

城市雨污水管顶管施工地表沉降控制关键技术研究

杨思运

娄底市市政工程监理处，湖南娄底，417000；

摘要：城市雨污水管网建设中，顶管施工凭借非开挖优势已成为核心区域管网铺设的重要技术手段，但施工过程中易引发地表沉降，对周边建（构）筑物、道路及地下管线构成潜在威胁，影响城市运行安全。本文围绕顶管施工地表沉降控制需求，从工程地质条件、施工参数调控、周边环境荷载及监测体系等关键影响因素出发，构建“施工前勘察优化—施工中动态调控—施工后防护加固”的全流程控制技术框架，融合改良泥浆护壁、智能参数反馈、敏感区域加固等关键技术。工程应用表明，该技术体系可将地表最大沉降量稳定控制在规范允许范围（ $\leq 10\text{mm}$ ）内，显著降低地层扰动风险，为复杂城市环境下顶管施工的安全高效开展提供可靠技术支持。

关键词：顶管施工；地表沉降；雨污水管道；沉降控制；城市管网

DOI：10.69979/3029-2727.26.03.001

引言

随着城市化进程的加快，城市基础设施建设面临着空前的挑战与需求。特别是在道路雨污水管道工程领域，传统的开挖方法已逐渐不能满足现代城市对环境保护、施工效率与安全性的复合型需求。顶管施工技术无须大面积开挖道路即可实现对管道的施工，其对交通和周边环境的影响极小，在处理该类问题中具备显著的优势^[1]。城市化进程提速推动雨污水管网建设提质增效，顶管施工凭借非开挖优势，以交通干扰轻、环境影响小成为核心技术。但施工诱发的地表沉降易损毁周边设施，限制其推广。现有技术多局限单一环节，缺乏全流程支撑。本文聚焦沉降控制难题，剖析关键要素并搭建针对性技术体系，为工程安全及管网建设品质提供支撑。

1 城市雨污水管顶管施工应用背景与地表沉降风险

城市雨污水管网是市政基础设施的重要组成部分，其建设质量直接关系到城市排水防涝能力与生态环境安全。随着城市化进程加快，城市核心区用地紧张、交通流量大、地下管线密集，传统开挖施工对道路和周边环境的影响显著，已难以满足现代城市建设的高效与环保要求。顶管施工凭借非开挖优势，可在不中断交通的情况下完成管道铺设，成为城市中心区、老旧城区等复杂环境中雨污水管网建设的主要技术手段。然而，顶管施工不可避免地会扰动地层，开挖面失稳、泥浆压力控制不当、管节顶进扰动等均可能导致地表沉降。在软土、砂性土等不良地质条件下，沉降更易扩散，可能引发路面开裂、建筑物倾斜及地下管线变形破损，带来渗漏、坍塌等安全隐患，对城市基础设施安全运行构成威胁。

2 顶管施工地表沉降关键影响因素解析

顶管施工地表沉降的形成与发展受多重因素共同

影响。工程地质条件是沉降风险的基础，不同地层的物理力学特性决定沉降的强度与范围：软土地层含水率高、孔隙比大，易发生塑性流动；砂性土地层颗粒黏结力弱，泥浆支护不当易引发水土流失；地下水位波动会改变土体有效应力，进一步加剧沉降。施工参数的控制精度直接影响沉降幅度，顶进速度不稳、泥浆压力与注浆量调控不当、管节对接偏差导致的渗漏，均可能造成开挖面失稳或地层扰动扩大。周边环境荷载会放大沉降效应，建筑物静载、车辆动载及地下管线形成的应力集中区，都可能因地层位移引发附加沉降。此外，监测体系不完善，包括监测点稀疏、频率不足、反馈滞后等，会导致沉降变化难以及时发现和调控，从而加剧沉降危害。

3 针对性顶管施工地表沉降控制关键技术体系

3.1 施工前勘察优化与方案定制技术

3.1.1 多维度地质精准勘察技术

施工前期需构建多手段协同联动的地质勘察体系，结合施工区域地形地貌特征，系统运用钻探取样、静力触探、波速测试及地质雷达探测等技术，全面掌握地层竖向分层结构、水平分布规律及物理力学参数，精准识别软土夹层厚度与空间分布特征，明确砂性土颗粒级配、密实度及渗透性，同时查清岩体裂隙发育程度与结构面分布情况。同步开展地下水专项勘察，准确测定水位埋深、渗透系数及动态变化趋势，深入分析地下水与地层耦合作用对施工扰动及沉降的影响机理^[2]。在此基础上，依托数据融合算法整合各类勘察成果，构建三维地质可视化模型，直观呈现不良地质体的分布边界、规模及风险等级，为施工方案制定、顶管设备选型、泥浆体系优化及敏感区域加固提供精准的数据支撑，从源头降低因地质信息不足导致的沉降风险，为后续施工全过程的安全可控奠定坚实基础。见图1所示：

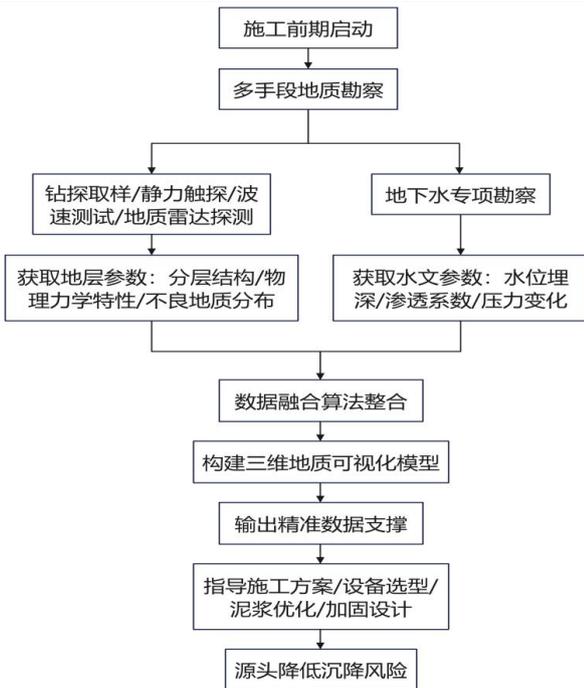


图 1 多维度地质精准勘察技术流程图

3.1.2 差异化施工方案定制

在充分掌握地质勘察成果与周边环境条件的基础上，应编制具有明确针对性的顶管施工方案，实现“一地一策”“一段一法”的精细化设计。针对高含水率软土地层，需重点提升泥浆护壁性能，通过优化膨润土与CMC复合体系，将泥浆黏度稳定控制在 25-30mPa·s，形成致密泥膜以减少土体扰动；对于透水性强的砂性土地层，则采用水泥-水玻璃双液浆进行超前加固，构筑厚度不小于 1.5m 的固化帷幕，有效阻断地下水渗流与土体流失路径。在路线规划方面，应结合周边建筑物基础、地下管线分布及道路结构特点，合理调整顶管埋深与走向，尽量避开敏感设施集中区；若无法避让，则通过加深埋深或设置隔离加固区等方式，确保施工影响范围与重要设施之间保持不小于 3m 的安全距离，从源头上降低沉降对周边环境的不利影响。

3.2 施工中动态调控与过程管控技术

3.2.1 核心施工参数智能调控

借助实时监测数据搭建参数调控模型，达成顶进速度与泥浆参数的动态适配调节。顶进施工过程中需要缓慢进行，一旦出现油路压力增高等问题，就需要停止顶进，及时调整顶管机设备进行重新顶进。在雨污水管道顶管顶进过程中，做好顶进轴线的纠偏控制至关重要，如果管位偏差超出雨污水管道施工要求，需要将管位纠偏校正，促使管位复位。每次纠偏的幅度需要在 5mm 以下，不能猛纠硬调，以免破坏管道结构^[3]。针对软土地层，选用低速匀速顶进方式，将顶进速度把控在 2-3cm/min 区间，规避土体发生剪切破坏；针对硬岩地

层，在兼顾开挖面稳定性的基础上，把顶进速度提升至 5-8cm/min，实现施工效率与作业安全的双重兼顾。泥浆压力秉持“动态平衡”准则，借助专用传感器实时采集开挖面土体压力与地下水压力数据，经系统运算后自动适配调整注浆压力，保障泥浆压力始终比土体侧向压力与地下水压力的总和高出 0.02-0.05MPa，同步精准把控注浆量，使管节与土体间隙的填充率达到 100%。

3.2.2 开挖面与管节质量管控

施工过程中需同步强化开挖面稳定与管节质量控制，以最大限度降低地层扰动并减少后期沉降隐患。通过采用改良型泥浆护壁工艺，在泥浆体系中掺入高分子絮凝剂，显著增强泥浆对土体颗粒的吸附与黏结能力，形成致密且连续的泥膜结构，有效提升开挖面整体稳定性，为顶进作业提供可靠支撑。在管节顶进及对接阶段，依托激光导向系统与高清可视化设备进行实时监测与姿态调整，严格控制轴线偏差在 3mm/m 以内，确保管节顶进轨迹平稳、受力均匀。接缝处采用遇水膨胀橡胶密封垫，并配合压力注浆工艺，实现接缝密闭性与耐久性的双重保障，避免因渗漏引发泥浆流失与地层空洞。同时，在施工全过程中持续监测管周土体应力变化，一旦应力突变超过 15%，立即启动动态调控措施，通过放缓顶进速度、优化注浆压力与注浆量等方式及时抑制地层扰动，确保开挖面与管节结构始终处于安全可控状态，为沉降控制提供关键技术支撑。

3.3 施工后防护加固与风险兜底技术

3.3.1 周边敏感设施专项防护

在顶管施工影响范围内，需针对浅基础建筑物和地下管线实施差异化、前置性的专项防护，以降低地层位移对周边环境的影响。对于浅基础建筑物，应在施工影响区与建筑物基础之间布设高压注浆孔，采用 P.O42.5 水泥浆进行分层注浆加固，形成厚度约 0.8-1.2m 的连续加固帷幕，使土体抗压强度提升至 1.5MPa 以上，有效阻断施工扰动向建筑物基础的传递路径。针对地下管线，需根据其材质与结构特性采取分类防护措施：刚性管线可通过弧形钢板包裹并配合膨胀螺栓固定，提高其整体刚度；柔性管线则采用悬吊支架结合弹性缓冲层进行保护，支架间距控制在 1.5m 以内，以减少振动与位移影响^[4]。同时，在管线周边加密布设沉降监测点，将监测频次提升至每 2 小时一次，确保管线位移始终处于可控范围，为周边敏感设施提供可靠的安全保障。

3.3.2 沉降隐患应急修复技术

施工完成后，需对地表及周边建（构）筑物、地下管线开展系统性沉降排查，一旦发现局部沉降超出控制标准，应立即启动应急修复程序，防止沉降进一步发展。对于轻微沉降区域，采用低压渗透注浆工艺，以水泥-

粉煤灰混合浆为主要材料,通过渗透扩散填充地层空隙,提高土体密实度与承载力,实现沉降的快速稳定。对于沉降较明显或存在潜在空洞风险的区域,采用高压喷射注浆技术,形成直径0.6-0.8m的固结桩体,构建局部复合地基结构,有效控制沉降回弹量在2mm以内。修复完成后,需持续进行约30天的跟踪监测,动态绘制沉降变化曲线,评估地层恢复趋势,并结合监测数据适时补充注浆,确保加固效果稳定可靠,避免出现二次沉降,为周边环境安全提供兜底保障。同时,对修复区域的地表变形、管线位移及建筑物倾斜进行同步复核,形成完整的应急处置档案,为后续类似工程提供参考依据。

4 顶管施工地表沉降控制技术应用成效验证

4.1 实际工程沉降控制效果

在多项城市雨污水管顶管工程中的应用表明,本文构建的全流程沉降控制技术体系能够实现对地表变形的精细化管理。在软土地层施工中,通过改良泥浆护壁、低速匀速顶进以及实时监测反馈调控的协同作用,地表最大沉降量可稳定控制在8mm以内,较传统施工方法显著降低。施工区域路面未出现裂缝、不均匀沉降等现象,浅基础建筑物累计沉降量均不超过3mm,满足市政工程相关规范要求。在砂性土地层工程中,采用复合注浆加固与泥浆压力动态调控技术,有效阻断了地下水渗流和土体流失路径,避免了地下空洞的形成。施工全过程未发生地表塌陷或突发沉降,地下管线位移量控制在2mm以下,确保了供水、燃气等生命线工程的安全运行,充分验证了技术体系在不同地质条件下的适用性和可靠性。

4.2 多场景适配性验证

该技术体系在不同城市区域及地质环境中普遍具备良好适配能力。城市核心区建筑物密集、地下管线交织复杂的场景下,依托地质勘察优化、敏感区域专项加固与高精度监测的协同发力,切实将施工对周边设施的扰动控制在最低水平。某老城区管网改造工程里,施工区域周边30米范围内的古建筑沉降量仅1.5mm,管线完好率维持在100%。城市新区地层条件偏简单的工程项目中,精简部分加固工序后,聚焦动态参数调控与基础监测手段,依旧实现地表沉降量把控在5mm以内,兼顾施工成本管控,契合新区建设的高效诉求^[5]。在软土与砂性土交错分布的复杂地质区域,凭借技术模块的灵活搭配,针对不同地层分段采取适配性控制举措,全程沉降变化平缓,无显著波动,充分印证了技术体系的灵活适配潜力。

4.3 综合效益量化体现

技术应用催生可观的经济与社会效益。经济效益层面,优化后的施工方案规避了部分因沉降超标引发的返工修复开支,某项目相较于传统施工缩减返工成本超百万元;自动化监测技术取代人工监测,使现场监测人力投入缩减60%,施工工期平均缩短15天,间接规避了工期延误引发的额外开支;泥浆配方优化与注浆量精准管控,推动注浆材料损耗量降幅达25%,切实压缩施工耗材成本。社会效益层面,施工期间道路通行未受过大影响,临时限行范围与时长相较于传统施工缩减一半,大幅减轻了对城市交通的影响;周边建(构)筑物与地下管线安全获得充分保障,杜绝了因沉降引发的安全事故及居民生活困扰;技术应用后管网工程的运行稳固性大幅增强,预估使用寿命在原基础上延长10年以上,缩减了后期运维成本投入,为城市基础设施长效运转筑牢支撑。

5 结语

本文聚焦城市雨污水管顶管施工地表沉降控制核心诉求,系统拆解工程地质、施工参数、周边环境及监测体系等关键影响要素,搭建“施工前勘察优化-施工中动态调控-施工后防护加固”全流程控制技术体系,依托多技术协同达成沉降精准管控。工程实践证实,该体系可适配多样地质与城市场景,兼顾工程安全与经济社会效益,为复杂环境顶管施工提供可靠技术依托。伴随城市建设深化,复杂地质与密集环境对沉降控制的要求持续攀升,技术需向智能化、精细化迭代,借物联网、大数据等技术强化监测调控的实时精准度。同时,推广成熟技术、完善行业标准,可规范施工流程,推动城市雨污水管网建设提质增效,为城市可持续发展夯实基础设施根基。

参考文献

- [1]潘泓佑.基于顶管施工技术的道路雨污水管道工程技术研究[J].工程建设与设计,2024,(05):239-241.
- [2]张少鸿.顶管施工技术的道路雨污水管道工程技术分析[J].中华建设,2025,(11):189-191.
- [3]陈俊.环境工程中雨污水管道顶管施工技术研究[J].工程机械与维修,2023,(06):52-54.
- [4]史纪申,唐丁.顶管施工在雨污水管道中的应用[J].建筑技术开发,2022,49(18):36-38.
- [5]李童奋.顶管施工技术在雨污水管道建设中的应用[J].工程技术研究,2021,6(12):120-121.

作者简介:杨思运(1972.01-),男,汉,娄底新化,本科学历,研究方向:市政工程施工监理。