

复杂环境下盾构穿越建筑物项目技术管理探讨

文 / 杨建烽 广州地铁集团有限公司

摘要: 本文以某地铁盾构区间穿越复杂建构物群工程为背景, 系统研究多因素耦合环境下盾构施工风险管控技术。针对项目面临的隐伏岩溶、复合地层、密集环境三重风险, 构建了“地质透明化—设备适配化—施工精细化—监测实时化”的全周期管控体系: 通过微动探测与三维建模实现地层精准识别, 采用分层注浆加固预处理; 构建房屋鉴定、临迁安置及三方协同的社会风险阻断机制; 实施盾构设备防喷涌改造、动态掘进参数优化及渣土复合改良工艺; 建立“地表—结构—地层”的立体监测网络与三级预警响应机制。实施结果表明, 各监测项累计沉降控制精度达 45.6%, 验证了技术体系的可靠性。本项目研究提出的多维风险耦合管控模式, 为城市密集区盾构工程提供了可复制的技术与管理集成方案, 对推动地下工程智能化发展具有一定参考价值。

关键词: 复杂环境; 盾构施工; 风险管控; 技术管理体系

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.026

引言

盾构工法作为城市轨道交通中常见的施工方法, 为目前轨道交通网络在城市中的快速发展提供了极大助力。随着地下空间开发的加速, 盾构隧道工程日益频繁地穿越复杂、敏感区域, 其面临的“复杂环境”已从单一地质风险演变为多维度、动态交织的综合挑战, 存在地质条件、建构物及周边社会环境等多重因素。复杂环境已经不仅体现在单一因素的极端性, 也在于多因素耦合作用下的不确定性, 本质上涵盖了地质条件突变性、工程约束多重性及社会环境敏感性三大矛盾, 直接影响了施工安全、效率及社会影响^[1, 2]。

从地质维度看, 盾构施工需应对软硬不均复合地层、高水压富水层及断裂带等复杂条件, 易引发刀具异常磨损、掘进轴线偏移及突水风险^[3, 4]。环境维度上受限于“毫米级”变形控制要求、密集地下管网、地上建筑及生态敏感等刚性约束, 传统粗放施工模式面临适应性瓶颈。从社会影响维度看, 又需兼顾施工振动噪声扰民、交通疏解压力、历史建筑保护及拆迁安置协调等民生问题。在上述多重复杂因素的叠加下, 传统施工导向管理模式在技术适配性与社会协同性层面将面临系统性挑战^[5]。

当前的施工导向管理模式多聚焦单一影响因子, 重视施工对单一或少数因素的影响及控制, 却容易造成“地质—施工—社会”动态变化的系统性风险^[6]。例如, 提前的注浆加固可能改变地层初始应力, 在盾构通过的情况下诱发次生变形; 或者沉降标准控制严格导致掘进效率下降严重, 在较差的掘进管理情况下诱发更大的沉降风险等。为此, 亟需构建融合地质提前处理、施工技术控制、社会影响分析等方面的动态调控技术管理体系^[7, 8]。

本文以典型工程案例为依托, 系统探讨复杂环境下盾构施工的协同控制机理, 提出涵盖地质透风险管控、施工变形控制及社会风险预警的技术管理框架, 以期为复杂环境下的盾构隧道施工提供实践经验。

一、工程概况及风险分析

(一) 工程概况

某地铁区间从车站始发后, 沿城市主干道敷设, 依次需穿越 2 座高架桥、村镇建构物群、专用铁路、高层建筑等, 最后到达接收车站。该区间右线总长 1022.7m, 埋深约 11-21m, 穿越地层主要为碎屑岩全风化带、强风化炭质页岩、中等风化及微风化石灰岩, 采用 $\Phi 6660\text{mm}$ 土压平衡盾构机进行施工。

该盾构区间在 129 环~220 环范围内下穿铁路、既有隧道(修建年限长)、村镇民房群(层高 6 层), 并距东侧高架桥桥桩距离最近约 17.4m。该段范围内穿越地层主要为 <6> 全风化灰质页岩、<7-2> 强风化细砂岩、<7-3> 强风化细砂岩、<8-3> 中风化细砂岩地层, 部分区域岩溶发育。

(二) 重大风险特征

根据工程情况分析, 该盾构区间施工面临“隐伏岩溶+复合地层+密集环境”三重耦合的系统性风险: 地质上存在上软(全风化碎屑岩)下硬(微风化灰岩)的显著强度差异, 叠加较厚杂填土及未探明溶洞, 导致容易出现土压失衡突变及地层扰动问题; 环境上需下穿专用铁路(沉降限值 $\leq 10\text{mm}$) 及桩基距隧道仅 4.5m 的高层建筑, 杂填土—溶洞联通渗透通道易诱发沉降传导; 管理上因地质模型未完全探明无法动态更新、监测面覆盖不足, 易加剧风险扩散^[9-11]。

依据地区城市轨道交通工程建设安全风险管控和隐患排查治理规范, 确定原始风险等级为 II 级, 因风险可能导致地面建(构)筑物倾斜、裂缝、倒塌等, 造成不良社会影响, 通过对风险的动态评估, 将该穿越项目等级为最高等级进行管控。

二、穿越风险控制措施

该区间在复杂环境下穿越建构物群, 通过地质透明化技术、风险预控管理、设备适应性改造及动态施工参数优化, 构建了“技术—管理—监测”的风险管控体系。

(一) 地质透明化及预处理

为精准识别施工区段隐伏地质风险，采用“微动探测+三维建模”技术实现地层透明化，并针对性设计提供预处理方案。

采用微动探测技术沿建筑群影响区布设测线，采用

微动法（面波频散反演）扫描未勘察空白区及加密勘察，识别穿越阶段的岩溶、破碎带及基岩起伏界面，该微动法探测精度达3m。通过数据清洗、分析及三维建模，生成地质透明化模型，明确地层界面划分。

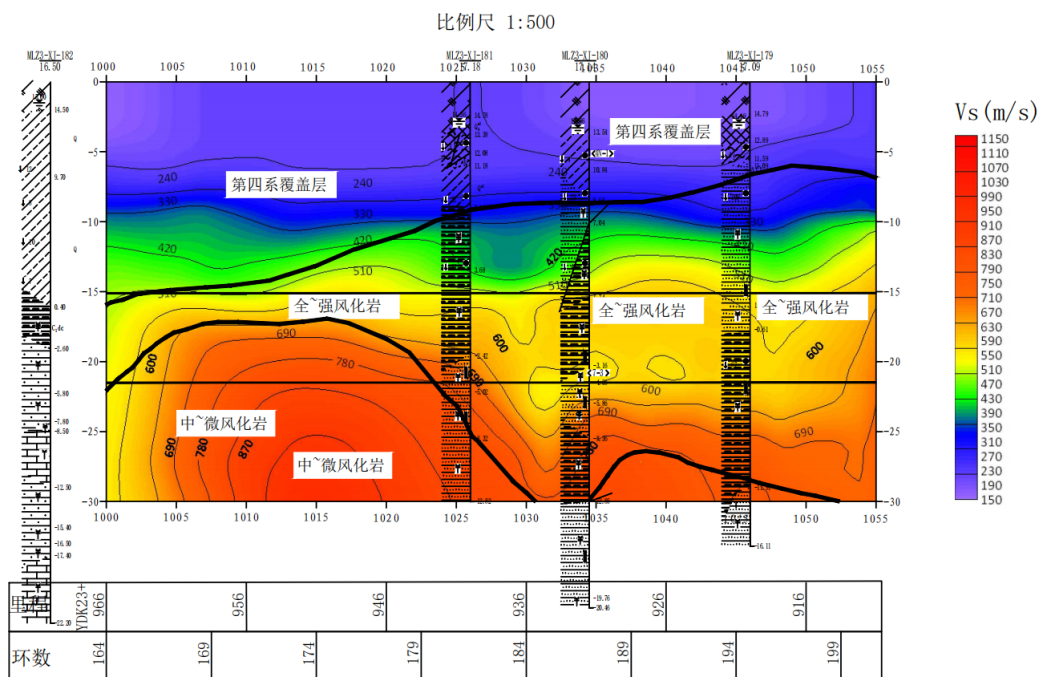


图1 微动物探地质模型剖面图

针对探明地层采取针对性的分层预处理策略，对于浅埋覆土层、风化岩及溶洞等不同地层特性，制定分层注浆加固方案，重点强化松散地层填充与溶洞封闭；依托探测的地层分界动态优化注浆参数，建立压力—沉降联动机制实时管控预处理工序；加固完成后实施钻孔取芯验证浆脉分布质量，结合再次地层扫描数据、施工记录及取芯结果，确保预处理效果可控、风险可溯。

(二) 房屋鉴定及临迁安置综合管理

为系统性降低社会风险与次生灾害，通过前置化管控实现风险闭环，基于《房屋完损等级评定标准》等规范鉴定确认穿越前建构筑物（倾斜率 $< 0.5\%$ 、裂缝 $\leq 5\text{mm}$ ）为可控状态，提前对穿越民房群居民进行临迁安置，彻底消除人员滞留风险，并联合属地街道成立三方联络组，动态通报施工进展与监测数据。通过提前迁移阻断群体事件风险、联动防控遏制次生灾害、透明沟通消解公众疑虑，将施工过程的社会稳定性风险由较高降至可控状态。

(三) 施工维度管控及优化措施

1. 设备检修保养

地层预处理加固的施工窗口期，组织对盾构机、龙门吊、电瓶车等关键设备开展预防性全维度检修维护，消除设备故障隐患，涵盖盾体密封、刀盘管养、螺旋输送机磨损、注浆系统管路等11大类216项关键检查点。

2. 设备针对性改造

聚焦防沉降、防喷涌、防结泥饼、刀具优化四个方面，通过针对性改造——螺旋机PID动态平衡控制、双闸门防喷涌设计、灰岩地层17英寸滚刀优化及可互换，与刀盘主动搅拌防结泥饼技术，显著提升盾构机设备地层适应性。

3. 掘进控制

结合三阶段掘进管理——取消常规试验段并依托盾构始发段相似地层参数（粉质黏土与全风化岩）从而优化掘进参数设置^[12]。穿越段采用匀速控制（20~40mm/min）与高仓位土压平衡模式满仓保压（土压1.8~2.2bar），结合泡沫与膨润土渣土改良（每环注入60L），抑制地层扰动。实际掘进过程中，参数执行动态调整，确保掘进连续性，参数范围控制为总推力13000~19000kN，刀盘扭矩1400~3500kN·m，推进速度15~45mm/min，土压波动小于5%。实际穿越过程中土压较预设值偏高，也揭示出地层松散特性，针对性加强同步注浆（ $\geq 7\text{m}^3/\text{环}$ ），并结合沉降及裂缝双阈值控制启动惰性厚浆进行地层补偿。通过预设参数设定及实时动态优化，实现复杂地层下盾构掘进的安全可控。

4. 渣土改良及出土管理

为防止刀盘产生泥饼及糊刀，通过“泡沫—膨润土复合改良体系”精准防控：基于地层里程动态注入泡沫（刀盘面、土仓及螺旋机多点位，明洁泥岩分散性泡沫

剂原液比例 4%~5%，混合液：压缩空气比例 1：10）与高密度膨润土，抑制渣土离析；同步调控土仓注水量及皮带机排渣速度，确保渣土含水率及混合均匀度偏差。

盾构施工通过严格控制出土量与土压力平衡来预防地面沉降，根据每环理论出土量及注入的泡沫一水混合液，计算得到实际控制出土量；当出土量超理论值 1.1 倍时需及时调整参数。针对高渗水地层喷涌问题，采取分级保压措施：停机保持满仓土体后，先注入高粘度膨润土建立比掘进土压高 0.2bar 的一级保压，30 分钟后再提升至二级保压（较一级高 0.2bar），维持相同时间后恢复推进，通过动态压力调控确保地层稳定。

（四）穿越区域全周期监测

沿下穿轴线布设地表沉降点、建筑物倾斜计、管片收敛监测点等进行立体化布点，关键区段（铁路、建筑群）加密至 2m 间距，形成“地表-结构-地层”监测网。通过施工方与第三方联合监测形成双频数据反馈，每 6 小时出具报告，重点分析沉降速率、累计沉降及房屋倾斜率，构建监测-施工联动机制，从而对参数的动态优化；建立应急响应与注浆联动的三级预警机制，实现数据异常、参数调整、措施启动的应急措施响应闭环。

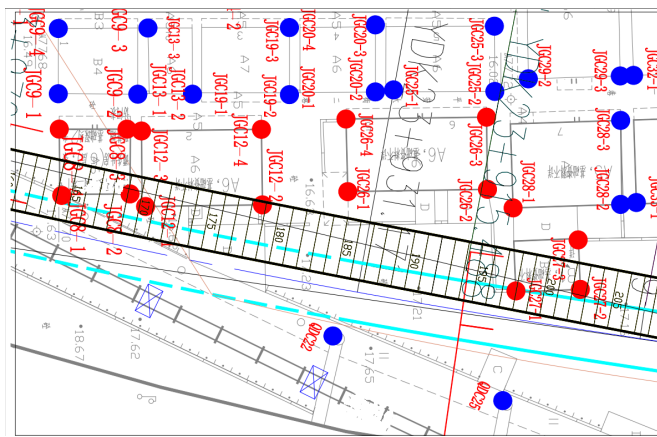


图 2 穿越构筑物监测点布置图

三、工程实施效果

通过上述风险管控措施，该区间在复杂环境下顺利穿越构筑物群，穿越后连续 7 天监测数据表明，各监测项累计变形及沉降速率均未突破预警值：铁路轨道累计沉降为预警值的 73.8%（-5.9mm/-8mm）需重点关注，既有隧道累计沉降占预警值 65%（-7.8mm/-12mm），其余项目累计变形占比均低于 50%；所有监测点沉降速率占比最高为 43.1%（-0.69mm/d），均显著低于预警值，显示地层扰动已趋稳定，地表与建筑物沉降控制成效显著。沉降控制精度（实际值 / 预警值平均占比 45.6%）体现精细化施工水平，地层扰动抑制成功。虽在复杂环境下相关设施监测值持续变动，但仍接近收敛，后续仍将构筑物的监测频率保持至每日 1 次，持续跟踪其长期稳定。

四、项目技术管理体系

该项目面对复杂地质条件、社会风险叠加及严苛控

制指标的多重耦合环境下穿越构筑物群的高风险挑战，成功构建了“地质透明化-设备适配化-施工精细化-监测实时化”的全链条闭环管理模式：通过微动探测与三维建模精准识别地层隐患，实施分层注浆加固预处理；结合房屋安全鉴定、临迁安置及三方协同机制阻断社会风险；对盾构设备开展防喷涌、防结泥饼等针对性改造，动态优化掘进参数及渣土改良工艺；同步建立立体实时监测网络，集成三级预警与应急响应，实现风险全周期管控。

结语

本复杂环境下盾构穿越构筑物项目通过系统性整合地质透明化、设备改造、动态施工及智能监测，成功实现复杂环境下的盾构安全穿越，其核心优势在于技术协同、管理创新与社会风险的闭环管控，该项目可为城市密集区盾构工程提供一定的管理模式参考。未来可融合 AI 参数自学习与数字孪生技术，推动地下工程向智能化发展，重新定义复杂环境施工安全风险管控边界，为地下空间开发提供高置信度解决方案。

参考文献

- [1] 刘祥东. 大直径盾构近距离下穿既有隧道风险控制研究 [J]. 工程勘察, 2022 (5): 1-7.
- [2] 韩朝翰. 地铁盾构区间隧道施工风险管理 [J]. 交通建设与管理, 2019, (04): 98-99.
- [3] 刘培洪. 浅谈孤石及上软下硬特殊地层盾构施工风险及对策 [J]. 铁道建筑技术, 2014, (09): 18-20.
- [4] 周志强, 钟显奇, 宋金良, 等. 广州地区盾构施工风险及控制技术要点 [J]. 隧道建设, 2010, 30 (05): 608-611.
- [5] 刘文, 杨志勇, 刘东军, 等. 城市轨道交通工程施工安全事故聚类分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (07): 2982-2988.
- [6] 商兆涛, 尹志凯, 张红彬, 等. 城市轨道交通施工安全风险预警体系研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (05): 740-748.
- [7] 只睿. 基于复杂网络模型的地铁盾构施工风险演化分析研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [8] 沈卫平, 张俊, 袁标, 等. 基于智慧互联技术的成都地铁盾构施工安全风险信息管理信息系统研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (S2): 3822-3832.
- [9] 王浩. 盾构隧道施工对邻近建筑物的影响研究 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2016, 25 (02): 19-20.
- [10] 吴贤国, 张立茂, 侯铁明, 等. 地铁盾构隧道施工对邻近建筑物的安全风险分析方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18 (08): 105-110.
- [11] 刘承宏, 陈宇博. 复杂地质条件下穿老旧建筑物盾构法地铁施工技术研究 [J]. 中国设备工程, 2019, (18): 109-111.
- [12] 张沛然, 杨果林, 吕涛, 等. 盾构施工地层可掘性及对机-岩状态识别案例分析 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (07): 99-110.