

城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响控制研究

屈德镇, 朱超, 姜宝

(青岛地铁集团有限公司第三建设分公司, 山东 青岛 266100)

摘要 本研究以青岛地铁8号线五四广场站换乘通道工程为例, 针对城市密集区复杂环境里暗挖施工对既有管线的影响机理和控制策略展开系统研究。依托理论分析、数值模拟和现场实践结合的路径, 建立覆盖前期精准勘测、风险分级、过程精细化管控、实时动态监测和应急联动的综合管控体系, 以期同类工程提供参考。工程实际应用表明, “刚柔并济”复合预支护、微扰动开挖及数据驱动动态调控等关键技术, 可有效控制管线沉降和变形, 保障核心区重大基础设施安全运转。

关键词 城市密集区; 地铁暗挖施工; 既有管线

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.037

0 引言

深度开发城市地下空间, 往往会和既有的、错综复杂的市政管线系统紧密交织。地铁暗挖施工造成的地层位移、水土环境变动及施工振动, 很容易引发邻近管线出现附加应力和变形, 造成渗漏、断裂乃至灾难性事故, 严重威胁公共安全和城市生命线平稳运行。尤其在地质条件复杂、管线年代久远、分布密集的城市核心区域, 该问题表现明显, 依靠经验的传统保护方法已无法达到当前安全与环保的高标准。基于此, 研究城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响至关重要。

1 暗挖施工对既有管线的影响

1.1 地层扰动引发的不均匀沉降与管线变形

暗挖施工对既有管线的直接影响是地层扰动引发的不均匀沉降导致的, 从管线下方向邻近区域开挖地下隧道, 原有土体平衡状态遭到破坏, 应力路径出现变化, 会引发周边土体向开挖临空面移位, 这种位移会借助沉降槽传递到地表及浅层土体, 直接作用于埋设其中的管线。管线不会独自悬浮在土里, 它与周围土体借摩擦力紧密结合, 土体出现位移, 会带动管线产生相应弯曲变形。采用不同材质与接口形式的管线, 耐受这类变形的能力差异显著, 带刚性接口的混凝土管或铸铁管对差异沉降反应极强, 轻度弯折就可能造成接口开裂或管体断裂; 采用柔性接口的PE管或HDPE管, 能依靠自身伸缩特性, 在一定程度上适配变形。

但拉伸或压缩幅度过大也会引发失效, 施工方案强调必须严格监测管线沉降。管线面临的最直接、最普遍的力学威胁, 就是这种由地层损失引发的强迫位移, 调控地表沉降曲线的形态和幅度是保护管线的关键^[1]。

1.2 水土环境改变导致的次生风险

暗挖施工会明显改变管线周边的水土环境, 由此催生次生风险, 开挖隧道穿透富水层、改变地下水渗流路径或引发地下水位下降, 造成渗透力, 带离管线底部及周边细颗粒土出现局部空洞或土体软化, 这类水土流失会降低对管线的支撑力, 使它在自身重量或上部荷载作用下形成局部应力集中, 甚至造成管体悬空、沉降骤然加剧或接头脱离。控制地层变形、止水所用的注浆加固工艺, 本身兼具利弊双重属性, 如施工方案运用的地表深孔注浆和帷幕注浆, 压力控制偏差或浆液配比不合理, 浆液有概率渗入管线周边土体, 甚至挤入非压力管线内部。需注意的是, 高压浆液或对老旧管线施加不均挤压力, 引发变形或破裂, 施工全程精准把控注浆参数、实时监控管线状态, 是破解这类“保护性破坏”的核心。

1.3 水土环境改变导致的次生风险

暗挖施工带来的震动会影响管线, 尤其会对它的接口长期服役性能形成潜在且累积的影响, 即便根据方案规定运用静态破碎等非爆破手段减轻强烈震动, 但大型机械作业(凿岩、破碎、出土等)、重型车辆

作者简介: 屈德镇(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地铁土建施工。

运输以及地层应力调整阶段仍会产生持续的低频振动。此类振动借助土体传至管线,维持它的持续微幅颤动,针对采用刚性连接的管线,反复微振会加速接口密封材料老化、松动,可能引发细微渗漏的慢慢加重,针对出现腐蚀或已有微裂纹的旧管线,振动产生的交变应力有概率推动疲劳裂纹延伸,减小它的承载能力,抵达特定临界点后触发突发破裂,这类影响往往隐而不现且逐步加深,常规监测无法第一时间察觉,但会显著压缩管线剩余服役寿命。在评估施工影响阶段,不可只聚焦静态的位移和应力,还要将施工期持续的动态扰动,作为管线长期安全的核心考量内容。

2 城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响控制策略

2.1 全面系统地前期调查、风险评估与协同设计

管控城市密集区地铁暗挖施工对既有管线影响的关键是开展全面、精准的前期调查和动态风险评估,基于此进行多主体配合的专项设计,此策略大幅领先传统资料收集,施工单位须主动与所有管线权属单位、市政档案管理部门开展深度对接,采取查阅竣工图纸、实施实地探挖(人工挖探沟等)、应用物探技术扫描等多种手段,建立收录管线精确平面位置、埋深、材质、管径、接口形式、使用年限、当前运行状况及历史维修记录等信息的“管线健康档案”。

需特别注意老旧管线、带柔性接口的燃气管、带承插接口的混凝土排水管等薄弱部分,要重点标识,基于这些详实内容,结合地质勘察报告及暗挖隧道设计参数,采用数值模拟等技术,预判施工造成的土体位移场变化,评估不同管线各施工阶段的理论变形与受力,科学界定风险等级,把管线风险划分为 I 级至 III 级。该控制策略的核心是把管线保护从“被动应对”调整为“主动预控”,设计阶段综合对比选取并融合永久性迁改、临时悬吊保护、原位加固等多种方案,联动地铁结构设计、施工工法选择(采用 CRD 法分步开挖控制变形)开展一体化设计,保证保护措施与工程本体深度契合,从根源阻断重大风险^[2]。

2.2 精细化的施工过程控制与地层改良技术

施工开展阶段,控制策略核心为开展精细化工艺控制及主动地层改良,全力减少对周边土体的扰动,间接实现对管线的有效保护。施工需严格执行“管超前、严注浆、短进尺、快封闭、勤量测”的原则,正式开挖隧道前,管线集中或风险偏高的区段,提前实施超前支护和地层加固。方案已有说明,用超前大管幕($\phi 299$ 钢管)搭建刚性防护棚架,预支撑上方土体;采用全

断面帷幕注浆或地面深孔注浆,让管线下方及周围的松散土体(特别是砂层)固化成整体,提升自身稳定性与抗变形能力,就像给管线打下牢固的“人工地基”。

开挖作业阶段,优先采用静态破碎、机械切削等非爆破或弱扰动施工手段,替换传统爆破,从震源头削弱振动作用,严控每循环开挖进尺,快速架设刚度达标的初期支护并及时封闭成环,缩减围岩无支护暴露时长,遏制变形扩大,竖井或基坑周边的管线,具体采用刚度较大的支护体系(方案中的倒挂井壁配合工字钢支撑)、推行分步对称开挖、及时布设预应力支撑等措施,遏制侧向土压力变动引发的位移,全流程施工操作恰似一台精准的“外科手术”,要实现的是精准干预地层行为,最大程度减小施工活动对管线的力学影响。

2.3 实时动态的监测预警与信息化施工管理

构建全覆盖、即时响应的智能监测预警体系,是管线风险动态管控的核心指挥节点。落实此策略需要构建多层立体的监测网络,既包含对管线自身状态的直接监测,还要把监测对象拓展到支撑其存在的环境——周边土体和支护结构,依照方案内容落实,需统一布设地表沉降点、隧道拱顶下沉点、净空收敛测线、土体深层位移测斜孔及地下水位观测井等,搭建“管线下覆土体→管线本体→管线上覆土体→地表”完整监测流程,全部监测数据须通过自动化采集和传输系统,实时归集到统一信息化管理平台。

该平台的关键作用是完成数据快速处理、可视化展示和智能分析,预设多级预警阈值,监测数据触及预警线,系统会马上自动报警,把信息推送给相关技术人员和管理人员,实现了从“定期巡检”到“实时感知”的跃迁,信息化施工管理的关键为“基于监测反馈的决策优化”。技术团队每日分析监测数据变化趋势,把它和施工工况(开挖位置、注浆压力、支撑架设等)做关联对比,判定现有施工参数是否合理,预估后续施工的潜在影响,排查到异常,可快速调整施工步骤、优化注浆参数或采取额外预加固措施,建立“监测→分析→决策→调整→再监测”的闭环管控循环,维持施工过程全程可知、可控。

2.4 健全应急响应机制与多方联动保障体系

即便前期工作再周全,施工控制的精细化实现路径,针对地下工程的未知风险,要建立一套响应迅捷、资源配齐、权责分明的应急响应与多方联动保障体系,这是风险控制最后一道坚实防线。该策略第一步明确组建由建设单位牵头,整合施工、监理、设计、管线权属单位及第三方监测机构的应急联动小组,厘清

各方在应急状态下的职责、联络人及通信方式,维持信息渠道无阻碍通行,要以最不利情况为假设基础,制定可落地性强的专项应急预案,预案内容需细化不同险情(管线沉降超限、渗漏、破裂等)的识别征兆、初步判断方法、首段应急处置流程(关闭阀门、疏散人员、交通管制等),以及后续专业抢修方案^[3]。

在施工现场常备应急抢险物资和设备,如各类管材、快干水泥、双液注浆机、抽水泵、发电设备等,并按期检查维护,保障它随时可用,策略的深层要义是构建制度化的沟通协调机制,要和管线权属单位固定时段会商,通报施工进度和监测状态,采纳专业见解。关键节点施工实施前,实施专项交底;执行监测预警环节,即刻联合诊断,深度融合的“路地协同”或“路企协同”,把施工方的现场管控能力和产权单位的专业处置经验统筹结合,保障突发状况出现时,可最快调动最专业的资源实施科学抢修,以最大限度压制事态扩大,降低对社会公共安全和居民生活的干扰,实现从“被动抢险”到“主动联防”的升级。

3 工程应用与效果评估

3.1 五四广场站换乘通道施工中的管线保护实践

实施青岛地铁8号线五四广场站换乘通道施工阶段,上文提到的控制策略已实现系统性集成化工程应用,为应对下穿城市核心区、紧邻多条重要市政管线和既有运营地铁线的极端复杂环境,项目团队把管线保护列为施工组织的核心,实践从最深入的前期勘探开启,联合产权单位进行现场物探与人工挖探,精准绘出管线三维分布图,重点明确横跨暗挖断面的DN300污水管、雨水管及800*200电力管线的易损空间位置,为后续设计敲定核心依据。依照“主动加固、微扰动开挖”的标准,统筹采用多种关键技术:给竖井周边施作地面深层帷幕注浆,切实稳固高含水砂层,给竖井开挖筑牢稳定边界;暗挖通道拱部部位,精准安装22米长、间距0.4米的 $\Phi 299$ 大管幕,好比在管线下方建起一座结实的“地下拱桥”,结合全断面注浆加固工艺,有效分担上部土体荷载。开挖时不用传统爆破,全流程运用静态破碎加机械凿除的工法,把施工振动减到最小,施工全周期,一套覆盖地表、管线、隧道结构的自动化监测网络不间断运转,实时数据反馈修正施工参数,构建出可动态优化的“感知—决策—执行”闭环,全流程精密管控管线变形^[4]。

3.2 控制措施实施效果分析

本工程采用的综合控制措施收到明显成效,系统监控量测数据可直接验证它的有效性,换乘通道竖井

及暗挖段全施工周期。周边关键管线(上水管、燃气管等)及地表的沉降监测数据显示,累计沉降值全部被严格管控在设计预警值区间,沉降曲线走势平缓,无任何突变或加速情况出现,证实地层扰动得到有效抑制。尤其需要留意的是,暗挖断面上横有多条浅埋管线,依托管幕与注浆联合体系的防护,变形程度远未达标,未发现管线接口因差异沉降产生泄漏或损坏,隧道内部监测同样证实,初支结构收敛和拱顶下沉数据平稳,支护体系快速闭合并维持稳定,从而证实地层预加固的成效,规避隧道变形过大拉动上部土体与管线出现有害位移。对比同类地质条件下未实施同等强度预加固措施的工程案例,本工程在沉降速率与累计变形量控制方面表现更好,切实防止因管线损坏引发的停水、断电、燃气泄漏等社会公共安全事故,保障香港中路和山东路这个交通枢纽正常运转,实现工程进度、安全和周边环境保护的高度统一^[5]。

4 结束语

本研究依托实际工程开展,完整阐释城市密集区地铁暗挖施工中管线保护面临的挑战及应对策略,综合运用精准勘探、主动预加固、微扰动工艺、智能监测与协同应急等综合措施,能对既有管线风险进行有效识别与精准管控,限定施工影响在可接受范围。五四广场站换乘通道的成功经验,更证实了上述技术与管理体系的有效性,还可为今后同类敏感环境下的地下工程建设,提供核心技术参考和决策依据,感知技术与人工智能深度结合,管线保护肯定会往更智能、更具预判性的方向走,为城市地下空间安全、高效和可持续发展夯实更牢靠的根基。

参考文献:

- [1] 申富林,钟子林,张雪松.地铁列车下穿运行振动对既有管线影响研究[J].南方职业教育学刊,2024,14(06):104-109.
- [2] 李宗,孟毅欣,易本奇,等.大断面矩形顶管超近接下穿既有管线施工控制技术研究[J].市政技术,2024,42(05):115-122.
- [3] 袁耀飞.深厚砂层顶管施工沉降控制措施技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(03):5-10.
- [4] 王冬.地铁盾构下穿大直径输水管道沉降控制技术研究[J].东北水利水电,2025(07):52-54,72.
- [5] 史江伟,王金朴.盾构开挖面失稳下既有管线三维变形特性研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(03):1057-1065.