

复杂地质条件下地铁盾构施工技术创新与风险控制

郭磊

铁四院(湖北)工程监理咨询有限公司 湖北武汉 430000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20230

[摘要] 目前国内较多的地铁隧道、电力隧道、综合管廊等工程采用盾构施工,从地下进行掘进施工,受到软硬交错地层、高水压砂层、断层破碎带等不良地质的影响,使得掘进效率受限、安全风险攀升、质量控制难度加大,因此盾构施工之前进行科学有效的地质调查十分有必要。本文以国内多座城市地铁工程实践为素材,围绕复杂地质条件下盾构施工技术革新路径与风险管控体系展开论述。研究认为,地层预处理技术、壁后同步注浆工艺与BIM信息化管理平台的协同运用,对改善掘进工效、保障施工安全均产生了实质性推动作用;而以风险辨识评估为前置、以动态监测反馈为抓手、以应急预案演练为兜底的闭环管控机制,则有效压降了复杂地层中的施工风险。本文旨在为同类工程提供可参考的技术思路与管理经验。

[关键词] 复杂地质条件; 地铁盾构; 技术创新; 风险控制

1 引言

盾构法是一种常用于城市地铁、铁路、公路及水下隧道施工的先进隧道施工方法。它通过在地层中使用盾构机进行掘进、支护和衬砌,实现了隧道施工的高效、安全与自动化,目前其已成为当前国内城市地铁隧道建设的首选工法。然而,我国幅员辽阔,各城市地质条件差异悬殊,不少地铁线路不得不穿越软硬交错地层、高水压砂层、断层破碎带等不良地质体。这些复杂地质环境严重影响了掘进节奏,同时对施工安全也构成了严峻考验。

近年来盾构装备制造水平与施工管理能力均有了很大的提升,但复杂地质条件下的难题已并未被彻底解决。地层特性的不可完全预知性、掘进参数与地层响应之间的非线性关系、以及突发性地质灾害的难以准确预判等,仍然是工程技术人员需要解决的问题。在此背景下,持续推动技术工艺革新,构建高效的风险管控体系,已成为行业亟待深入探讨的核心议题。

本文从技术革新与风险防控两个维度展开系统梳理。首先剖析复杂地质条件对盾构施工的具体影响机理及关键技术要点,继而围绕预处理技术、同步注浆工艺与信息化管理三项核心技术创新展开论述,最终形成对复杂地质条件下盾构施工技术发展方向与风险管控策略优化的系统性认识。

2 复杂地质条件下盾构施工的影响

2.1 复杂地质条件对盾构施工的多维影响

城市地铁隧道埋深通常位于浅表层,所穿越的地层往往类型多样、性质迥异。从工程实践来看,对盾构施工构成突出挑战的复杂地质条件主要集中在以下几个方面:

其一,软硬不均地层。此类地层的典型特征是岩土强度

在纵横向分布上急剧变化,盾构机刀盘在同一旋转周期内受力极不均匀,刀具承受冲击荷载频繁,非正常磨损与崩刃事故的发生率明显偏高。掘进参数的调整往往跟不上地层变化的速度,姿态控制难度加大,管片拼装质量亦容易受到影响。

其二,高地下水与富水砂层。水头压力较高的地下水与透水性强的砂层组合出现时,极易在掘进过程中引发涌水涌砂险情。泥水式盾构若泥水压力设定不当,可能导致开挖面失稳;土压式盾构若渣土改良效果不佳,螺旋输送机出口处易发生喷涌,危及作业人员与设备安全[4]-[5]。

其三,断层破碎带与膨胀性土体。断层破碎带岩体完整性差、自稳能力弱,盾构掘进时容易发生开挖面坍塌或刀盘被卡等事故。膨胀性土体遇水膨胀、失水收缩的工程特性,则可能导致盾构机壳体被抱死或管片承受过大的围岩膨胀压力。

上述复杂地质条件的叠加效应,使得施工参数的精确控制变得异常困难。推力、扭矩、刀盘转速、出土量、注浆压力等关键参数的设定需要在保障开挖面稳定与控制地层变形之间反复权衡,稍有偏差便可能引发地表过量沉降或隧道衬砌结构受损。因此,施工前的精细化地质勘察与针对性的盾构机选型配置至关重要。选型不仅要关注设备标称性能参数,更应结合具体工程地质剖面,对刀盘开口率、刀具类型与布置、盾尾密封形式、渣土改良系统等细节进行定制化设计。

2.2 复杂地层条件下盾构施工技术要点

盾构法之所以在城市地铁隧道建设中占据主导地位,根本原因在于其极强的工程环境适应性,基本能够覆盖各类常见地质条件[6]-[8]。当前国内地铁工程中广泛采用的盾构机型主要包括泥水加压式、土压平衡式以及复合式土压平衡盾

构三种类型,各型盾构的适用范围与作业模式存在显著差异。

(1) 土压平衡盾构的作业模式选择

土压平衡盾构机是一种广泛应用于地下隧道建设中的先进机械设备,它通过在开挖面上建立一个稳定的土压力环境来实现隧道的连续掘进,并能够根据地层条件在敞开式、半敞开式和土压平衡式三种模式间灵活切换。当掘进穿越稳定性较好的硬岩地层时,可采用敞开式作业,推力与掘进速度均有保障;遇软硬过渡段或稳定性一般的地层时,半敞开式模式可在一定程度上维持开挖面压力平衡;而在软土、砂层等自稳能力差的地层中,则必须切换至土压平衡模式,通过精确控制土仓压力来维持开挖面的稳定。模式切换时机的准确判断与切换过程的平滑过渡,是保证复杂地层中掘进质量的关键。

(2) 泥水盾构的泥水管控

泥水盾构是通过泥水加压平衡方式维持开挖面稳定的隧道施工装备。泥水盾构的核心系统是由泥浆循环系统和压力平衡机构组成,利用膨润土泥浆在开挖面形成渗透膜实现水土压力动态平衡。其掘进的效果主要取决于泥水质量的稳定性,最核心的环节是在泥水密度的控制环节。因此,施工前必须对泥水密度进行严格检测与标定,确保其能符合规范要求。泥水密度过低,泥膜形成质量差,开挖面难以维持稳定性。泥水密度过高的情况,则泥水输送能耗增加,甚至可能导致泥浆管路堵塞。只有泥水密度取值合理且波动范围可控,才能在保障开挖面稳定的同时兼顾掘进速度与成型质量。

(3) 隧道轴线姿态控制

正确合理的掘进姿态和管片姿态是确保隧道轴线不超限的关键所在。姿态控制的目标在于将盾构机的实际掘进轨迹与设计线路之间的偏差控制在规范容许范围之内。实现这一目标首先要依赖于高精度的导向测量系统,测量作业须严格遵守技术规程,同时采用合理的测量方法。然后,需要操作人员按照测量数据及时调整推进油缸的编组与压力分配,实现姿态的主动纠偏。轴线姿态的有效控制不仅保障了隧道线形满足设计要求,也为管片拼装质量与后期轨道铺设精度奠定了基础。

3 盾构施工技术创新与风险管控体系

3.1 核心技术创新

面对复杂地质条件带来的挑战,近年来行业内围绕盾构施工工艺进行了一系列技术革新,其中预处理技术、同步注浆技术与BIM信息化管理三项创新成果的工程应用效果尤为突出。

(1) 地层预处理技术

地层预处理的核心思路是在盾构掘进到达之前,先行对不良地质体进行加固或改良,从根本上改善掘进作业条件。目前常用的预处理手段包括注浆加固与冻结法两大类。注浆加固通过向地层中注入水泥浆液或化学浆液,使松散破碎的岩土体胶结成具有一定强度的整体,从而提升地层自稳能力,降低开挖面坍塌风险。注浆材料同时承担着加固已拼装管片环与封堵渗水通道的双重功能。冻结法则利用低温盐水循环使地层中的孔隙水冻结成冰,形成强度高、密封性好的冻土帷幕,特别适用于含水量大、渗透性强的地层预处理。两种方法各有优劣,注浆加固施工便捷、成本可控,适用范围更广;冻结法加固效果均匀可靠,但施工周期较长、能耗偏高,需根据具体工况择优选用。

(2) 同步注浆技术

盾构掘进过程中,管片脱离盾尾后与开挖面之间会形成环状建筑空隙,若不能及时填充密实,上方地层势必发生沉降变形。盾构隧道同步注浆能够在盾尾间隙产生后,对其填充并发挥作用,从注浆的目的来看,这种方法对地面沉降等关键工程质量指标的控制效果更好,相对其他注浆方式更为先进。与传统管片拼装完成后的延迟注浆相比,同步注浆大幅缩短了空隙暴露时间,有效遏制了地层松弛与沉降的发展。注浆材料通常采用硬性浆液或可硬性浆液,前者早期强度高但可泵性稍差,后者流动性好且凝结时间可控。注浆量、注浆压力与注浆速度的合理匹配,是确保填充效果与避免管片上浮的关键。

(3) BIM 信息化管理技术

BIM 软件通过接入地质雷达、钻探数据、水文资料等,构建高精度三维地质模型,直观展示土层分布、地下水位、断层带等关键信息,为盾构施工管理带来了从经验驱动到数据驱动的范式转变。通过构建盾构隧道的数字孪生模型,将地质信息、设计参数、施工进度、设备状态、监测数据等多源信息集成于统一平台,实现施工全过程的可视化与精细化管理。BIM 软件可模拟不同掘进速度、刀盘扭矩、注浆压力等参数组合下的设备运行状态,预测刀具磨损、地表沉降趋势,帮助工程师选择最优施工方案。BIM 软件的引入,使得原本分散在各专业、各部门的信息得以高效流转与共享,决策的科学性与响应的时效性均得到明显改善。

3.2 风险管控体系构建

盾构施工风险管控并非单一措施的简单堆砌,而是需要构建覆盖事前、事中、事后的全链条管控体系。合理的盾构

下穿参数设定可有效减轻地面及铁路路基的沉降幅度,而系统化的风险管控框架则能从根本上提升项目的安全韧性。本文将风险管控体系归纳为三个递进层次:

(1) 风险辨识与评估

风险辨识与评估是整个管控体系的基础与前提。在施工启动前,应综合运用地质勘察资料分析、类似工程案例借鉴、专家咨询论证等方法,对施工过程中可能遭遇的风险进行全面梳理与分级评估。评估内容应涵盖地质风险,例如断层、地下溶洞、地下管线等方面;设备风险例如盾构机故障、刀具异常磨损等方面;工艺风险,例如注浆失效、姿态失控等方面以及环境风险[9],并根据以上风险编制风险登记册,同时形成应对预案。风险等级的划分则按风险发生的概率和潜在后果的严重程度来进行综合判定,确保管控资源的配置与风险等级匹配。

(2) 风险应对与过程控制

施工阶段的风险管控重点在于根据现场的实际情况进行动态的调整。首先,优先选择与地层条件匹配的盾构装备及适合地层条件的施工工艺。同时,施工参数需严格按照审批通过的方案来执行。其次,建立健全安全管理制度。强化所有人员的安全培训和班前技术交底,确保一线作业人员熟知操作流程与应急处置流程,保证作业人员的安全。最后,需对关键工序实施旁站监督,确保所有管片的拼装质量与注浆的填充效果均达到要求。

(3) 监测反馈与持续改进

施工监测是在建工程中通过监测仪器对支护结构、周围岩土体及周边环境变化进行量测的技术手段,由施工单位实施施工监测,建设单位委托专业单位开展第三方监测,参建各方(监测单位、施工、监理、设计、业主)共同构建包含组织保障体系的监测系统,触发分级预警并指导消警措施,是验证管控效果与捕捉异常信号的重要手段。通过在隧道沿线布设监测点位,对管片结构内力与变形、地表及深层沉降、地下水位变化、周边建构筑物位移等指标实施不间断采集,获取第一手数据。监测数据的分析结果不仅用于评估当前施工状态的安全性,也是反馈至施工参数调整的重要参考。例如,当监测数据出现异常趋势时,及时调整掘进参数、注浆方案或辅助工法,将风险遏制在萌芽阶段。从监测到分析再到调整最后验证的闭环机制,使得风险管控从被动应对转向主动预防。

4 结论与展望

复杂地质条件下地铁盾构施工的技术创新与风险管控,

是一项涉及技术攻关、管理优化、材料迭代等多个层面的系统性问题。本文通过以上分析,得出以下结论:

首先,技术创新是破解复杂地质难题的首要路径。地层预处理技术通过提前改善不良地质体的工程特性,从源头上降低了掘进难度与风险。同步注浆技术实现了建筑空隙的即时填充,有效抑制了地层沉降的发展。BIM软件打破了信息孤岛,推动了施工决策从经验判断向数据驱动的转变。各项技术各有侧重、相互补充、协同运用,对施工效率的提升与施工现场的安全保障均起到了推动作用。

其次,系统化的风险管控体系是守住安全底线的重要屏障。以风险辨识评估为前置、以过程管控为核心、以监测反馈为纽带、以应急预案兜底的闭环管控机制,实现了对施工风险的全周期、全覆盖管理。因此,这一体系能够有效压降复杂地层中的施工风险,提升项目安全性。

最后,数据驱动的动态决策是未来发展方向。人工智能、计算机、信息化的快速发展,将推动技术创新措施的精准落地,风险管控策略的动态优化,实时监测数据的支撑与分析。构建更为完善的数据采集、分析、决策的闭环,将施工管理推向更加智能化、精细化的新阶段。

[参考文献]

- [1] 邵长青. 地铁隧道盾构法施工风险分析与控制对策[J]. 工程机械与维修, 2022, (03): 162-164.
- [2] 胡东. 地铁隧道盾构施工风险管理研究[J]. 运输经理世界, 2024, (08): 141-143.
- [3] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 28(1): 97-109.
- [4] 靳晨辉. 地铁盾构施工安全隐患及防范解决措施[J]. 工程技术研究, 2024, 9(10): 174-176.
- [5] 牛婷婷. 复杂地层条件下地铁工程盾构施工技术安全控制研究[J]. 运输经理世界, 2022, (24): 132-134.
- [6] 张恒. 复杂地质条件下地铁盾构施工要点分析[J]. 工程建设与设计, 2023, (16): 179-181.
- [7] 袁伟嘉. 复杂地质条件下的市政地铁隧道盾构施工技术研究[J]. 工程机械与维修, 2024, (02): 120-122.
- [8] 魏小龙. 复杂地质条件下地铁隧道盾构始发掘进施工技术研究[J]. 建筑机械, 2024, (02): 130-134.
- [9] 张立宗. 在复合地层进行地铁隧道盾构施工的控制技术研究[J]. 工程机械与维修, 2024, (02): 129-131.

作者简介: 郭磊(1982.10-), 男, 汉族, 湖北天门人, 本科, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通。