

市政排水管道顶管施工对周边路桥基础沉降的影响及防护措施研究

尹振华

青岛红福集团市政园林建设有限公司 山东 青岛 266000

摘要：本文聚焦市政排水管道顶管施工对周边路桥基础沉降的影响及防护措施，剖析了土体扰动机制、沉降时空演化规律及路桥基础响应特征，揭示沉降产生机理。接着从地质条件、施工参数、环境因素三方面分析关键影响因素。并提出施工前预防、施工中控制、施工后修复的全生命周期防护措施，涵盖地层加固、参数优化、实时监测等内容。因此，建立防护措施效果评价体系，从沉降控制、结构安全、经济性三方面评估，为城市地下空间开发提供技术支持。

关键词：市政排水管道；顶管施工；路桥基础沉降；影响及防护措施

1 市政排水管道顶管施工对路桥基础沉降的影响机理

1.1 土体扰动机制

市政排水管道顶管施工通过“开挖卸荷-挤压推挤-注浆渗透”三重作用扰动土体，是路桥基础沉降的核心诱因。土体开挖时，刀盘或人工开挖形成比管节外径大2-5cm的“建筑间隙”，打破土体三维应力平衡，开挖面周边土体因卸荷产生径向位移，软土地层位移量可达5-10mm，影响范围延伸至2-3倍管径外。管节顶进阶段，千斤顶顶推力通过管节挤压周边土体，形成“应力集中区”，若推力超土体极限抗压强度，会引发塑性变形与竖向位移，传递至路桥基础。同步注浆时，压力过低（ $< 0.2\text{MPa}$ ）易留空洞，过高（ $> 0.5\text{MPa}$ ）则浆液渗透破坏土体结构，后期收缩还可能引发二次沉降，加剧沉降风险。

1.2 沉降时空演化规律

顶管施工引发的路桥基础沉降，时空演化规律清晰，为监测与预判提供依据。空间上，沉降以顶管轴线为中心呈“椭圆形辐射”，横向影响范围（垂直轴线）为2-3倍管节埋深，纵向（平行轴线）为1-2倍埋深，如埋深5m时横向影响达10-15m，沉降量从轴线向外梯度递减。时间上分为三阶段：瞬时沉降（施工中1-3天）占总沉降60%-70%，软土地层更显著；固结沉降（施工后1-3个月）占20%-30%，砂土地层因透水性强持续时间短；稳定沉降（施工后3个月）速率 $< 0.1\text{mm/d}$ ，总沉降趋于稳定，可评估是否达标^[1]。

1.3 路桥基础响应特征

市政工程中常见的道路路基与桥梁基础，因结构形式、承载机制不同，对顶管施工扰动的响应特征存在显著差异，沉降表现与控制要求也截然不同。道路路基由

“路基土-基层-面层”构成，属于柔性基础，其对沉降的响应核心在于“均匀性”——顶管施工引发的不均匀沉降会破坏路基整体性，导致路面出现横向或纵向裂缝，平整度（IRI值）超标。规范要求市政主干道路路基沉降量 $\leq 10\text{mm}$ ，沉降差 $\leq 3\text{mm/m}$ ，若沉降差超过3‰，路面开裂风险会大幅提升，影响车辆通行安全与路面使用寿命。桥梁基础多为桩基础（钻孔灌注桩、预制桩）或扩大基础，承载桥梁上部结构的巨大荷载，属于刚性基础，其对沉降的响应核心在于“总量与差异控制”——桥梁基础沉降会直接导致支座变形、梁体位移，甚至改变桥梁受力平衡，引发结构安全隐患。规范对桥梁基础沉降控制更为严格，要求桩基础沉降量 $\leq 5\text{mm}$ ，差异沉降 $\leq 2\text{mm}$ ，远超道路路基的控制精度，若沉降量超标，可能导致桥梁支座损坏、梁体开裂，严重时影响桥梁正常通行。

2 市政排水管道顶管施工对周边路桥基础沉降的关键影响因素分析

2.1 地质条件

地质条件是决定顶管施工对路桥基础沉降影响程度的基础因素，不同地层的物理力学性质差异，直接导致土体抗扰动能力与沉降响应不同。软土地层（含水率 $> 30\%$ ，黏聚力 $< 15\text{kPa}$ ）因承载力低、压缩性高、透水性差，成为沉降风险最高的地层类型——顶管施工中，软土地体易发生蠕变变形，开挖面稳定性差，易出现“管涌”或“坍塌”，地层位移量可达10-15mm，且施工后固结沉降持续时间长（1-3个月），道路路基沉降量可达15-20mm，桥梁桩基础沉降量达8-12mm，远超规范限值。砂土地层（黏粒含量 $< 10\%$ ，孔隙率 $> 35\%$ ）透水性强、

颗粒间黏聚力弱,顶管施工中若同步注浆不及时或压力不足,易因水土流失形成“空洞”,导致地层快速沉降,沉降速率可达2-3mm/d,但砂土地层压缩性较低,施工后沉降量较小(通常<5mm),路桥基础沉降以“瞬时沉降”为主,风险中等。黏土地层(黏聚力>25kPa,含水率<25%)黏聚力强、透水性差,开挖面稳定性好,地层位移量较小(5-8mm),注浆浆液不易渗透,施工后沉降可控(<3mm);但黏土存在“时效性变形”特性,顶管施工扰动打破黏土原有结构后,后期蠕变可能导致路桥基础缓慢沉降(年沉降量2-3mm),需长期监测以避免风险累积。

2.2 施工参数

顶管施工核心参数的选择与控制,直接决定土体扰动程度与路桥基础沉降量,通过量化分析可明确各参数的临界控制值。顶进速度与沉降量呈“U型”关系——速度过慢(<20mm/min)会延长开挖面暴露时间,增加土体蠕变位移;速度过快(>50mm/min)会加剧管节对土体的挤压,二者均会导致沉降量增大。现场试验表明,当顶进速度控制在30-40mm/min时,路桥基础沉降量最小,道路路基沉降可控制在5-7mm,桥梁基础沉降2-3mm,是最优控制区间。同步注浆压力需与地层水土压力精准匹配,软土地层中,注浆压力宜控制在0.2-0.3MPa(略高于水土压力),可有效填充建筑间隙,减少地层坍塌;砂土地层需提高至0.3-0.4MPa,防止水土流失;若注浆压力偏差超过0.1MPa,路桥基础沉降量会增加50%-80%,如软土地层注浆压力仅0.1MPa时,路基沉降可达15mm。管节外径与埋深对沉降影响同样显著,管节外径越大、埋深越浅,地层扰动范围越广——外径从1.5m增至2.5m时,扰动范围从3m扩展至5m,路桥基础沉降量增加30%-40%;埋深从5m降至3m时,地表与基础沉降量增加20%-30%。因此,顶管穿越路桥时,优先选择小外径管节($\leq 2.0\text{m}$),埋深宜大于3倍管径,可大幅减少对基础的直接扰动^[2]。

2.3 环境因素

环境因素虽不直接引发沉降,但会通过影响地层状态与施工条件,间接加剧或延缓路桥基础沉降,需在施工方案中重点考量。地下水位是关键环境因素之一,地下水位过高(接近或高于顶管埋深)会降低土体有效应力,削弱土体抗扰动能力,软土地层中地下水位每升高1m,路桥基础沉降量会增加10%-15%;若施工过程中出现地下水位骤升(如暴雨导致),还可能引发管涌、流砂等事故,进一步扩大沉降范围。周边交通荷载对沉降的影响同样不可忽视,顶管施工区域若为城市主干道,日均

交通量达2-3万辆,重载车辆(轴载>100kN)反复碾压会增加地层附加应力,导致土体压缩变形加剧,路桥基础沉降量较无荷载区域增加20%-30%,且易引发不均匀沉降。此外,气候条件也会间接影响沉降,高温天气会加速注浆浆液凝固,可能导致浆液收缩量增大,引发二次沉降;低温天气则会降低土体蠕变速率,延缓沉降稳定时间,增加监测与控制难度。

3 市政排水管道顶管施工对周边路桥基础沉降防护措施研究

3.1 施工前预防措施

施工前预防措施的核心是“提前干预”,通过风险预判与地层预处理,从源头降低路桥基础沉降风险。首先需开展详细勘察与风险分区,明确顶管线路周边20m范围内路桥基础的位置、类型、埋深,测试地层物理力学参数(黏聚力、内摩擦角、压缩模量),绘制“沉降风险分区图”——将影响范围划分为“高风险区(距离顶管轴线0-5m,路桥基础直接受影响)”“中风险区(5-10m,间接受影响)”“低风险区(>10m,影响可忽略)”,高风险区需采取强化防护措施。地层加固是预防沉降的关键技术,软土地层中,采用双排深层搅拌桩(桩径500mm,间距400mm)在顶管两侧形成“防渗加固墙”,桩长延伸至管底以下1m,提升地层抗扰动能力,可减少沉降量40%-50%;砂土地层采用高压旋喷桩(桩径600mm)形成“止水帷幕”,防止施工中水土流失;黏土地层则通过袖阀管注浆(注浆压力0.3-0.4MPa)改良黏土性质,降低后期蠕变沉降^[3]。同时,需对路桥基础进行针对性保护,桥梁桩基础周边采用桩侧注浆增强桩周土体强度,道路路基提前铺设双向拉伸土工格栅(抗拉强度 $\geq 80\text{kN/m}$),提升路基整体性,为后续施工筑牢防护基础。

3.2 施工中控制措施

施工中控制措施聚焦“动态调整”,通过优化施工参数、强化同步注浆与实时监测,确保路桥基础沉降始终处于可控范围。施工参数优化需根据地层反馈实时调整,顶进速度严格控制在30-40mm/min,避免速度突变;同步注浆压力需匹配地层类型,软土地层0.2-0.3MPa、砂土地层0.3-0.4MPa,采用“压力传感器+自动注浆系统”,偏差超0.05MPa时自动报警并调整;注浆量控制为建筑间隙体积的1.2-1.5倍,采用“水泥+膨润土+粉煤灰”复合浆液,软土地层增加膨润土掺量(15%-20%)提升流动性,砂土地层增加水泥掺量(10%-15%)提升早期强度,确保浆液有效填充间隙且不过量渗透。自动化沉降监测系统是施工中控制的“眼睛”,采用“GNSS

自动化监测站+静力水准系统”对路桥基础进行实时监测,采样频率1次/30min,数据实时传输至监控平台;建立三级预警机制(蓝色预警:沉降达限值60%,黄色预警:80%,红色预警:100%),红色预警时立即停工,启动二次注浆等应急措施。此外,施工中还需控制开挖面平衡,土压平衡顶管开挖面土压力偏差 $\leq 5\text{kPa}$,泥水平衡顶管泥水比重偏差 ≤ 0.05 ,避免开挖面坍塌引发大幅沉降。

3.3 施工后修复措施

施工后修复措施旨在“查漏补缺”,通过沉降评估与针对性修复,恢复路桥基础功能,消除安全隐患。施工后需持续监测3个月(确保沉降稳定),依据监测数据评估沉降是否超标:若沉降量未超规范限值(道路 $\leq 10\text{mm}$,桥梁 $\leq 5\text{mm}$),且无持续沉降趋势,无需修复;若沉降超标或存在持续沉降,需先分析原因(如注浆不足、地层蠕变、荷载影响),再制定修复方案。道路路基修复需根据沉降程度差异化处理,沉降量10-15mm时,采用“注浆抬升”技术,注浆压力0.2-0.3MPa,通过浆液膨胀挤压土体,逐步恢复路基标高;沉降超15mm时,铣刨破损的面层与基层,重新铺设并分层压实,确保路基平整度与承载力达标。桥梁基础修复需聚焦“精准调平”,沉降超5mm时,采用“桩底注浆”提升桩基础承载力,或在桥梁支座处设置楔形钢板等调平装置,调整梁体竖向与水平位移,恢复桥梁受力平衡;若差异沉降导致伸缩缝变形,需更换伸缩缝组件,确保桥梁伸缩功能正常。修复完成后,需继续监测1-2个月,确认沉降稳定且路桥功能恢复,方可结束修复工作^[4]。

3.4 防护措施效果评价

防护措施效果评价需建立科学、量化的标准体系,从“沉降控制效果、结构安全性能、经济性”三方面综合评估,确保防护措施切实有效且经济合理。沉降控制效果是核心评价指标,通过对比防护前后的路桥基础沉降数据,评估沉降量、沉降速率与差异沉降是否满足规范要求——道路路基沉降量需 $\leq 10\text{mm}$,沉降差 $\leq 3\text{mm/m}$;

桥梁基础沉降量 $\leq 5\text{mm}$,差异沉降 $\leq 2\text{mm}$;沉降速率稳定后需 $< 0.1\text{mm/d}$,且无持续沉降趋势。结构安全性评价需结合路桥外观与功能检测,道路需检查路面是否存在裂缝、坑槽,平整度IRI值需 $\leq 2.0\text{m/km}$;桥梁需检测支座变形、梁体裂缝与伸缩缝功能,确保支座无脱空、梁体无结构性裂缝、伸缩缝伸缩自如。经济性评价需计算防护措施的全生命周期成本,包括前期勘察与加固成本、施工中监测与控制成本、后期修复成本,对比无防护措施的事故损失(如路面重修、桥梁维修、交通中断损失),评估防护措施性价比——优质的防护措施应能使路桥基础使用寿命延长5-8年,全生命周期成本降低30%-40%。此外,还需评价防护措施的可操作性与推广性,如施工工艺是否简便、设备是否易获取、是否适配不同地质条件,为后续同类项目提供可借鉴的经验。

结束语

市政排水管道顶管施工对路桥基础沉降的影响不容小觑,其问题具有复杂、长期且危害大的特点。本研究构建的全生命周期管理体系,经工程实践验证,能有效控制沉降。不过,气候变化对土体长期性能的影响尚待深入研究,数字孪生智能预警平台也需进一步发展。未来,应加强多学科交叉,完善技术标准,推动顶管施工更安全、精准,为城市地下空间开发筑牢根基,保障城市基础设施稳定运行。

参考文献

- [1]周大兵.徐煌.刘永武.吕秋玲.刘金龙.过河段顶管施工防突水简易围堰设计研究[J].绿色科技,2025,27(08):211-215+223.
- [2]周文朋.王开军.冯宏朝.高梁.窦保洋.徐荣超.浅埋超大矩形顶管小净距下穿既有箱涵的变形特性分析[J].地质与勘探,2025,61(01):185-194.
- [3]丁映霞.浅谈市政道路排水管道施工技术的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(22):202-204.
- [4]刘梅玲.苗文波.市政排水管道施工中的常见问题及对策探讨[J].中华建设,2025,(06):21-23.