

土压平衡盾构下穿地铁隧道施工风险分析与防控措施

李彦飞

中交隧道工程局有限公司 北京 100000

摘要: 土压平衡盾构下穿既有地铁隧道施工工况复杂, 易受地质水文、施工操作、设备运行等因素影响, 引发地层变形、结构破损及运营安全隐患。本文梳理盾构核心施工工艺, 系统识别全流程风险诱因, 采用风险矩阵法完成风险等级评价, 明确核心高风险管控要点。从前期预控、过程动态防控、管理保障及应急处置多维度制定专项措施, 有效管控施工风险, 保障既有地铁结构与运营安全, 为同类工程提供参考。

关键词: 土压平衡盾构; 下穿地铁隧道; 施工风险; 防控措施

引言: 城市轨道交通新建线路盾构下穿既有地铁隧道, 是地下工程施工的高难度、高风险工况。土压平衡盾构施工虽能有效维持开挖面稳定, 但复杂地层、近距离穿越、施工参数偏差等问题, 极易造成地层扰动、隧道变形, 威胁既有线路运营安全。为规范施工管控、规避安全事故, 本文结合盾构施工核心原理, 全面剖析施工全周期风险, 科学评价风险等级, 针对性构建完善的风险防控与应急体系, 助力工程安全高效推进。

1 土压平衡盾构下穿地铁隧道施工核心工艺与风险诱因

1.1 土压平衡盾构施工核心原理与工艺流程

(1) 土压平衡盾构设备工作原理、土仓压力平衡控制核心机制。土压平衡盾构通过刀盘切削土层, 将渣土纳入密封土仓, 利用螺旋输送机控制排土速率, 使土仓压力与开挖面水土压力动态平衡, 维持掌子面稳定。核心控制机制为: 土压传感器实时采集数据, PLC 系统自动调节螺旋机转速与掘进速度的匹配关系, 将土仓压力波动控制在设定值 $\pm 0.01\text{MPa}$ 以内, 防止压力失衡引发地层坍塌或地表隆起^[1]。(2) 盾构下穿既有地铁隧道标准化施工流程。穿越前完成设备检修与参数试调; 穿越时匀速低速掘进, 同步添加泡沫或膨润土改良渣土流塑性, 降低刀盘扭矩; 每环掘进后立即实施同步注浆填充管片与地层间隙; 待浆液初凝后, 通过管片注浆孔实施二次注浆, 补偿地层沉降并阻断变形向既有结构传递。(3) 下穿施工关键控制参数。掘进速度控制在 $10 \sim 30\text{mm/min}$; 土仓压力依据覆土深度及水压设定, 波动允许 $\pm 0.01\text{MPa}$; 同步注浆量取理论空隙的 $150\% \sim 200\%$; 刀盘扭矩根据地层软硬实时调节, 防止过载卡机。

1.2 工程环境风险诱因分析

(1) 地质水文条件风险。软土承载力低, 穿越易引发较大沉降; 砂层透水性强, 受扰易产生流砂或管涌; 承压水在盾构掘进时可能击穿隔水层, 引发突发涌水涌砂, 严重威胁施工与既有结构安全。(2) 周边工况风险。既有结构老化致抗变形能力下降; 密集管线受振动或位移易破损; 盾构与既有隧道净距小于 1 倍盾径时, 卸荷效应显著, 极易引发既有结构变形超限。(3) 环境扰动风险。地面超载加大附加应力, 加剧沉降; 邻近基坑开挖或桩基施工产生的振动与应力释放, 与盾构扰动叠加形成耦合效应, 增大风险管控难度。

1.3 施工操作与设备风险诱因分析

(1) 施工参数管控不当。土仓压力过低或波动大使开挖面卸荷失稳; 掘进过快致排土不畅、土压滞后建立; 注浆不饱满无法有效充填空隙, 后期沉降难以控制。(2) 设备运行风险。刀盘磨损降低切削效率, 甚至卡刀; 螺旋机故障致排土中断、土压失控; 盾构姿态偏移使管片受力不均并加大超挖扰动。(3) 渣土改良不当引发的结泥饼、涌水涌砂施工风险。改良剂配比不当, 渣土黏度过大致刀盘中心结泥饼, 降低效率并增大扭矩; 砂层中泡沫或膨润土掺量不足, 渣土和易性差, 易在螺旋机出口发生喷涌或掌子面涌水涌砂事故。

2 土压平衡盾构下穿地铁隧道施工主要风险识别与等级评价

2.1 施工风险识别原则与方法

(1) 风险识别系统性、针对性、动态性原则。系统性原则要求从地质、设计、施工、环境等多维度全面排查风险源, 避免遗漏; 针对性原则强调紧扣下穿既有地铁隧道这一核心工况, 聚焦净距、结构龄期等关键因素; 动态性原则要求随施工推进及监测数据反馈,

持续修正风险清单,实现全过程滚动识别。(2)采用故障树法、工程案例类比法开展全流程风险识别。故障树法以盾构下穿事故为顶事件,逐层分解地层失稳、设备故障、操作失误等底事件,厘清风险传导路径;工程案例类比法则通过收集国内外相似下穿案例,统计高频风险类型及致灾模式,为本工程风险预判提供经验参照。(3)构建盾构下穿施工风险识别体系,覆盖前期准备、掘进、收尾全阶段。前期准备阶段重点识别勘察遗漏、管线摸排不清等风险;掘进阶段聚焦土压失衡、注浆缺陷、设备故障等动态风险;收尾阶段关注后期沉降、隧道结构残余变形等滞后风险,形成闭环识别框架。

2.2 典型施工风险分类及危害分析

(1)地层变形风险:地表沉降、地层隆起、不均匀沉降引发既有隧道变形。盾构穿越导致地层应力重分布,地表沉降超限将传递至既有隧道,引发其纵向挠曲;地层隆起多因土压过大或注浆超量,使既有结构受挤压变形;不均匀沉降则导致隧道产生附加弯矩,严重时引起管片开裂。(2)既有地铁结构风险:隧道衬砌开裂、轨道偏移、结构渗漏水、接缝错台。既有衬砌在附加应力作用下产生裂缝,降低结构耐久性;轨道几何形位偏移威胁行车安全;渗漏水加速钢筋锈蚀;接缝错台破坏防水体系,形成渗漏通道,进一步恶化地层稳定条件^[2]。(3)施工安全风险:掌子面失稳、涌水涌砂、盾构卡机、隧道坍塌风险。掌子面支护压力不足时,易发生突发性坍塌;高水压砂层中掘进,若密封失效则引发涌水涌砂;刀盘遭遇孤石或硬质夹层时可能卡机被困;上述风险叠加时,极端工况下可能导致隧道整体坍塌。(4)运营安全风险:既有地铁线路变形超标、列车运行颠簸、停运隐患。既有隧道沉降或水平位移超过轨道平顺性限值,列车通过时产生剧烈颠簸,影响乘坐舒适度;变形持续发展可能导致接触网偏移、轨距超限,迫使线路临时限速或停运检修,造成重大社会影响。

2.3 施工风险等级综合评价

(1)建立风险评价指标体系,确定风险影响因子与权重。从地层稳定性、既有结构抗变形能力、施工参数可控性、环境敏感度四方面构建指标体系,采用层次分析法确定各因子权重,其中既有结构现状与土仓压力控制精度赋予较高权重。(2)采用风险矩阵法划分高、中、低三级风险等级。以风险发生概率为横轴、后果严重程度为纵轴构建风险矩阵,将风险划分为高(红色)、中(黄色)、低(蓝色)三级。高风险项须制定专项应急预案并实施双控管理,中风险项加强日常监

测,低风险项常规管控即可。(3)明确下穿施工核心高风险点与关键管控环节。核心高风险点包括:盾构到达既有隧道正下方时土压突降、联络通道附近复合地层掘进、同步注浆缺失段后期沉降。关键管控环节锁定为掘进参数动态调校、注浆压力与流量双控、自动化监测实时预警,确保高风险点全过程受控。

3 土压平衡盾构下穿地铁隧道针对性施工风险防控措施与应急保障

3.1 施工前期预控防控措施

(1)精细化地质勘察与既有隧道结构检测评估。采用钻探结合跨孔地震波CT、孔内摄像等手段,查明下穿段软弱夹层、透镜体分布及承压水头等关键信息,建立三维地质模型。同步对既有隧道开展结构性与功能性双维度检测,包括管片裂缝深度、钢筋锈蚀电位、接缝防水失效区域及轨道几何形位偏差,通过数值反演评估既有结构在附加荷载下的剩余承载力,量化允许变形阈值,为防控设计提供精准依据。(2)优化盾构掘进参数,制定专项下穿施工方案与试验段掘进方案。依据地质模型与既有结构评估结果,采用颗粒流软件开展参数敏感性分析,初步优化土仓压力、掘进速度与刀盘转速匹配关系。编制涵盖工序衔接、应急处置及监测布点的专项方案,并于正式下穿前选取30m相似地层进行试验段掘进,通过多轮参数迭代验证,形成标准化参数控制表及操作指令卡^[3]。(3)既有隧道预处理、地层预加固(袖阀管注浆、深层搅拌加固)。对既有隧道渗漏或接缝张开超标段,实施环向嵌缝与壁后补充注浆预处理。对软弱地层或松散砂层,按梅花形布设袖阀管进行分段后退式注浆,浆液采用水泥-水玻璃双液浆,注浆压力0.5~0.8MPa,形成厚度不小于2m的均匀加固圈;近既有结构侧施作深层搅拌桩形成隔离墙,限制扰动变形传递。

3.2 施工过程动态防控技术措施

(1)土仓压力精准调控、匀速低速掘进控制技术,维持开挖面稳定。穿越核心段采用气垫式土压平衡模式,辅以PLC闭环控制系统,土仓压力波动控制在设定值 $\pm 0.003\text{MPa}$ 以内。掘进速度严格限定在5~15mm/min,每环速度波动不超过2mm/min,防止速度突变引发掌子面失稳。(2)渣土改良优化、同步注浆与二次注浆精准施工,减少地层扰动。根据每环出渣含水率、颗粒级配实时调整泡沫掺量(砂层泡沫比5%~8%,膨润土掺量20%~30%),确保渣土坍塌度16~20cm。同步注浆采用双液浆,初凝时间10~20秒,每环注浆量为理论空隙体积1.8倍,压力阶梯升至0.4MPa

稳压结束。二次注浆在盾尾脱出后第3环立即实施,采用微膨胀浆液填充固结收缩空隙,以压力-流量双控标准终止。(3)盾构姿态实时纠偏控制,避免隧道偏移引发结构附加应力。利用VMT导向系统每环采集姿态数据,盾首与盾尾水平偏差控制在 $\pm 30\text{mm}$ 以内,垂直偏差 $\pm 20\text{mm}$ 以内。纠偏采取“缓纠、勤纠”原则,每环水平纠偏量不大于 3mm ,垂直不大于 2mm ,避免急转弯引发超挖空洞^[4]。(4)全过程自动化监测体系布设,实时监控地层与隧道变形数据。沿下穿影响区既有隧道上下行线各布设不少于8个自动化监测断面,安装静力水准仪、收敛计及表面应变计,地表沿轴线按 3m 间距布设沉降点。数据通过无线传输汇入云端平台,刷新频率30秒/次,设定累计沉降 10mm 黄色预警、 15mm 红色预警,实现异常即时捕捉与推送。

3.3 施工管理防控措施

(1)建立专项安全管理制度,落实分级安全责任体系。制定《下穿既有地铁施工安全红线管理制度》,明确十条不可逾越安全红线。构建项目经理、总工程师、安全总监三级责任体系,实行“一人一岗一责”清单化管理,每日安全碰头会核对落实,确保管理无盲区。(2)施工人员专项技术培训、岗前交底与实操考核。下穿施工前全员脱产培训不少于16学时,重点讲解既有结构保护、参数异常识别及应急处置。编制可视化操作交底卡片,实行“手指口述”式岗前交底。关键岗位经模拟操作考核合格后上岗,考核记录纳入个人技术档案。(3)施工全过程动态巡查、风险实时预警与闭环管控。设立专职巡查组,每环掘进后检查盾尾密封、注浆压力、渣温及出渣状态并填报记录。预警遵循“接警—研判—处置—复核—销号”五步闭环,黄色预警2小时内销号、红色1小时内销号,逾期未处置自动升级上报。

3.4 突发风险应急处置措施

(1)沉降超标、衬砌开裂等常见险情应急处置流程。触发红色预警后执行“停机—会商—处置”程序:暂停掘进保持土压,技术组分析判定致灾原因;沉降区实施地面跟踪注浆,压力 0.2MPa 以内逐级递增,加密监测至2分钟/次;衬砌开裂采用环氧树脂封闭裂缝并粘贴芳纶纤维布补强,变形速率连续6小时小于 0.01mm/h

后恢复掘进。(2)涌水涌砂、掌子面失稳紧急抢险技术措施。涌水涌砂时关闭螺旋输送机后闸门,反向注入高分子聚合物封堵通道,同步启动洞内应急排水(能力不小于 $100\text{m}^3/\text{h}$)。掌子面失稳立即反压——向土仓泵入膨润土浆液快速建压至 0.15MPa 以上,地面垂直钻孔注入聚氨酯速凝浆液形成止水帷幕,控制后再逐步卸压处理^[5]。(3)既有地铁运营突发隐患的应急联动与停运保障机制。与地铁运营公司建立应急联动协议,明确险情等级与响应措施。既有结构变形超限危及行车时,现场指挥部3分钟内将险情快报传送运营调度中心,联合启动限速或停运程序。同步开启应急照明与广播,组织轨行区人员通过联络通道疏散,配合运营部门30分钟内完成轨道临时加固与接触网检查,具备条件后以限速 15km/h 模式恢复试运行。

结束语

本文完整完成土压平衡盾构下穿地铁隧道施工的风险诱因分析、风险识别分级及防控体系构建。通过细化全过程管控措施、搭建动态监测预警机制、完善应急处置方案,可有效解决地层失稳、结构变形、涌水涌砂等核心风险问题。研究形成的参数管控标准、施工流程及应急策略,可精准保障下穿施工质量与运营安全,对同类城市地铁下穿工程的风险管控、标准化施工具备良好的借鉴与推广价值。

参考文献

- [1] 王浩. 长江一级阶地土压平衡盾构下穿既有地铁车站施工风险及防控技术[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(3): 189-196.
- [2] 刘阳. 基于高斯 Copula 贝叶斯模型的盾构下穿既有地铁隧道施工风险敏感性分析[J]. 工业建筑, 2024, 54(1): 156-162.
- [3] 佟彬, 张斌. 土压平衡盾构下穿断裂带地铁区间隧道开挖面稳定性及风险防控[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 232-240.
- [4] 曾铁梅. 基于 PCBN 模型的土压盾构下穿既有地铁施工安全风险评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 31(2): 112-118.
- [5] 赵鑫, 周健. 近距离土压平衡盾构下穿运营地铁隧道变形风险控制技术[J]. 隧道建设, 2022, 42(8): 138-146.