘节点均需布设监测点,监测频率在施工关键阶段(如基坑开挖至底、顶管穿越地铁结构时)提高至每30分钟1次;信息化施工通过建立监测数据实时传输与分析平台,当数据接近控制阈值(如沉降达到8mm)时自动预警,施工人员根据预警信息调整工艺参数(如减缓开挖速度、增加支护强度),实现施工过程动态管控^[5]。

4.3 应急管理措施

(1)风险预警机制需设定三级预警阈值:一级预警(变形达到允许值的70%)时,加强监测频率并组织技术

会商;二级预警(变形达到允许值的85%)时,暂停施工并启动专项评估;三级预警(变形达到允许值或出现突发事件征兆)时,立即启动应急预案。应急预案需明确应急组织架构(包括施工单位、地铁运营单位、应急救援队伍)、应急物资储备(如抢险泵、注浆设备、临时支撑构件)、应急响应流程,定期开展应急演练(每季度至少1次),提升应急处置能力。(2)突发事件处置流程需快速响应:若发生基坑坍塌,立即启动边坡加固措施(如抛填沙袋、紧急注浆),同时疏散周边人员,协调地铁运营单位调整列车运行(如降速、停运);若发生地铁结构裂缝,立即停止施工,对裂缝进行封堵(采用环氧树脂灌浆),并对结构变形进行实时监测,评估裂缝对结构承载力的影响;若发生地下水突涌,立即启用抢险泵抽水,同时对突涌点进行注浆封堵,防止事故扩大,处置完成后需组织专家评估,确认安全后方可恢复施工。

结束语

市政工程与既有地铁结构的协同建设是城市地下空间高效利用的核心挑战。本文通过机理分析、多因素耦合研究及风险评估体系构建,揭示了施工扰动下地铁结构的变形规律与损伤机制。实践表明,科学划定保护范围、动态优化施工参数、强化实时监测预警,可有效控制工程风险。未来需进一步融合智能监测与数字孪生技术,完善全生命周期管理体系,为城市地下空间安全开发提供更精准的技术保障。

参考文献

- [1]李冠泽,吕云龙.某大型市政管网改造工程对既有地铁隧道变形的影响[J].建设科技,2024,(12):36-38.
- [2]李润璞,戴良岩.市政管网基坑开挖对下卧既有隧道变形的影响[J].企业科技与发展,2024,(02):125-128.
- [3]鲁海涛,刘世安,曹军辉.临近既有有线地铁站长大深基坑施工技术分析[J].水上安全,2023,(05):182-184.
- [4]乐师军.大型基坑施工对临近运营地铁影响分析[J].现代城市轨道交通,2020,(01):55-56.
- [5]张学成.新建地铁隧道下穿既有地铁施工技术研究[J].商品与质量,2021,25(19):150-151.