

The law of pavement settlement and prevention and control measures of pipe jacking construction in urban busy road section

Zhiquan Wang

China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Co., Ltd. First Mechanized Construction Branch, Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

Urban busy road sections feature dense traffic, complex underground pipelines, and concentrated surrounding structures. Although pipe jacking construction reduces direct ground disturbance, pavement settlement remains a core risk. Improper control may trigger chain reactions such as traffic accidents and pipeline damage. Using the Northeast Wang West Road underpass project at Software Park Station (Exit A) of Beijing Metro Line 13's capacity expansion as a case study, this paper systematically analyzes the influencing factors and evolution characteristics of pavement settlement during pipe jacking in busy road sections. By integrating geological-hydrological conditions, construction parameters, and monitoring data, it establishes a comprehensive prevention system combining technical control, management support, and emergency response. The findings provide actionable technical references and practical insights for similar projects.

Keywords

busy road section; pipe jacking construction; pavement settlement; regularity analysis; prevention and control system

城市繁华路段顶管施工路面沉降规律及防控措施

王志全

中铁上海工程局集团有限公司第一机械化施工分公司, 中国·江苏·南京 211100

摘要

城市繁华路段交通密集、地下管线错综复杂、周边建筑物集中, 顶管施工虽能减少对地面的直接扰动, 但路面沉降仍是核心风险, 若控制不当易引发交通事故、管线破损等连锁问题。本文以轨道交通车站出入口顶管下穿城市主干路施工为实例, 结合项目地质水文条件、施工工艺参数及监测数据, 系统剖析繁华路段顶管施工路面沉降的影响因素与演化特征, 构建“技术防控-管理保障-应急处置”三位一体的全方位防控体系, 为同类工程提供可落地的技术参考与实践借鉴。

关键词

繁华路段; 顶管施工; 路面沉降; 规律分析; 防控体系

1 引言

随着城市化进程的加速, 地下空间开发需求日益迫切, 顶管技术凭借“非开挖”优势, 在城市轨道交通、市政管线等工程中得到广泛应用。城市繁华路段作为交通枢纽与商业核心, 不仅交通流量大, 且地下管线(燃气、供水、污水、电力等)密集, 周边建筑物对沉降敏感度高。因此, 深入探究繁华路段顶管施工路面沉降规律, 制定科学高效的防控措施, 对保障工程安全、降低环境影响、控制工程风险具有重要现实意义。

【作者简介】王志全(1988-), 男, 中国陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 从事城市轨道交通施工研究。

2 工程概况

2.1 项目背景

北京轨道交通某地铁站出入口过街通道采用顶管法穿越道路后接入车站主体。下穿道路为城市主干路, 主路路基全宽 25 米, 路面宽 2×12 米, 双向 6 条机动车道, 南侧主路含 3 条机动车道和 1 条非机动车道, 北侧主路含 3 条机动车道和 1 条非机动车道, 交通繁忙。顶管通道下穿道路范围断面尺寸为 6.9m×4.9m, 坡度 4.5% 上坡顶进, 过街通道净长 35.3m, 管节外形尺寸为 4.9m×6.9m, 壁厚 500mm, 管节长度 1.5m, 覆土厚度约 5.0~6.5m。顶管始发井兼提升段为明挖结构, 基坑长 56.81m, 最宽 10.2m, 标准段开挖深度 11.83m~13.38m, 集水坑部位局部开挖最深处约 15.2m, 围护结构采用 $\phi 600@900/1000$ mm 钻孔灌注桩+2 道内支撑体

系,地下水位于结构底板以下,除集水坑范围辅以降水措施外,其余段不涉及地下水处理^[1]。

2.2 地质与水文地质条件

顶管过街通道范围主要地层从上至下依次为人工填土层和第四纪冲洪积层。人工填土层包括粉质黏土素填土、杂填土、黏质粉土-砂质粉土素填土,土质不均匀,含灰渣、砖渣、碎石等杂质;第四纪冲洪积层涵盖粉质黏土、黏质粉土-砂质粉土、粉细砂、卵石-圆砾、黏土等,其中粉细砂层湿至饱和、中密~密实,低压缩性,透水性好,抗剪强度较低,是影响沉降的关键地层;粉质黏土层黏聚力较强,透水性弱,土体稳定性相对较好。

水文地质方面,钻探深度 40.0m 范围内共观测到 3 层地下水,分别为潜水(二)、承压水(三)、承压水(四)。潜水(二)稳定水位绝对标高 29.99~30.06m,承压水(三)稳定水位绝对标高 23.46~24.09m,承压水(四)稳定水位绝对标高 18.76~19.09m。受南水北调、永定河补水等影响,近年来北京地下水位呈逐年上升趋势,虽本附属结构最低点位于水位之上,但地下水位变化仍可能影响地层稳定性。

2.3 周边环境条件

顶管通道下穿道路通道上方分布多条地下管线,其中 $\Phi 500$ 污水管距离管顶仅 0.67m, $\Phi 1400$ 雨水管距离管顶 2.827m, $\Phi 400$ 上水管距离管顶 3.779m, $\Phi 400$ 燃气管距离管顶 4.072m,管线分布密集且对沉降敏感。道路两侧临近园区道路、绿化带及部分建构筑物,施工过程中需严格控制路面沉降,避免对周边环境造成影响。

3 城市繁华路段顶管施工路面沉降规律分析

3.1 沉降影响因素

地质条件是影响路面沉降的核心因素,不同地层的物理力学性质差异显著:粉细砂层颗粒松散、透水性好,土压控制不当或土体扰动过大时易发生流砂,导致沉降量显著增大;粉质黏土层黏聚力较强,但若出现超挖或浆液流失,仍会引发沉降;杂填土及素填土层土质不均匀、结构松散,施工中易出现局部坍塌,造成不均匀沉降。此外,地下水位上升会降低土体有效应力,进一步增加沉降风险。

施工工艺参数直接决定沉降程度:土仓压力需介于主动土压力与被动土压力之间,压力过小易导致掌子面坍塌,压力过大则会挤压土体引发隆起,后期土体回弹易产生二次沉降;顶进速度过快会加剧土体扰动,过慢则导致掌子面土体长时间暴露,稳定性下降;超挖是引发沉降的重要原因,正常出土量应控制在理论出土量的 95%~100%,欠挖则会增加顶进阻力,间接引发沉降;触变泥浆配比不当、注浆压力不足或不及时,会导致泥浆套不完整,无法有效填充管节与土体间的空隙;频繁或大角度纠偏会加剧土体扰动,导致局部沉降增大^[2]。

3.2 沉降演化规律

结合工程施工监测数据,繁华路段顶管施工路面沉降

过程呈现明显的阶段性特征:

施工准备阶段,受端头土体加固施工(如注浆、旋喷桩施工)影响,地层产生轻微扰动,路面出现少量隆起或沉降,沉降量一般在 5mm 以内,沉降速率缓慢,属于正常现象。

顶进始发阶段,洞门破除破坏端头土体完整性,若加固效果不佳易出现涌水涌砂,导致沉降快速增长。此时顶管机刚进入地层,土压平衡系统尚未稳定,土体扰动较大,日均沉降量可达 2~3mm。本工程通过采取洞门水平深孔注浆加固及双排 DN32 超前小导管加固措施,将始发阶段路面最大沉降量控制在 8mm 以内,未超过预警值。

正常顶进阶段,土压平衡系统趋于稳定,顶进速度、出土量及注浆参数控制在合理范围,土体扰动程度减小,沉降进入稳定增长阶段。该阶段沉降主要由地层损失、泥浆套磨损及土体固结引起,日均沉降量约 0.5~1mm,沉降量随顶进距离累积但增长速率逐渐放缓。当顶管机穿越粉细砂层时,沉降量会出现小幅波动,穿越完成后逐渐稳定。

顶进接收阶段,破除接收端洞门导致土体扰动再次加剧,路面沉降出现小幅增长,但增长幅度小于始发阶段。接收完成后,经泥浆置换及回填注浆,土体固结,沉降逐渐趋于稳定。本工程接收阶段路面沉降增量控制在 3mm 以内,最终总沉降量均小于 30mm 的允许限值。

3.3 沉降分布规律

顶管施工路面沉降沿顶管轴线呈正态分布的“锅底形”特征:轴线处沉降量最大,向两侧逐渐减小;沉降影响范围与覆土厚度、地层性质相关,一般为顶管外径的 3~5 倍,在粉细砂层中影响范围较大,在粉质黏土层中影响范围较小;穿越地下管线时,管线位置处沉降量会局部增大,尤其是距离管顶较近的管线(如 $\Phi 500$ 污水管),受施工扰动影响更为明显,需重点监测与保护。

4 城市繁华路段顶管施工路面沉降防控措施

4.1 技术防控措施

端头土体加固是控制洞口涌水涌砂、减少沉降的关键。

始发端采用洞门水平深孔注浆加固,后靠背采用地面垂直深孔注浆加固,注浆范围为顶管上下、左右各 2m,沿顶管方向 3~4m,注浆材料选用水泥水玻璃双液浆,注浆压力控制在 0.3MPa~0.5MPa,加固后土体无侧限抗压强度不小于 0.8MPa,渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$;接收端采用 $\phi 600@400$ 双重高压旋喷桩加固,水泥掺量根据试验确定,水灰比为 1.0,加固后土体 28 天无侧限抗压强度大于 0.8MPa,抗渗系数小于 10^{-6}cm/s ;在始发端及接收端洞门处水平打设 4m 长双排 DN32 小导管,水平间距 0.3m,注浆加固前方土体,增强掌子面稳定性。

施工参数优化控制需贯穿全过程:土压控制在 0.1~0.2MPa,根据监测数据动态调整;正常顶进速度控制在 10~20mm/min,穿越粉细砂层及地下管线时放缓至 8~12mm/min;采用螺旋输送机出土,实时监测出土量,确

保在理论出土量的 95%~100% 范围内；触变泥浆配比为水：膨润土：纯碱：CMC=400:100:20:20，比重控制在 1.1~1.16g/cm³，粘度大于 30s，失水量小于 25cm³/30min，无离析水，注浆采用“先压浆后顶进、边压浆边顶进、停顶进勤补浆”的原则，压力控制在 0.2~0.3MPa；纠偏遵循“勤测勤纠、小量纠偏”原则，每顶进 300mm 测量一次轴线偏差，纠偏角度不大于 0.5°。

建立完善的监测预警体系，实时掌握路面沉降及周边环境变化：沿顶管轴线及两侧 7m、17m 处布置横断面沉降监测点，每组横断面布 5 个点，在地下管线关键位置（如接头处）设置管线沉降监测点；掌子面距量测断面前后小于 2B（B 为顶管宽度）时，监测频率为 2~3 次/天；2B~4B 时为 1 次/天；大于 4B 时为 1 次/3 天，穿越管线及重要路段时加密至 24 小时跟踪监测；设定路面最大沉降量 ≤ 30mm，最大隆起量 ≤ 10mm，沉降速率 ≤ 2mm/d，有压管线沉降预警值 ≤ 10mm，无压管线 ≤ 20mm；监测数据及时整理分析，绘制沉降曲线，接近预警值时调整施工参数，达到预警值时立即停止施工并采取补救措施^[3]。

4.2 管理保障机制

成立专项管理小组，明确各岗位职责：项目经理为第一责任人，统筹协调整体工作；技术负责人负责制定施工方案及技术措施；安全负责人负责现场安全监督及应急管理；施工负责人负责现场施工组织及参数控制；监测人员负责监测数据采集与分析，确保各项防控措施落实到位。

施工前对全体施工人员进行专项培训，内容涵盖顶管施工工艺、沉降防控技术、监测数据解读、应急处置流程等，重点培训特种作业人员（如顶管机操作手、起重司机、电工等），确保其持证上岗，熟练掌握操作技能及安全规范。

4.3 应急处置措施

制定完善的应急处置预案，明确应急响应流程、应急组织机构及职责、应急物资储备等。成立应急救援小组，由项目经理担任组长，下设抢险救援组、安全保卫组、技术组、物资设备组、医疗救援组等，明确各小组职责。储备双液注浆泵、柴油发电机、潜水泵、编织袋、黄沙、水泥、聚氨酯、钢板、钢管等应急物资，确保突发事件发生时能够及时调配。

当监测数据达到预警值或发生突发事件时，立即启动应急预案：停止施工，组织人员疏散及现场警戒；技术组分析事故原因，制定抢险方案；抢险救援组采用注浆加固、回填封堵等措施控制事态发展；医疗救援组负责伤员救治及转运；善后处理组负责后续事宜协调。针对路面沉降超标、管线破损、涌水涌砂等不同突发事件，制定针对性应急处置流程，确保响应迅速、处置有效。

5 工程实例验证

北京轨道交通某站出入口顶管施工过程中，严格执行

上述沉降防控措施，取得了良好的防控效果。施工期间，路面最大沉降量为 22mm，小于 30mm 的允许限值；管线最大沉降量为 8mm，小于管线允许变形阈值；周边构筑物未出现明显沉降及开裂现象，交通通行未受影响。

具体验证数据显示：始发阶段路面沉降量最大 8mm，沉降速率 2.1mm/d，通过优化土压控制及加强注浆，沉降得到有效控制；正常顶进阶段穿越粉细砂层时，路面沉降量出现小幅增长，最大沉降量 15mm，调整顶进速度至 10mm/min 并加大触变泥浆注浆量后，沉降速率降至 0.8mm/d；接收阶段路面沉降增量 3mm，总沉降量 22mm；施工完成后 1 个月，路面沉降趋于稳定，最终沉降量 23mm，无后期回弹现象。工程实践表明，本文提出的沉降防控体系科学有效，能够有效控制城市繁华路段顶管施工路面沉降，保障工程施工安全及周边环境稳定^[4]。

表 1 管线位置关系表

序号	临近管线	与地铁位置关系	管底埋深	拱顶埋深	与管线垂直距离
1	Φ500 污水管	顶管垂直下穿	5.166m	5.836m	0.67m
2	Φ1400 雨水管	顶管垂直下穿	2.766m	5.593m	2.827m
3	Φ400 上水管	顶管垂直下穿	1.583m	5.045m	3.779m
4	Φ400 燃气管	顶管垂直下穿	1.166m	6.038m	4.072m
5	Φ400 临近燃气管	顶管垂直下穿	1.983m	5.445m	3.462m

6 结论

城市繁华路段顶管施工路面沉降受地质条件、施工工艺、周边环境等多因素综合影响，沉降演化呈现明显的阶段性特征，可分为施工准备阶段、顶进始发阶段、正常顶进阶段及顶进接收阶段，沉降分布沿顶管轴线呈“锅底形”分布。为有效控制路面沉降，需构建“技术防控-管理保障-应急处置”三位一体的全方位防控体系：技术上通过端头土体加固、施工参数优化控制、完善监测预警、专项管线保护、泥浆置换与回填注浆等措施，从源头上减少沉降产生；管理上建立组织保障、人员培训、技术交底、过程管控等机制，确保防控措施落实到位。

参考文献

- [1] 陈柳花. 基于三维激光扫描技术的顶管施工邻近路面沉降变形监测[J].城市道桥与防洪,2025,(11):266-269.
- [2] 李光明,康浩,廖春华,等. 软土地区顶管施工对道路沉降变形的影响分析[J].天津建设科技,2024,34(05):32-35.
- [3] 申明川,高兴涛. 市政长距离富水砂层顶管路面沉降控制措施研究[J].四川水利,2024,45(S1):73-75.
- [4] 朱邦永. 顶管施工引起路面沉降的稳定性分析及治理[J].电大理工,2024,(02):6-11.