

顶管沉降防治综合技术研究与应用

刘 虎 张 甲

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘 要：城市顶管施工极易引发地层扰动与地表沉降问题，软弱富水地层工况下沉降超标风险更为突出，易对周边建筑物及管线造成安全隐患。本文系统分析顶管施工沉降演化规律、形成机理及影响敏感因素，从源头防控、过程动态治理、设备材料创新三个维度构建全套沉降防治技术体系。结合精细化勘察、土体预加固、掘进参数调控、动态注浆防护及实时监测预警等核心工艺，优化适配复杂地层施工工况，配套完成专用施工设备与新型注浆材料改良研发。工程技术体系可有效降低地层扰动程度，控制施工全过程沉降变形。

关键词：顶管施工；地层沉降；扰动机理；防控技术；注浆加固

引言：随着城市地下管网、综合隧道工程建设规模持续扩大，非开挖顶管工艺凭借低扰动、高效率的优势得到广泛应用。目前现有沉降防控技术多集中于单一工序治理，缺乏全流程、系统化的防控体系。基于工程实际问题，本文结合现场施工特点，开展顶管沉降机理与综合防治技术研究，构建全过程沉降治理技术体系，为城市复杂工况顶管施工提供技术支撑。

1 顶管施工沉降形成机理及影响因素

1.1 顶管施工地层扰动与沉降演化规律

顶管属于地下暗挖施工工艺，施工过程中刀盘切土、管节顶进、浆液填充等工序会打破原始地层应力平衡，诱发土体位移与地层扰动。原始地层应力状态稳定，顶管掘进剥离掌子面土体后，周边土体出现松动、挤压及滑移现象。随着设备持续推进，地层扰动范围沿管线轴线不断延伸。沉降发育具备明显阶段性特征：施工前期以土体瞬时挤压变形为主，地表沉降量较小；施工中段地层扰动达到峰值，沉降速率明显加快；施工后期管节成型、浆液逐步固化，地层应力重新平衡，沉降逐渐趋于稳定并停止发展。

1.2 沉降产生的核心机理

顶管施工地表沉降主要由三类核心因素共同诱发。（1）土体损失：刀盘掘进过程中的超挖、土体流失会形成地层空洞，周边土体向空洞位置滑移填充，是地表沉降产生的主要诱因。（2）地下水扰动：施工期间地下水渗漏、水位波动会降低土体黏聚力与密实度，砂土、粉土等松散地层易出现颗粒流失与固结收缩，进一步加剧地层变形。（3）施工机械扰动：顶进压力不均、掘进速度不稳、管节摩擦挤压等施工问题，会反复扰动周边土体，破坏土体原生结构，产生塑性累积变形，最终形成地表沉降。

1.3 沉降影响因素敏感性分析

结合工程实际，顶管沉降受多重因素共同作用，各因素影响敏感度差异显著。地层条件为基础影响因素，软土、淤泥质土等软弱地层压缩性高、结构稳定性差，沉降变形量大，是沉降病害高发的主要原因。施工参数为可控关键因素，顶进压力、掘进速度、注浆量的细微偏差，都会改变地层扰动强度，参数匹配不合理易引发沉降超标。设备工艺直接决定施工稳定性，刀盘选型不当、顶进设备精度不足、注浆系统匹配性差，易造成掘进偏移、注浆不均匀，扩大地层扰动范围，进一步加剧沉降变形^[1]。

2 顶管沉降源头防控关键技术

2.1 精细化地质勘察与施工方案优化技术

顶管沉降源头防控的核心前提是精准掌握场地地层条件，通过精细化地质勘察规避因地层认知偏差导致的施工扰动问题。（1）结合钻孔勘察、原位测试与室内土工试验，精准划分管线穿越地层结构，明确软土、砂层、杂填土等不良地层的分布范围、厚度及埋深，重点获取土体压缩模量、孔隙比、渗透系数等核心力学参数，为施工参数设定提供数据支撑。（2）针对管线沿线地下水分布情况，探明地下水位、含水层分布、渗透特性及承压水发育情况，排查突水、流砂等风险隐患。（3）基于勘察成果开展施工方案专项优化，结合地层特性划分施工区段，针对不同地层制定差异化掘进方案，优化顶管线路走向、工作井布设、施工分区等核心内容，剔除不合理施工工序，从方案层面规避因地层适配性不足引发的地层沉降问题。

2.2 土体改良与超前预加固防控技术

对于软弱、松散、高渗透性等不良地层，土体自身稳定性不足是施工沉降的主要诱因，需通过超前土体改良与地层预加固技术，提升地层整体稳定性，实现源

头控沉。(1)浅层松散地层采用深层搅拌加固技术,通过机械搅拌将固化剂与原位土体充分融合,固化后形成整体性强、压缩性低的加固土体,改良地层原有松散结构,缩小施工扰动产生的土体变形空间。(2)富水砂层、破碎地层采用超前注浆加固技术,选用适配地层的注浆材料,精准控制注浆压力、注浆量及扩散半径,填充地层孔隙,胶结松散土体,形成连续稳定的加固帷幕,阻断地下水渗流通道。(3)对于高含水、高压缩性软土地层,局部采用冻结加固技术,通过低温冻结固化土体,提升地层短期稳定性,为顶管掘进提供安全施工条件。所有加固工艺均结合现场地层参数优化施工配比与施工范围,避免过度加固或加固不足的问题^[2]。

2.3 顶进参数精准调控减沉技术

顶管掘进施工参数的不合理匹配,是引发掌子面土体扰动、土体损失的核心人为因素,通过顶进参数精准调控,可最大限度降低施工对地层的原始扰动。(1)顶进压力调控,结合掌子面土体土压力实时数据,动态匹配顶进推力,保证顶进压力与地层土压力平衡,避免压力过大挤压土体、压力不足导致掌子面土体坍塌松动的问题。(2)掘进速度管控,根据地层软硬程度设定分级掘进速度,软土地层采用低速匀速掘进模式,硬质地层适度调整掘进速率,杜绝高速掘进造成的土体瞬时扰动与结构破坏。(3)刀盘参数优化,匹配地层特性调整刀盘转速、扭矩,保证切削土体均匀连续,减少土体破碎、超挖等问题,控制掘进过程中的土体损失量。同时建立参数动态调控机制,根据掘进过程中地层反馈数据实时微调参数,实现全过程精准控扰、控沉。

2.4 管节减摩、防背土配套减沉技术

顶管长期顶进过程中,管节与周边土体的摩擦阻力、背土堆积问题会持续扰动周边地层,引发地层持续变形,配套减摩、防背土技术是源头控沉的重要辅助手段。(1)管节减摩技术,在管节外壁均匀涂刷专用减摩泥浆,形成完整的泥浆润滑层,填充管节与土体之间的空隙,降低管节顶进过程中的摩擦阻力,减少管节拖拽、挤压土体产生的地层扰动。严格控制泥浆配比、涂刷厚度及补浆频率,保证润滑层的连续性与稳定性。(2)防背土施工技术,优化顶管机外壳结构与切削姿态,掘进过程中及时清理刀盘及机身附着土体,避免土体附着堆积形成背土现象。针对黏土地层等易粘土工况,采用针对性防粘土工艺,杜绝背土拖拽造成的周边土体松动、位移,从施工配套工艺层面减少次生沉降隐患^[3]。

3 顶管施工过程动态沉降治理核心技术

3.1 同步注浆与二次补浆沉降控制技术

顶管掘进过程中,管节脱出机头后会在管壁与地层之间形成环形建筑空隙,该空隙是施工期地层沉降的主要诱因,注浆充填技术是动态控制地层变形的核心工艺。(1)同步注浆施工控制,注浆作业与顶管掘进同步开展,严格匹配掘进速度与注浆速率,根据地层孔隙率、土层渗透特性确定注浆压力与注浆量,保证浆液及时填充管周建筑空隙。软土地层采用低速、稳压注浆模式,避免压力过高造成地层劈裂隆起;砂性地层适当提升浆液稠度,减少浆液流失与填充不密实问题。(2)二次补浆精准施工,针对同步注浆固结收缩、浆液流失产生的残余空隙,在管节成型稳定后开展分区补浆作业。按照“少量多次、稳压慢注”的施工原则,对管线顶部、两侧等空隙集中区域定点补浆,弥补一次注浆缺陷,压实周边松动土体。(3)注浆材料适配优化,根据不同地层工况选用水泥基浆液、水泥-水玻璃双液浆等材料,调整浆液凝结时间与固结强度,保证浆液快速成型、稳定地层,抑制阶段性地层沉降变形。

3.2 地下水稳定与止水防沉降技术

地下水位波动、地下水渗流扰动是富水地层顶管施工沉降超标的重要诱因,水流冲刷会带走细小土颗粒,造成地层空洞与土体固结变形,施工过程需全程管控地下水状态。(1)施工前期止水帷幕布设,在工作井、接收井及管线沿线风险区段设置止水结构,采用高压旋喷、深层搅拌桩形成封闭止水帷幕,阻断外围地下水渗流通道,规避施工区域地下水持续补给问题。(2)动态降水与水位管控,根据掘进进度分区调整降水参数,控制施工区域地下水位稳定低于管底标高,避免掌子面积水、涌水问题。降水过程遵循缓慢降水原则,杜绝快速降水引发的土体快速固结沉降。(3)掌子面止水防护,针对砂层、粉土层等易透水地层,掘进过程中通过机头保压、土体改良等方式封堵地层渗水通道,减少地下水扰动对土体结构的破坏,维持施工过程地层水文条件稳定^[4]。

3.3 近距离建(构)筑物下穿沉降防护技术

城市区间顶管工程多临近道路、管线、建筑物等构筑物,掘进扰动叠加地层变形极易造成周边设施开裂、沉降超标,需针对性采用动态防护技术。(1)施工分区精细化管控,对临近构筑物区段降低掘进速度、减小单次顶进行程,严控机头姿态偏差,减少纠偏带来的附加地层扰动,保持掘进作业平稳连续。(2)构筑物专项防护布设,对老旧建筑、刚性管线等敏感构筑物,提前布设临时加固支撑、隔离防护结构,弱化地层变形对构筑物的传导作用,降低不均匀沉降影响。(3)动态施工参数微调,根据构筑物实时变形数据,动态调整顶进压

力、注浆量等核心参数,在构筑物变形临界值范围内开展掘进作业,实现施工过程动态避险与沉降管控。

3.4 施工全过程沉降动态监测与预警技术

动态监测是实现施工沉降实时调控、超前治理的关键手段,通过全天候数据采集,掌握地层与构筑物变形状态,为沉降治理提供数据支撑。(1)监测点位标准化布设,沿顶管轴线、地表沉降敏感区、周边构筑物布设沉降监测点,覆盖管线近端、远端及构筑物基础关键位置,保证监测数据全面覆盖施工扰动范围。(2)全过程实时数据采集,施工掘进阶段提升监测频率,定时采集地表沉降、土体位移、构筑物沉降数据,精准捕捉瞬时沉降、阶段性沉降变化规律,杜绝数据滞后导致的沉降失控问题。(3)分级预警与动态处置,建立沉降分级预警标准,根据沉降速率、累计沉降量划分正常、预警、超标三个等级。出现预警信号后,立即调整掘进、注浆施工参数,针对超标区段及时采取补浆加固、地层稳压等处置措施,实现沉降问题动态发现、动态治理,保障施工全过程沉降可控^[5]。

4 顶管沉降防治综合技术关键设备与材料研发

依托现有顶管施工装备与材料体系,通过针对性优化、创新研发,完善沉降防治配套设备及材料体系,有效提升施工精度,降低顶管施工对地层的扰动影响。

(1)高效顶管掘进设备优化。针对常规掘进设备结构缺陷与工况适配短板,对机头刀盘、掘进动力系统及姿态调控模块进行升级改造,优化刀盘开口率与刀具布局,适配软土、砂卵石等复杂地层施工。同时改良设备动力输出结构,减少掘进振动与土体挤压扰动。集成智能传感与自动调控模块,可实时采集掘进扭矩、顶进压力、掘进速度等数据并动态调节,打造多工况适配的智能化掘进设备,精准控制地层扰动。(2)高性能注浆材料与设备研发。为满足地层空隙填充、土体加固及沉降控制

需求,研发早强、微膨胀、高密实度新型注浆材料,通过正交试验优化原料配比,改良浆液性能,解决传统浆液固结收缩大、填充密实度不足的痛点。配套研发高精度稳压注浆设备,优化压力与流量调控系统,实现小流量、高精度、持续性注浆,适配不同地层与施工阶段作业需求。(3)沉降补偿专用设备与材料创新。针对施工后残余沉降、地层空隙变形问题,研发小型高精度注浆抬升设备与微型桩施工设备,适配狭小作业空间。配套开发高粘结、高固结、低收缩的专用补偿材料,大幅提升地层空隙填充效果与土体加固强度,有效防控后期沉降。

结束语:本文通过对顶管施工沉降机理、影响因素及防控技术的系统研究,形成了集源头防控、过程治理、设备材料配套于一体的综合沉降防治技术体系。明确了地层条件、施工参数、设备工艺对沉降的差异化影响,验证了精细化预加固、动态注浆调控、实时监测预警等技术的实际管控效果。通过优化掘进设备结构、改良注浆材料性能,有效弥补了传统工艺沉降控制精度不足的短板。

参考文献

- [1]李范竹.基于回归分析的顶管沉降预测分析及管理措施[J].城市道桥与防洪,2026(4):135-140.
- [2]刘大海,周星毅,常帅.大口径顶管施工技术在城市水利工程中的应用[J].云南水力发电,2023,39(12):7-10.
- [3]钱超柱.市政给排水顶管施工轴线偏差控制与地面沉降防治技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(4):057-060.
- [4]陈宇.复杂地质条件下排水顶管施工关键技术标准化应用研究[J].标准生活,2025(8):320-322.
- [5]阳斌,李文华,艾浩泉,王亚,汪杰.上软下硬地层超大矩形顶管施工沉降控制技术[J].建筑机械,2026(1):97-102.