

The practical application of mechanical method contact channel technology in deep soft water stratum

Yuzhang Cui

Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

Deep, water-rich soft soil strata present significant challenges to the construction of cross passages in urban underground transportation projects due to their high porosity, low shear strength, and strong permeability. The mechanical method, known for its high precision and efficiency, has attracted increasing attention for its adaptability and control capacity in complex geological environments. This paper focuses on the practical application of the mechanical method in such challenging strata, analyzing the impact of geological conditions on construction stability, explaining the adaptive configuration of equipment and key construction processes, and exploring the monitoring measures and risk control strategies used on-site. The study shows that reasonable parameter adjustment combined with a real-time monitoring linkage mechanism can significantly reduce the risk of water inrush and soil collapse, improving both tunnel forming quality and construction efficiency. The findings provide a replicable technical path and practical reference for similar projects in the future.

Keywords

mechanical method; cross passage; deep soft soil; water-rich stratum; construction application

机械法联络通道技术在深厚软土富水地层的实践应用

崔玉章

广州地铁建设管理有限公司, 中国 · 广东 广州 510000

摘 要

深厚软土富水地层因其高孔隙率、低剪切强度及强渗透性, 给城市地下交通工程中的联络通道施工带来显著挑战。机械法作为一种具备高精度、高效率的施工手段, 在复杂地质环境下的适应性与控制能力受到广泛关注。本文围绕机械法在深厚软土富水地层中的实际应用展开研究, 分析地质条件对施工稳定性的影响, 阐述机械装备的适应性配置和关键工艺流程, 探讨现场施工过程中采用的监测手段与风险控制策略。研究结果显示, 合理的参数调控与实时监测联动机制可显著降低涌水突泥风险, 提升通道成型质量与施工效率。相关结论为后续类似工程提供了可复制的实践路径与技术参考。

关键词

机械法; 联络通道; 深厚软土; 富水地层; 施工应用

1 引言

随着城市地下空间资源开发的不断推进, 地铁、综合管廊等工程中联络通道的建设需求日益增长。在地质条件复杂的地区, 尤其是深厚软土富水地层中进行隧道连接施工, 常伴随地层扰动大、水土突涌频繁、结构受力异常等技术难题。传统明挖或人工暗挖方法在此类地层中存在效率低、控制难的问题, 已难以满足现代城市建设的高标准要求。机械法施工技术凭借其自动化程度高、作业精度高、施工干扰小等优势, 在地下联络通道建设中逐步成为主导工艺。本文以机械法在深厚软土富水地层中的应用实践为研究重点, 系统分析地质对施工的制约特性, 剖析机械装备的匹配逻辑与工

艺实施要点, 并结合现场监测与控制技术, 总结经验, 为复杂地质下的隧道施工提供技术借鉴。

2 深厚软土富水地层对机械法联络通道施工的制约因素

深厚软土地层因天然含水率高、孔隙比大, 导致其抗剪强度低、变形模量小, 施工扰动下极易发生塑性流变。盾构推进过程中, 土体无法有效提供反力支撑, 常出现设备姿态偏移、尾部同步注浆失效等现象, 进一步影响盾构机的掘进稳定性。软土的剪切强度仅为 $8 \sim 15\text{kPa}$, 面对盾构推进时所需反力通常在 1.5MN 以上, 其承载力明显不足, 极易引发掌子面失稳与涌土现象。在作业压力和土压失衡状态下, 设备沉降、推进阻力增大成为普遍问题, 需依赖辅助加固与姿态监控技术协同控制, 确保掘进过程的力学稳定与结构精度。盾构拼装环缝、纵缝的橡胶止水带及其嵌固质量直

【作者简介】崔玉章 (1981-), 男, 中国河南汝南人, 本科, 高级工程师, 从事轨道交通建设管理研究。

接影响整体抗渗性能，当地层孔隙水压力持续升高时，传统封堵材料在剪切变形下容易失效，产生漏水点。施工过程中必须采取多道止水结构、正负压注浆结合等方式，保障结构止水连续性与施工安全。

3 机械法施工装备在复杂地质中的适应性配置方案

3.1 盾构机刀盘结构对软流塑土层的匹配性优化

软流塑性地层掘进中，刀盘需兼顾切削效率与防泥饼性能。针对孔隙比大于 1.2、含水率超过 40% 的软土，刀盘结构应采用开口率大于 35% 的多窗格布局，确保土压均匀释放与渣土顺畅排出。切削工具以滚刀与铲刀组合布置为宜，提升对不同硬度夹层的适应能力。针对部分区域地层中夹杂粒径超过 30mm 的粉砂或卵石，应配置可更换式硬质刀具，增强抗磨性能并减少施工干预频次。刀盘中心区域设置土压平衡舱通气孔，控制土仓压力稳定波动在 $\pm 0.05\text{MPa}$ 范围内，提升掘进连续性和设备安全性。刀盘整体结构还应通过有限元仿真优化其刚度分布，以应对非均质荷载引起的受力集中^[1]。

3.2 掘进参数调控系统对突涌与沉降的应变调节功能

在渗透系数超过 $1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、孔压超过 0.5MPa 的地层中，盾构推进必须通过参数动态调控来避免掌子面突涌及周边沉降加剧。推进速度控制在 20 ~ 40mm/min 内可有效减少扰动半径，保持前方土体稳定性。刀盘转速维持在 0.5 ~ 1.5rpm 之间，结合扭矩实时监控，可识别硬夹层或结水带突变情况，提前预判地质异常。同步注浆压力应高于地层孔压 0.1 ~ 0.15MPa，确保浆液均匀填充脱空，注浆量精控在 0.9 ~ 1.1 倍环空体积，以避免地面隆起或结构拉裂。掘进中采用参数闭环控制系统，通过数据回传实现自动微调，有效缓解突泥风险与地表不均沉降，图 1 为机械法联络通道洞门施工结构解析。

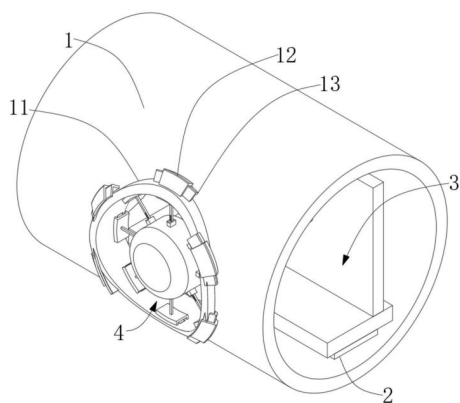


图 1 机械法联络通道洞门施工结构解析

4 机械法联络通道施工工艺在典型工况下的实施要点

4.1 掘进姿态控制系统在长距离掘进中的轨迹保持作用

在盾构长距离掘进过程中，姿态控制系统依赖多源传感器的联合布设与数据融合处理确保掘进轨迹的准确性。姿态传感器每隔 6 米布设一次，与激光导向仪、惯性导航单元形成互补结构，误差叠加控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。数据融合算法采用卡尔曼滤波器与神经网络模型协同优化处理流程，对施工扰动引起的瞬态漂移进行动态修正。掘进路径在 500 米内累计误差控制在 30mm 以内，较传统单点激光导向系统提高精度 25% 以上^[2]。系统在同步注浆与刀盘调速过程中的联动响应延迟不超过 0.2 秒，保证姿态数据实时传输与修正响应的连续性。

4.2 止水帷幕与超前加固工艺在高涌水段的协同作用

富水夹层中含水率超过 42%，地下水压常达 0.6MPa，高压旋喷帷幕的施工需实现连续闭合以形成有效止水屏障。旋喷工艺采用三重管系统，浆液注入压力控制在 25MPa，旋喷直径达到 2.2 米，帷幕重叠宽度控制在 0.3 米以内，确保帷幕接缝处无渗透通道。浆液水灰比为 0.8，凝结时间不超过 4 小时，28 天抗渗等级达 P12。帷幕闭合率经钻孔检测达到 98% 以上，渗透系数由 10^{-3}cm/s 降至 10^{-7}cm/s 。该工艺与盾构推进同步进行，形成掘进前方的稳定水压隔离区，显著降低掌子面突泥与渗水概率^[3]。

4.3 管片设计与拼装工序对结构稳定性与防水性能的保障

4.3.1 管片接缝结构与止水材料的耦合防渗设计模式

联络通道采用内径 6 米的钢筋混凝土管片，厚度为 35 厘米，宽度为 1.5 米，接缝设计采用双曲面凹凸嵌合结构，接触面积提升 20%。止水材料使用 EPDM 橡胶密封圈，嵌入深度 12 毫米，受压变形量为 30%，密封圈密度达到 1.35g/cm³，可承受水压 0.8MPa。拼装完成后缝隙控制在 2 毫米以内，通过注入 PU 二次注浆材料，形成界面柔性防渗带，28 天拉伸强度达到 7.8MPa。结构设计结合三维有限元模拟，拼装后整体变形量控制在 $\pm 5\text{mm}$ 范围内，确保管片体系在受水压与地应力作用下具备稳定闭合与抗渗能力。

4.3.2 拼装设备稳定性对环缝闭合精度与密封性的控制效应

拼装作业采用液压机械臂完成管片搬运与定位，其定位精度控制在 $\pm 2\text{mm}$ ，安装时间控制在每环 14 分钟内。拼装过程中采用双道激光测距系统实时监测管片角度与拼接间隙，角度偏差不得超过 0.5°。拼装完成后环缝闭合压力达到 0.3MPa，确保密封圈全面压紧。通过与同步注浆系统联动控制，在拼装完成 3 分钟内完成初注作业，浆液压力为

0.6MPa, 注浆充满度达到 96% 以上。设备系统稳定运行率保持在 99% 以上, 有效降低人为干预频次, 提升拼装整体精度与环缝止水连续性, 图 2 为一种深厚软土层联络通道的拼装搭建方法。

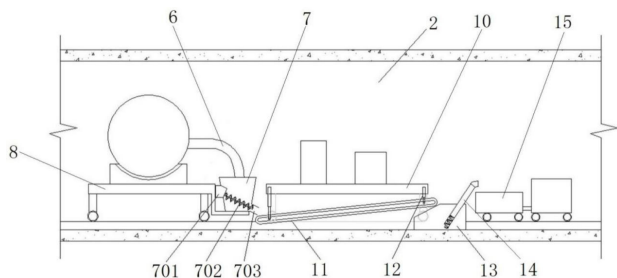


图 2 一种深厚软土层联络通道的拼装搭建方法

5 机械法施工实践中的监测手段与风险控制技术

5.1 位移、沉降与水压实时监测系统的布设与反馈机制

在深厚软土富水地层中开展联络通道施工需依赖多维度实时监测系统动态掌握地层变形、水压波动与结构响应的全过程行为。系统由盾构姿态感应器、地表及井下沉降监测点、渗压计、孔隙水压力计等构成, 沿隧道轴线每 20 米布设一组监测节点, 关键部位密度加倍, 形成三维数据网格。盾构推进过程中, 地层水平位移累计变化大于 10mm、地表沉降速率超过 2mm/d、孔压突变值高于 0.05MPa 时, 系统通过中控平台发出报警信号并推送至前端操作台, 触发预警干预机制。反馈机制基于时序数据趋势自动分析与预测模块, 具备 5 分钟内完成监测数据处理与结果输出的能力, 实现与掘进速度、注浆压力、推进力等参数的联动调节, 确保结构安全与施工可控^[4]。

5.2 施工数据预警模型在突发地质事件中的响应策略

机械法施工过程中, 地质突变事件如突涌、冒泥、地表塌陷的预判依赖于大数据驱动下的多参数融合模型。模型以推进速度、刀盘扭矩、地表沉降、水压变动、注浆量等五类实时数据作为输入因子, 通过逻辑回归与支持向量机算法建立阈值识别系统。当掘进阻力在 1 小时内累计增加超过 20%, 沉降速率增长趋势超过 1.5 倍, 浆液注入效率下降 10% 以上时, 模型触发预警并分类指示可能风险源。响应

策略基于事件分级管理, 按黄、橙、红三档实施推进减速、注浆加压或掘进暂停等处置指令。系统具备自学习能力, 可根据已处理事件持续修正模型参数, 提高预测准确率, 在既有工程中精度达 92% 以上, 显著提升了应对复杂地质环境的现场响应效率。

5.3 地层-结构-设备联动体系在全过程中的风险闭环管控

在复杂富水软土环境中推进联络通道工程需构建多维一体化的风险闭环控制体系, 实现从地质感知、结构响应到设备调节的全过程动态管理。该体系以地层监测、结构应力、设备运行状态三类数据为核心, 通过中央控制系统实时采集、传输、分析, 形成互为触发的联动机制。盾构姿态漂移超过 3mm、管片内力超限 10%、同步注浆压力偏差达 0.15MPa 等任一条件被触发, 系统即刻自动调整推进力与推进姿态, 指令注浆系统增压并发出结构复检提示。每道工序设有前馈控制模块, 预测性评估下一步作业的环境参数变化, 做到风险不留盲区。全过程数据在作业完成后回传归档, 用于溯源分析与系统优化, 形成闭环控制与智慧决策一体的运行机制, 提升隧道施工全过程的安全性与可控性。

6 结语

机械法联络通道技术在深厚软土富水地层中的应用, 不仅体现了现代隧道施工装备与工艺对复杂地质环境的高度适应能力, 也彰显出监测手段与风险控制体系在保障工程质量和安全方面的重要价值。通过精细化的掘进控制、高效的止水加固工艺及智能化的监测反馈机制, 实现了施工过程的连续性与结构成型的稳定性, 为类似地质条件下的隧道建设提供了成熟可靠的技术路径。今后可结合多源数据融合与系统集成优化, 持续提升机械法施工的智能化水平与工程保障能力。

参考文献

- [1] 李亮, 张太忠, 单广灿, 赵炼恒. 深厚富水软土地层深基坑水平封底与降水联合优化设计方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, (04): 105-109.
- [2] 何阳油, 陈集勇, 杨才兴. 临海深厚富水软土地层大直径泥水盾构始发技术[J]. 建设监理, 2025, (04): 105-109.
- [3] 汪良军, 王松茂, 杨超. 富水深厚软土地层超深地下连续墙施工关键技术[J]. 广东水利水电, 2023, (12): 108-115.
- [4] 詹朝敬. 富水深厚软土地层下的水泥搅拌桩成桩质量关键影响因素分析[J]. 中国水能及电气化, 2023, (11): 66-70+43.