

地铁盾构施工风险控制技术

张 伟

中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650200

摘 要: 地铁盾构施工具有隐蔽性强、地质条件复杂等特点,易受地质水文、施工设备、工艺操作及周边环境等因素影响,引发坍塌、涌水涌砂、设备故障等安全隐患。本文先识别各类核心风险并分类梳理,构建科学的风险评估体系,结合定性与定量方法划分风险等级,再针对性提出端头加固、设备监测、工艺优化等控制技术,形成“识别-评估-控制”的闭环管理,为地铁盾构施工安全、高效推进提供技术支持与实践参考。

关键词: 地铁盾构; 施工风险; 控制技术

引言:随着城市化进程加快,地铁建设规模持续扩大,盾构施工因高效、环保、对地面扰动小等优势,成为地铁隧道施工的主流工艺。但城市地下地质水文条件复杂,加之施工环境受限、设备运行要求高,盾构施工过程中各类风险频发,不仅影响施工进度,还可能造成人员伤亡与财产损失。因此,系统识别施工风险、构建完善的评估体系、研发高效的控制技术,对保障地铁盾构施工安全、推动地铁建设高质量发展具有重要现实意义。

1 地铁盾构施工主要风险识别与分类

1.1 地质水文类风险

(1) 富水粉细砂、软土地层引发的坍塌风险:此类地层稳定性极差,抗剪强度低,盾构掘进时易出现掌子面失稳,引发土体坍塌,进而导致地表沉降超标,甚至损毁周边建筑。施工中若降水不充分或掘进速度过快,坍塌风险会显著提升。(2) 高水压环境下的涌水涌砂风险:当盾构穿越地下水位较高的地层或含水层时,高水压易突破盾构密封系统,引发涌水涌砂事故,不仅会导致施工中中断,还可能造成地层空洞、地面塌陷,威胁施工人员安全。(3) 复杂地层(如复合地层、断层)导致的施工阻碍风险:复合地层岩性差异大,软硬交替易造成盾构机卡机、刀盘磨损加剧;断层破碎带岩体松散,易发生坍塌、突水,增加施工难度和安全隐患。

1.2 施工设备类风险

(1) 盾构机刀盘磨损、断裂及更换相关风险:刀盘长期切削岩土,易出现刀具磨损、崩齿,严重时导致刀盘断裂,需停机更换,影响施工进度;更换过程中若防护不当,易发生机械伤害或土体坍塌。(2) 液压系统、电气系统故障引发的停机风险:液压系统负责盾构推进、管

片拼装等关键动作,电气系统保障设备正常运转,任一系统故障都会导致盾构停机,不仅延误工期,还可能因停机时间过长引发掌子面失稳。(3) 盾尾密封失效导致的渗漏风险:盾尾密封装置若出现老化、损坏,会导致地下水、泥浆渗入隧道内部,引发隧道积水、管片腐蚀,严重时影响隧道结构安全^[1]。

1.3 施工工艺类风险

(1) 掘进参数不合理引发的地表沉降风险:掘进速度、土仓压力、推进力等参数设置不当,会破坏地层平衡,导致地表不均匀沉降,进而损坏周边建筑、地下管线。(2) 管片安装错位、破损及接缝渗漏风险:管片拼装时若定位偏差、操作不当,会出现错位、破损,接缝处密封不严易引发渗漏,影响隧道防水效果和结构稳定性。(3) 同步注浆不密实导致的地层变形风险:同步注浆若浆液配比不合理、注浆量不足,会导致管片与地层间形成空隙,引发地层变形,加剧地表沉降。

1.4 周边环境类风险

(1) 下穿既有地铁、铁路等构筑物的变形风险:盾构下穿既有构筑物时,若地层扰动过大,会导致构筑物沉降、变形,影响其正常使用,甚至引发安全事故。(2) 地下管线破坏引发的泄漏、塌陷风险:施工前管线勘察不清或掘进时扰动过大,易破坏供水、燃气、电力等地下管线,引发泄漏、爆炸或地面塌陷等次生灾害。(3) 施工振动、噪声对周边建筑及居民的影响风险:盾构掘进产生的振动易导致周边老旧建筑开裂,噪声污染会影响居民正常生活,引发投诉纠纷。

2 地铁盾构施工风险评估方法与体系构建

2.1 风险评估的核心原则与流程

(1) 风险评估的科学性、系统性原则:科学性原则要求评估过程以地质勘察数据、施工参数等客观资料为依据,采用规范的评估方法,避免主观臆断,确保评估

作者简介: 张伟(1985),男,汉族,河南开封人,本科,高级工程师,主要从事盾构施工技术及管理工作。

结果真实可靠；系统性原则强调全面覆盖盾构施工全流程，兼顾地质、设备、工艺、周边环境等各类风险，梳理风险间的关联关系，避免遗漏关键风险点，为后续防控提供全面支撑。（2）风险识别-风险分析-风险分级的完整流程：风险识别是基础，通过现场勘察、资料调研、专家研讨等方式，全面梳理施工各环节可能存在的风险因素，明确风险来源；风险分析是核心，结合数据资料和施工实际，分析各风险的发生概率、影响范围及危害程度，明确风险等级划分依据；风险分级是关键，根据风险分析结果，按既定标准划分风险等级，为差异化防控措施制定提供针对性依据，形成“识别-分析-分级”的闭环流程^[2]。

2.2 常用风险评估方法及应用

（1）定性评估方法：专家调查法通过邀请盾构施工、地质勘察等领域专家，结合经验对风险因素进行打分、研判，操作简便、成本较低，适用于施工前期风险初步识别和评估；故障树分析法以某一重大风险事故为顶事件，梳理导致事故发生的各类因果关系，构建故障树，清晰呈现风险传导路径，便于精准定位关键风险点。（2）定量评估方法：层次分析法将复杂的风险评估问题分层拆解，通过两两比较确定各风险因素的权重，结合量化评分得出综合评估结果，逻辑性强、精度较高；模糊综合评价法针对风险因素的模糊性和不确定性，通过建立模糊评价矩阵，对风险进行量化打分，适用于多因素、多等级的风险评估场景^[3]。（3）不同评估方法的适用场景与局限性对比：定性方法适用于施工前期、资料不全的场景，局限性是主观性较强、精度不足；定量方法适用于施工中期、资料详实的场景，能提供精准量化结果，但操作复杂、对数据要求高，需结合工程实际灵活选用，必要时采用定性与定量结合的方式提升评估准确性。

2.3 风险等级划分与评估体系构建

（1）风险等级划分标准：结合盾构施工风险特点，以风险发生概率和危害程度为核心指标，划分四级风险：低风险指发生概率低、危害小，不影响施工正常进行；中风险指发生概率中等、危害较大，可能导致施工延误；高风险指发生概率高、危害严重，可能引发安全事故；极高风险指发生概率极高、危害极大，易造成重大人员伤亡和财产损失。（2）基于BIM与大数据的风险评估体系构建：依托BIM技术构建盾构施工三维模型，整合地质、设备、工艺等数据，实现风险可视化管理；结合大数据技术，收集施工过程中的实时数据，通过算法分析风险变化趋势，实现风险动态预警；构建“数据采集-风险分析-动态预警-防控反馈”的闭环评估体系，提升风险评估的

智能化水平。（3）评估体系的验证与优化路径：通过实际工程案例验证评估体系的科学性和实用性，对比评估结果与实际风险发生情况，修正评估指标权重和等级划分标准；结合施工技术升级、地质条件变化，持续优化体系内容，完善数据采集渠道和分析算法，确保评估体系始终适配盾构施工实际需求，为风险防控提供可靠支撑。

3 地铁盾构施工关键风险控制技术与实施措施

3.1 地质水文风险控制技术

（1）端头加固技术的应用：针对富水粉细砂、软土地层及端头土体，采用高压旋喷桩或搅拌桩进行加固处理，通过高压喷射或机械搅拌将水泥浆与土体充分混合，形成强度高、整体性好的加固体，有效提高端头土体抗剪强度和稳定性，防止盾构始发、接收时发生坍塌、涌水事故，加固范围需覆盖盾构断面及周边一定区域，确保加固效果达标。（2）富水地层膨润土泥膜、高分子聚合物防喷涌技术：在富水、高水压地层施工时，向土仓内注入膨润土浆液，形成致密的泥膜，阻隔地下水渗入，同时调节土仓压力，平衡地层水压；搭配高分子聚合物，改善泥浆流动性和护壁效果，降低涌水涌砂风险，施工中需根据水压变化实时调整浆液配比，确保泥膜完整性和防喷涌效果^[4]。（3）复杂地层刀具配置优化与掘进参数调整：针对复合地层、断层等复杂地质，优化盾构机刀具配置，硬岩段选用耐磨滚刀，软土段选用刮刀，复合地层采用滚刀与刮刀组合配置；同步调整掘进参数，控制掘进速度、土仓压力和推进力，避免因参数不合理导致刀盘磨损加剧、掌子面失稳，确保盾构平稳掘进。

3.2 施工设备风险控制技术

（1）盾构机关键部件（刀盘、密封件）的监测与维护：建立刀盘、盾尾密封件等关键部件的常态化监测机制，通过传感器实时监测刀盘磨损量、密封件密封性能，定期对刀盘进行检查、打磨和刀具更换，对密封件进行清洁、润滑和更换，防止因部件损坏引发设备故障和渗漏风险，延长设备使用寿命。（2）设备故障预警系统的安装与运行：在盾构机上安装故障预警系统，整合液压、电气、机械等各系统运行数据，通过大数据分析实时监测设备运行状态，当出现参数异常时，及时发出预警信号，提醒工作人员排查隐患，避免故障扩大导致停机事故，保障设备连续稳定运行。（3）备品备件储备与应急维修机制：结合施工实际和设备易损部件特点，足额储备刀盘刀具、密封件、液压元件等备品备件，建立备件管理台账，确保应急时能够快速调配；制定完善的应急维修机制，明确维修流程、责任人员和应急物资，针对常见故障制定专项维修方案，缩短维修时间，减少工

期延误。

3.3 施工工艺风险控制技术

(1) 掘进参数动态优化与闭环控制: 建立掘进参数动态监测与优化体系, 实时采集掘进速度、土仓压力、推进力、出土量等参数, 结合地质条件和地表沉降数据, 通过算法分析优化参数设置, 形成“监测-分析-调整-反馈”的闭环控制, 避免因参数不合理引发地表沉降、掌子面失稳等风险, 确保施工质量。(2) 管片安装精度控制: 采用全站仪与激光导向系统联合定位, 实时监测管片安装位置、高程和轴线偏差, 指导施工人员调整管片姿态, 确保管片安装错位、错台量控制在规范范围内; 安装完成后及时进行紧固, 加强管片接缝处理, 减少管片破损和接缝渗漏风险^[5]。(3) 同步注浆工艺改进与二次注浆补强技术: 优化同步注浆浆液配比, 提高浆液流动性、凝结速度和强度, 确保注浆量充足、注浆均匀, 填充管片与地层间的空隙; 对注浆不密实、存在空隙的区域, 采用二次注浆进行补强, 选用高强度浆液, 通过精准注浆填补空隙, 防止地层变形和地表沉降加剧。

3.4 周边环境风险控制技术

(1) 既有构筑物主动支顶与变形监测技术: 盾构下穿既有地铁、铁路等构筑物时, 采用钢支撑、千斤顶等设备对构筑物进行主动支顶, 分散盾构掘进产生的地层扰动, 减少构筑物变形; 同时安装变形监测传感器, 实时监测构筑物沉降、位移数据, 当变形超出预警值时, 及时调整掘进参数、采取补强措施, 确保构筑物安全。(2) 地下管线精准探测与保护措施: 施工前采用地质雷达、探测仪等设备, 结合管线资料, 精准探测地下供水、燃气、电力等管线的位置、走向和埋深, 标注管线保护范围; 施工中

采用避让、悬吊保护、套管防护等措施, 避免掘进扰动破坏管线, 同时加强管线监测, 及时处理管线异常, 防止引发泄漏、塌陷等次生灾害。(3) 施工振动与噪声控制技术: 优化盾构掘进参数, 降低掘进速度和推进力, 减少施工振动; 在盾构机上安装减振装置, 在施工区域周边设置隔声屏障, 控制噪声传播; 合理安排施工时间, 避开居民休息时段, 减少噪声对周边居民的影响, 同时定期监测振动和噪声值, 确保符合环保标准。

结束语

地铁盾构施工风险控制是一项系统性、综合性工程, 需贯穿施工全流程。本文通过梳理各类施工风险, 完善风险评估方法与体系, 提出针对性控制技术及实施措施, 有效规避了地质、设备、工艺及周边环境带来的安全隐患。未来需结合BIM、大数据等智能技术, 持续优化风险评估与控制体系, 总结工程实践经验, 推动盾构施工风险控制向智能化、精细化发展, 为各类地铁盾构工程提供更可靠的安全保障。

参考文献

- [1]张胜龙.复杂环境下超浅埋地铁隧道施工技术研究[J].江苏建筑,2024,(5):47-50.
- [2]郭金英.地铁盾构施工下穿既有铁路桥梁影响性分析[J].价值工程,2024,43(29):117-120.
- [3]张小超.地铁盾构工程穿越市政桥梁风险源施工控制技术[J].南北桥,2022,(23):196-198.
- [4]张振华.地铁盾构工程穿越市政桥梁风险源施工控制技术[J].现代装饰,2024,59(21):85-87.
- [5]吕贻坤.地铁盾构工程穿越市政桥梁风险源施工控制技术[J].中国高新科技,2021,(8):47-48.