

铁路隧道工程管理中的安全质量风险防控策略

谷景峰

中国铁路哈尔滨局集团有限公司 黑龙江哈尔滨 150000

摘要: 由于地质条件复杂、作业空间狭窄、多工艺交叉作业等因素的制约,在建设过程中极容易出现围岩坍塌、突水突泥、支护失效等重大安全和质量隐患,而现有防治方法已很难适应工程规模不断增大和技术升级的需要。文章以铁路隧道项目为研究对象,首先对其建设的困难进行分析,识别出其关键的危险因素,重点阐述安全质量风险防控技术。研究成果将为提高我国铁路隧道施工安全和质量稳定水平,有效提高我国铁路隧道施工安全和质量稳定水平。

关键词: 铁路隧道; 工程管理; 安全; 风险防控

铁路隧道是我国重要的交通设施建设项目之一,其建设往往面对地质条件复杂、作业空间狭窄、多工艺交叉作业等诸多难题,容易发生围岩坍塌、突水突泥、支护结构破坏等重大安全问题,严重危及到工人的人身财产和人身财产,也会延误工期,增加造价,严重时还会对服役后结构的稳定产生影响。近年来,我国的铁路建设逐步向山区和复杂地质地区扩展,使得隧道建设的规模和建设的难度越来越大,常规的防治方法已经很难满足其精确高效的管理要求。建立一套科学的、系统化的、以现代科技方法解决施工难点是保证铁路隧道施工质量和安全的重要课题。

一、铁路隧道工程施工难点与风险

铁路隧道工程是铁路工程建设中的关键环节,工程建设过程中存在着断层、岩溶、软弱围岩等诸多因素,给工程建设带来很大的不确定性和危险性。此外,由于隧道工程多处于封闭狭小的空间,施工环境恶劣,工作空间有限,限制了大型工程装备的应用,这对工人的技能、体能等都有较高的需求,也给工程的安全管理带来困难^[1]。根据工程实际情况,断裂地段岩体破碎,节理裂隙发育,极易发生塌方;喀斯特地区的地下溶洞、地下暗河等易诱发突水突泥灾害,对建设项目的安全与进度构成了极大的威胁;而对于软岩,由于其自身稳定性较差,因此必须采用专门的支撑手段才能保证其稳定性。从施工工艺上看,选用适当的施工方法及工艺非常关键,如果在浅埋地区进行爆炸,会引起地表沉降和建筑物破坏;若施工技术不当,例如喷浆的厚度及强度不够,将会对支护产生不利的后果,从而造成严重的安全事故。

二、铁路隧道工程管理中的安全质量风险防控的技术策略

(一) 整合地质勘察与超前预报技术

综合勘察和预测技术需要建立“勘察为底-预测闭环”的技术系统,利用多种方法的协作,解决地质认识上的盲点。在建设初期,利用大地电磁、高密度电法等地面勘探手段,对关键地段进行分区,并与钻孔资料相融合,构建出一个完整的三维地质结构,从而达到对宏观地质情况的精确控制。超前地质预测是保证工程安全的关键,利用TSP探测、地质雷达和超前钻孔等多种探测方法,可实现超前探测,为工程建设提供科学依据。此技术利用电磁波在隧道中传播的方法^[2]。在隧洞两侧设置一组震源,用小剂量爆炸激励震源,使震源以球表面波的方式在围岩中传播。在断层、破碎区、溶洞和地下暗河等具有明显的阻抗差异的地层中,一些地震波会被沿墙分布的三个高灵敏检波器吸收。通过对地震回波走时、波形和振幅等特征的研究,可以推测出地震前的地质体的位置、规模和性质。在工程建设过程中,采取“大间距探测-短程验证-钻孔证实”的分层方式,利用TSP弹性波远距离测量100-150 m的构造异常,在近距离穿越瞬变电磁法确定富水区,利用物探方法对10-30 m内陆质体进行精确定位。并通过“背景去除”等方法,排除工程扰动,提高解译精度。比如张吉怀线新华山隧道在进行建设时需要穿越8条断层,项目组以“地面勘测划靶区+洞内多地球物理勘探+超前钻孔确认”为研究对象,利用TSP303和瞬变电磁联合检测,精确确定百米左右的F-2断裂风危险区,实现了对积水的预测,在

工程建设过程中无地质灾害, 预报精度达92%, 较单一方法提升40%。

(二) 盾构与隧道掘进技术的配合应用

盾构与隧道掘进设备的应用在长距离大直径隧道和城区等地区的隧道施工中具有明显优势。软弱土层中, 盾构机采用土压力或水泥土平衡等理论, 经刀盘切割后, 经旋转输送带或泥管卸除, 并采用盾尾推力推进, 并在盾尾同步组装管片, 构成隧道衬砌。土压平衡式隧道掘进机是通过密闭空间中的土压力进行合理的调控, 从而实现基坑周围土压力的均衡, 从而避免了地层塌陷和地表沉陷; 而泥水平衡式盾构机是利用泥浆在周围的土体中进行注浆, 从而达到对土体和土体的压力的均衡, 特别适合于富水高压的软弱土层。隧洞开挖是一种利用刀盘转动滚刀, 将围岩挤碎, 以达到开挖隧洞的目的。掘进机适合于坚硬岩层、岩石状况良好的区域, 其前进需要借助管片的支承, 与盾构法相似, 但其不能同步进行, 导致施工进度缓慢。为了保证隧道工程的安全与品质, 需要对隧道掘进机与掘进机的位姿与推进速率进行准确的测量与控制^[3]。该装置装有一套激光导引装置, 可对装置的位置、方位、姿态进行实时监控, 并依据量测结果对推进缸的推力与刀盘的转矩进行适时的调节, 以保证设备按预定的路线进行作业。

盾构与隧道施工协同运用需要构建“装备选择匹配-动力参数调整-工艺耦合”的集成机理, 增强对多种地质条件的适应性。本项目拟以复杂地层为研究对象, 利用“TBM转换匹配”方法, 在软岩层段通过土力均衡方式调节刀盘旋转速度(2-5 r/min)和推进速率(30-50 mm/min), 然后转入TBM, 利用最优滚刀间隔(80-100 mm)提高破岩效率。针对盾构施工过程中存在的管片安装与施工不协调等问题, 研制“盾构-组装”并行控制模型, 实现盾构施工过程中的管片预制, 利用激光导航技术对装配过程中的装配精度进行在线校正, 使装配过程中的装配误差小于 ± 5 mm。在刀盘、主轴承等重要部位布置振动、温度等传感装置, 实现对工况参数的在线检测, 实现对机组损失的预测, 并在刀盘震动幅度大于2.5 g的情况下, 实现对机组的正常运转状态的预测, 从而保证工程的持续进行。以深圳轨道交通14号线“大运站-宝龙站区间隧道”为例子, “盾构-TBM”联合开挖新工艺, 在软硬互层条件下, 每天钻出18 m, 比常规单台机械作业高效40%, 地面沉陷小于3 mm, 可达到城市建设的安全需求。

(三) 支护衬砌质量保障技术

在铁路隧道建设过程中, 如何保证支护的质量, 是抵御围岩压力和防止塌方的重要措施。二次衬砌作为隧洞的永久支撑, 其施工技术对隧洞的总体稳定与耐久性具有重要意义。采用超前预埋同步监控方法, 在完成锚固后, 采用锚索拉力测试仪进行原位试验, 并按照规范规定, 对300个锚索进行3个以上的取样, 保证锚索拉力不小于设计值90%; 在完成喷浆后, 利用地雷达法对其压实度进行检查, 对发现的空洞和不密实部位应立即进行修补, 以防止由于支护强度不足而造成的安全隐患。二次衬砌的施工工艺是以重点工艺为重点, 采用全站仪对模架车进行立体测量, 保证衬砌厚度和轴线偏差均满足规范要求, 且位置偏差小于5毫米; 在浇筑过程中, 利用温度传感器对浇筑过程中的温度进行实时监控, 并通过调节浇筑速度和布置冷却水管, 使其内外温差不超过25℃, 从而避免了由温度引起的开裂^[4]。该方法通过在钢拱架和锚杆上布置一个振动弦型的压力传感器, 对其进行动态的受力情况进行实时的测量, 并通过无线方式将测量的结果传送到监测平台上, 在超过80%的设计值时, 系统会发出警报, 从而实现对施工参数的适时调整。例如在成兰铁路“平安”隧道工程中, 运用以上方法, 锚索抗拔强度的合格率达到98.7%, 喷浆强度检验的合格率提高到99.2%; 采用温度控制技术, 二次衬砌的开裂率降低了82%; 通过对三个围岩的监控, 对围岩的3个异常围岩进行了监控, 并对围岩进行了合理的支护, 消除了围岩的隐患, 确保了隧洞的安全。

(四) 信息化动态管控技术

以“数据驱动-智能感知-实时响应”为主线, 以“数据驱动-智能感知-实时响应”为主线, 以多学科的交叉融合为手段, 搭建涵盖建筑全生命过程的数字控制系统, 以达到对建筑工程项目的高精度识别、动态追踪和预警预警的目的。建筑监控系统的智能化建设以“数据自动采集, 高精度分析”为核心, 构筑了多维监控网络。基于“全站仪自动化监控+分布式光纤感知”的协作方式进行围岩变形的监控, 利用预先设置的观测点, 按2 h自动采集拱顶沉降和周边沉降数据, 数据传递误差小于0.1 mm。本项目提出一种新型的基于分布式光纤技术的三维形变监测方法, 以满足复杂地质条件下地表形变监测的需求。在开挖面、衬砌作业区等重要位置安装有毒气体(CO、NO₂)和灰尘浓度探测器, 通过5 G网络进行实时传输, 一旦浓度超过标准, 就会启动声光报警,

关闭设备，反应速度不超过3秒钟。采用BIM的全程运用，建立了“数字孪生”的控制体系，以达到对企业内部的信息整合和可视化的控制。

基于BIM技术，将设计图纸、地质资料、施工方案等数据进行集成，构建包含构件属性和施工过程的参数化建模，并将其与施工进度相结合，形成“模式-进度-资源”的协调控制，对过程的完成过程进行跟踪。将地理信息与地理信息相结合，建立了“地面-地下”综合地质模式，将隧道与断裂及富水带的空间位置联系起来。采用BIM技术进行施工过程中的碰撞探测，预先排除钢筋与预埋件、模板台车与衬砌外形之间的矛盾，达到98%以上；在此基础上，构建产品的可溯源性，将测试结果与产品组件进行关联，形成“问题导向-责任溯源-修复闭环”的完整过程。利用大数据进行“数据解析-判断-智慧报警”闭环控制，形成了一套基于大数据的“风险预测-智能预警”系统。构建施工数据中台，实现对监测数据、设备运行参数、过程验收等多个来源的数据进行实时采集，并利用数据净化技术剔除施工扰动、环境干扰等不正常的的数据。在此基础上，通过对围岩分级、支护参数、变形速率等参数的输入，建立灾害危险性评价模型，实现灾害危险性的预测与预测。在监测结果显示，一旦监测结果到达报警阈值，将监测结果通过分层报警机制，将监测结果反馈给管理者，并与相应的应急方案相结合，提出相应的处理意见，从而使“被动应对”的风险变为“主动防控”。

（五）应急与修复技术

在“预防为主，快速响应，精确修复，长期监控”的基础上，建立“应急处置-缺陷修复-运行维护”的完整的技术系统，实现对突发事件、施工缺陷和运行缺陷的闭环控制，解决了传统应急措施被动处置和修复效果难以评价的问题。针对“快速控制危险，源头治理”的突发事件，制定了相应的应对策略。针对“超前封闭+超前补强”的特点，优选采用“双液”（水玻璃）灌浆法，构筑3-5 m、1.5-2.0 MPa、12 h以内的超前防渗帷幕。结合“袖套式”灌浆工艺，实现了对围岩的深度强化，提高了岩体的整体稳定性。采用“临时支护-清障加固”的方法，在坍方前方设置I20b（间隔为0.8 m）的临时钢架支架，并配合小导管进行注浆，在塌方区内设置一道保护拱；为避免二次塌方，在坍塌区采取了“阶梯式清除障碍+喷网支护”的措施。

基于NDT的缺陷修补方法，突出“精确诊断，分类施策”，对损伤的实质进行准确定位。根据“非破坏性监测-注浆-补强增强”的工艺路线，首先利用超声探头对裂缝进行定位（浅缝<0.3 m，深缝>0.5 m），对浅缝进行环氧树脂加压注浆，深缝注浆后粘贴碳纤维布补强，粘贴面粘结强度 ≥ 2.5 MPa。针对表层和深部病害，分别用高分子水泥浆对表层的蜂窝、麻面进行修复，并对其进行了钻孔注浆，并对其进行了一次回弹试验，其强度合格率达到95%以上。在运行过程中，采用“长期感知，趋势预测”的方法，对运行过程中的危险进行早期预警。本项目拟通过“传感监控+无人值守”的方式，在隧道重要断面布置振动弦应变传感器，在拱顶、侧壁布置位移传感器，实现对建筑物应力和变形的实时测量。配备了高分辨率摄像机和红外热成像的无人机，实现了每季一次的全局巡检，及时发现渗漏、裂缝扩展等问题。以此为基础，建立疾病预报模型，运用灰色数学方法对疾病的发展速度进行预测，实现6~12个月的预警。

结束语

在铁路隧道工程管理中，通过对铁路隧道项目的勘察和预测，可以为建设项目的顺利实施，提供精确的地质资料，为建设单位及时发现隐患；通过采用各种先进的施工方法和技术手段，使铁路隧道建设的安全隐患大为减少，为项目的正常运行提供了可靠的保证。着眼于今后，引进新技术新方法，并与工程实践相联系，将其运用与改善，并在此基础上强化对建筑工人的培养与教育，保证铁路隧道工程的安全性品质，为国家的轨道交通事业的发展奠定基础。

参考文献

- [1]刘继龙,李耀飞.基于无线传感网络的货运铁路隧道照明灯状态自动化检测方法[J].电子设计工程,2025,33(19):74-78+83.
- [2]林晋海.铁路隧道震害及结构安全评估方法研究[J].铁道标准设计,1-12.
- [3]韩琦玮.TBM施工综合调度系统应用研究[J].河北科技工程职业技术大学学报,2025,42(04):91-95.
- [4]张自光,王海飞,张猛,等.铁路隧道钻爆法施工废水排放清污分流技术及工程应用[J].四川建筑,2025,45(04):75-79.