

Research on Construction Disturbance and Tunnel Deformation Control in the Chashen Avenue Railway Culvert Project in Guangzhou

Pengfei Li

China Railway Third Group Guangdong Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511400, China

Abstract

The multiple disturbances from the intersection of urban municipal roads and subway construction pose significant risks to subway safety. Taking the box culvert project at K5+723.37 of Chashen Avenue as a case study, where the left-side box culvert is only 3.77m away from the tunnel of Phase 2 of Metro Line 13 (a special protection zone for subways), this study divides the construction into eight phases, analyzes three types of disturbance characteristics, establishes a dual deformation control system, and conducts full-cycle monitoring. The results show that the cumulative tunnel deformation ranges from -1.02mm to 1.40mm, far below the safety threshold. The maximum monitoring ratio G is 0.27, maintaining an A-grade safety level throughout the process. The preventive measures prove highly effective, and the findings provide valuable references for similar projects.

Keywords

railway culvert construction; subway tunnel; deformation monitoring; deformation control; construction disturbance; staged management and control

广州市槎神大道涉铁箱涵工程施工扰动及隧道变形管控研究

李鹏飞

中铁三局集团广东建设工程有限公司, 中国·广东 广州 511400

摘要

城市市政道路与地铁交叉施工的多重扰动易危及地铁安全。本文以槎神大道K5+723.37涉铁箱涵工程为依托,其左幅箱涵与地铁13号线二期隧道净距仅3.77m,属地铁特级保护区域。研究划分8个施工阶段,剖析三类扰动特征,构建双重变形控制体系并开展全周期监测。结果显示,隧道累计变形-1.02mm~1.40mm,远低于安全控制值,监测比值 G 最大值0.27,全程维持A级安全等级,防控措施成效显著,研究成果可为同类工程提供参考。

关键词

涉铁箱涵施工; 地铁隧道; 变形监测; 变形控制; 施工扰动; 分阶段管控

1 引言

近年来,我国城市轨道交通建设进入高速发展期,轨道交通网络持续加密,市政道路、综合管廊等基础设施与地铁线路交叉施工场景愈发普遍,邻近地铁施工安全管控已成为工程领域核心研究课题。箱涵作为城市道路排水、跨河通行的关键钢筋混凝土构筑物,施工涉及基坑支护、土方开挖、桩基施工、结构浇筑等多道复杂工序,各类工序产生的振动、竖向荷载及土层应力重分布扰动,会快速传导至邻近地铁隧道,引发周边土体不均匀沉降、管片位移、径向收敛变形等问题,轻则影响轨道平顺性,重则导致隧道开裂、渗漏水,

甚至中断运营,造成严重损失。

紧邻地铁的箱涵施工对变形控制要求更为严苛,需遵循“源头控扰、分级防护、动态监测、闭环管控”原则,针对不同施工阶段扰动特点制定差异化防控措施。广州槎神大道K5+723.37箱涵工程跨越现状煤涌,施工核心区与地铁13号线二期凰槎区间隧道最小净距仅3.77m,施工扰动传导直接,属高风险近距离涉铁项目。本文依托该工程实践,系统划分施工阶段、分析扰动规律,构建针对性变形控制体系,结合监测数据验证防控措施有效性,总结可推广的变形控制技术,为同类工程提供技术支撑。

2 工程概况

2.1 箱涵工程基本情况

槎神大道(凤凰大道-白云一线)位于广州市白云区石井、松洲街道,地处许广高速西侧、在建地铁12号线与

【作者简介】李鹏飞(1984-),男,中国河北石家庄人,本科,中级职称,从事城市道路工程施工质量和安全控制研究。

13 号线换乘站槎头站以北,为区域重点城市主干路,路线呈南北走向。K5+723.37 箱涵为跨越现状煤涌设计,煤涌顶宽约 24m、底宽约 16m、顶底高差约 3.5m,河涌走向与道路中心线呈 45° 夹角,施工场地狭小、周边管线复杂,地质含软土及局部溶洞,施工难度较高。

该箱涵采用双孔 12.5m×4m 分离式钢筋混凝土结构,顶底板厚度均为 1.05m,涵身侧墙厚度 1.25m,结构刚度较大,但施工区域紧邻地铁隧道,荷载与扰动极易影响隧道安全。工程针对性加固方案:涉铁核心区箱涵底部采用 $\Phi 0.8\text{m}@0.55\text{m}$ 水泥搅拌桩满铺加固,同步设置 3 排 $\Phi 1.2\text{m}$ 钻孔灌注桩搭配暗梁形成刚性支撑;非涉铁区域采用 $\Phi 0.5\text{m}$ 高压旋喷桩梅花形布置加固,间距 1.6m;河道两岸设 4m 宽水泥搅拌桩重力式挡墙,中间采用双排拉森 IV 钢板桩夹 2.5m 宽水泥搅拌桩导流;隧道内箱涵中心线左右各 5m 范围加设定制钢内支撑,提升抗扰动能力。截至研究节点,箱涵北侧洞体已施工完成,隧道变形全程可控。

2.2 地铁隧道变形控制标准

依据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(GB/T 50902-2013)及广州地铁集团涉铁施工专项规定,确定隧道变形核心控制指标为沿隧道水平、垂直隧道水平、竖直沉降、隧道径向收敛四项,预警值统一为 5.2mm,安全控制值统一为 6.5mm。

引入监测比值 G ($G = \text{实测变形值} / \text{安全控制值}$),划分四级预警等级: A 级 ($G < 0.6$) 可正常施工; B 级 ($0.6 \leq G < 0.8$) 触发预警,加密监测; C 级 ($0.8 \leq G < 1.0$) 暂停施工,开展安全评估; D 级 ($G \geq 1.0$) 变形超标,启动应急预案。附加管控要求:同一监测点连续两天同向变形且变形量达 2mm,直接升级为 B 级预警,强化动态管控。

3 施工阶段划分及扰动特点分析

结合箱涵施工工艺流程、进度及对隧道的扰动强度、影响方式,将全周期划分为 8 个关键阶段,扰动归纳为振动、竖向荷载、土层应力三类,其中桩基施工、基坑开挖、混凝土浇筑为重点扰动阶段,各阶段具体特征如下:

1. 钢板桩施工阶段:核心为静压打设与固定,以振动扰动为主,振动传导至浅层土体引发轻微位移,隧道变形范围 $-0.48 \sim 0.18\text{mm}$, $G=0.03 \sim 0.09$,以小幅度负向变形为主,影响极小。

2. 河道回填阶段:核心为素土分层回填压实,以竖向荷载扰动为主,荷载作用于隧道顶部引发轻微沉降,变形范围及 G 值与钢板桩阶段一致,无新增变形,土层快速稳定。

3. 隧道内支撑安装阶段:核心为钢支撑加工、运输及安装,以局部集中荷载扰动为主,负向变形小幅扩大,变形范围 $-0.93 \sim 0.70\text{mm}$, $G=0.07 \sim 0.18$,安装完成后变形快速稳定。

4. 溶洞注浆阶段:核心为低压注浆加固,以土层应力扰动为主,注浆压力使土体微膨胀,抵消部分前期负向变形,

变形范围 $-0.30 \sim 0.86\text{mm}$, $G=0.06 \sim 0.17$,正向微变形可控。

5. 水泥搅拌桩与灌注桩施工阶段:核心为搅拌桩加固、灌注桩成孔及灌注,以深层土层应力扰动为主,引发土层应力重分布,变形范围 $-0.63 \sim 0.95\text{mm}$, $G=0.06 \sim 0.18$,正负向变形同步小幅扩大,扰动突出。

6. 箱涵基坑开挖阶段:核心为分层分块开挖与边坡防护,以卸荷应力扰动为主,土层应力释放引发小幅正向隆起,变形范围 $0.12 \sim 0.84\text{mm}$, $G=0.02 \sim 0.16$,无负向沉降。

7. 底板钢筋绑扎与浇筑阶段:核心为钢筋绑扎、混凝土浇筑及养护,以集中竖向荷载扰动为主,混凝土自重引发隧道沉降,变形范围 $-1.02 \sim 1.18\text{mm}$, $G=0.02 \sim 0.23$,出现全周期最大负向变形。

8. 侧墙顶板施工阶段:核心为钢筋绑扎、支架立模、混凝土浇筑,以均布荷载与冲击荷载双重扰动为主,变形范围 $0.07 \sim 1.40\text{mm}$, $G=0.01 \sim 0.27$,出现全周期最大正向变形,整体平稳无突变。

4 箱涵各施工阶段变形控制措施

针对各阶段扰动类型、强度及变形特征,遵循源头控制、分级防护、全程管控、动态调整原则,构建“全域基础防护+分阶段专项防护”双重变形控制体系,双重体系协同发力,确保隧道变形全程可控。

4.1 全域基础变形控制措施

基础措施贯穿施工全程,从土层加固、荷载分流、动态监测三个维度提升稳定性,降低扰动影响,是变形控制的核心基础:

1. 土层加固防护:箱涵底部对应隧道顶部区域,采用 $\Phi 0.8\text{m}$ 水泥搅拌桩满铺加固,桩间距 55cm,通过水泥土固化提升软土地基整体性、承载力及抗变形能力,阻断扰动传导,从源头降低沉降与位移风险。

2. 结构荷载分流:箱涵底板与 $\Phi 1.2\text{m}$ 钻孔灌注桩刚性连接,桩基深入深层稳定土层,将施工及后期使荷载传递至深层地层,避免荷载直接作用于隧道顶部,分散集中荷载影响。

3. 全周期动态监测:在地铁 13 号线二期凰槎区间 K9+005 ~ K9+195 段布设 20 余个监测点,涵盖断面、纵向及常规监测点,监测水平位移、竖向沉降、径向收敛三项核心指标。常规阶段每日监测 1 次,重点扰动阶段加密至每日 2 次,异常情况实时监测,为施工调整提供数据支撑。

4.2 分阶段专项变形控制措施

在基础防护之上,针对各阶段扰动特点制定专项措施,实现精细化控扰:

1. 钢板桩施工:采用静压式打桩机替代传统振动打桩机,严控打设速率 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$,避免振动叠加,减少土层累积位移。

2. 河道回填:采用分层轻压工艺,每层回填厚度 $\leq 30\text{cm}$,选用 5kW 以内小型压实机具,回填区域与隧道边

缘保留 1.5m 以上缓冲距离,避免直接扰动隧道周边土层。

3.内支撑安装:钢支撑提前地面预制,减少隧道内切割、焊接作业,小型设备转运,通过刚性约束限制管片变形,杜绝变形突变,提供双重安全保障。

4.溶洞注浆:注浆压力控制在 0.3-0.5MPa,采用分段低压注浆工艺,每段注浆后静置 1h,待浆液初凝后施工,防止压力累积影响隧道。

5.桩基施工:执行隔桩跳打工艺,施工间距不小于 3 根桩位,控制灌注桩成孔速率 $\leq 1\text{m}/\text{min}$ 、搅拌桩搅拌速率 $0.3-0.5\text{m}/\text{min}$,灌注桩低速常压灌注,避免扰动叠加及土层隆起。

6.基坑开挖:采用分节分层、小步距开挖工艺,箱涵划分为三个节段,按“先非核心区、后核心区”顺序开挖,每层开挖深度 $\leq 1.5\text{m}$ 、步距 $\leq 2\text{m}$,开挖后立即支护,缩短土层裸露与应力释放时间。

7.底板浇筑:采用分散分块浇筑、分层振捣工艺,每块浇筑面积 $\leq 20\text{m}^2$,小型插入式振捣器作业,振捣点间距 $\geq 50\text{cm}$,防止振捣过度引发土层液化。

8.侧墙顶板施工:侧墙双侧对称浇筑,两侧速率一致、高差 $\leq 50\text{cm}$,避免单侧荷载引发水平变形;顶板采用平板振捣器,降低浇筑冲击荷载的竖向扰动。

5 监测结果及变形规律分析

本次监测覆盖 8 个施工阶段全周期,以各阶段监测极值为统计依据,全程未出现 B 级及以上预警,隧道结构始终稳定,充分验证了双重变形控制体系的有效性。

5.1 核心变形规律

隧道累计变形控制在 $-1.02\text{mm} \sim 1.40\text{mm}$,远低于 5.2mm 预警值及 6.5mm 安全控制值,监测比值 G 最大值 0.27,全程维持 A 级安全等级,双重防控体系成效显著。隧道变形整体呈小幅波动上升趋势,无突发大幅变形,各阶段扰动累积效应被有效削弱,无持续扩大态势。

变形与扰动关联性显著:振动扰动主导小幅负向变形,注浆压力扰动主导正向微变形,荷载与土层应力扰动引发多方向小幅变形,变形特征与扰动类型高度契合,体现专项措施的针对性。隧道内钢支撑刚性约束作用突出,安装完成后变形无突变,即使在混凝土浇筑荷载扰动最大阶段,变形仍平稳上升;基坑开挖通过分节分层小步距工艺,彻底规避负向沉降,仅出现 $0.12-0.84\text{mm}$ 小幅正向隆起,证明该工艺适用于近距离涉铁基坑开挖。

5.2 防控措施有效性验证

全域基础防护措施筑牢防控底线:水泥搅拌桩提升土层稳定性,阻断扰动传导;钻孔灌注桩实现荷载分流,避免荷载直接作用于隧道;全周期监测实现风险早发现、早处置,为变形可控奠定基础。分阶段专项措施精准对接各类扰动,实现“一阶段一方案”精细化管控,有效削弱变形风险。永久加固与临时支撑配合,形成全程防护闭环,兼顾施工期安

全与箱涵长期稳定性,实现零超标变形管控目标。

6 结论与工程建议

6.1 结论

1.近距离涉铁箱涵施工扰动分为振动、竖向荷载、土层应力三类,水泥搅拌桩与灌注桩施工、基坑开挖、混凝土浇筑为重点扰动阶段,是变形控制的核心环节。

2.“全域基础防护+分阶段专项防护”双重变形控制体系,适配近距离涉铁箱涵施工需求,可有效削弱各类扰动,隧道变形控制在 $-1.02\text{mm} \sim 1.40\text{mm}$, G 值均 < 0.6 ,管控效果显著。

3.水泥搅拌桩加固、钻孔灌注桩荷载分流、隧道内钢支撑限位、分节分层小步距开挖、分散对称浇筑等关键措施协同发力,是变形精准管控的核心技术,可推广应用于同类工程。

4.隧道内钢支撑能有效抑制变形突变与扩张,是近距离涉铁施工的必要防护措施;分节分层小步距开挖工艺可化解基坑卸荷应力问题,实现开挖段无负向沉降,防控效果突出。

5.全周期动态监测与施工闭环管控相结合,能实时掌握变形动态、调整施工策略,是保障涉铁施工安全的重要手段,需贯穿施工全程。

6.2 工程建议

1.同类工程施工前需梳理工序流程,按扰动类型划分关键阶段,构建“基础+专项”双重防控体系,杜绝一刀切管控,实现分阶段、分级精准管控。

2.强化高扰动阶段工艺优化,严格落实隔桩跳打、分层开挖、对称浇筑等低扰动工艺,严控施工速率,从源头减少扰动累积。

3.采用永久加固与临时支撑结合模式,与隧道净距小于 4m 的工程,需在隧道内加设钢支撑,兼顾施工期安全与构筑物长期稳定性。

4.建立“监测-分析-调整-管控”动态闭环,重点阶段加密监测频次,强化施工、监理、地铁运营方三方协同,关键工序提前报审,全程联动管控。

5.优先选用静压、低压、轻型等低扰动设备与工艺,替代传统高扰动设备,最大限度降低对地铁隧道的影响,保障地铁运营与施工双重安全。

参考文献

- [1] GB/T 50902-2013,城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 张志强.邻近地铁隧道的箱涵施工变形控制技术[J].城市道桥与防洪,2020(8):213-216+220.
- [3] 赵磊.地铁周边箱涵施工的变形控制及监测分析[J].市政技术,2023,41(5):187-190+195.
- [4] 黄俊.涉铁箱涵各施工阶段对地铁隧道的变形影响研究[J].铁道标准设计,2022,66(7):102-106.