

隧道工程施工监理的关键技术与实践

胡 奔 黄泓钦

杭州公路工程监理咨询有限公司 浙江杭州 310000

摘要: 作为现代交通、水利、市政等领域中最主要的建设项目之一,其建设的好坏将影响到整个项目的使用寿命及公众的生命财产的安全。地下工程施工具有隐蔽性强,地质条件复杂,施工风险高,施工管理对于保证工程质量,控制工程风险具有重要意义。传统的工程监理方式多依靠人工进行决策,很难适应复杂的工程建设过程中的动态管理要求。随着智能监测和数字化建模等新技术的引入,我国的隧道建设正在向精细化和信息化方向发展,但在技术规范、管理流程和风险预警等方面还有待完善,才能满足高标准的现代化隧道建设需求。

关键词: 隧道工程; 施工监理; 关键技术

隧道施工监理是保证工程安全、质量和进度的重要环节,特别是在复杂地质条件下,其技术要求和现场管理难度都大大增加。据国家铁路局统计,2022年全国隧道运营里程已超过2万公里,高风险隧道占比超过30%,迫切需要精细化、实时监控。现场施工监理需要将地质预报、监控量测和超前支护等关键技术深度融合,依托数字化管理平台,实现全过程的动态控制。传统的人工经验模式已经很难适应长、高水压隧道等复杂工作环境,需要通过技术升级和管理创新,构建“人-机协同-数据驱动”的智能监控系统。本项目将结合工程实际,着重对支护质量控制、围岩稳定监测和风险预警等关键技术工程建设中的应用进行研究,以期为提高隧道工程的本质安全水平提供科学依据。

一、隧道施工监理质量控制体系

1. 现场控制: 靶向化管理措施落地

在公路隧道施工监理工作中,必须有针对性地采取针对性地管理措施,严格执行规范。根据JTG/T 3660-2020《公路隧道施工技术规范》,监理单位对关键工序的超前支护、初支和二衬施工进行全程旁站,并提出了相应的措施。例如,在初期支护质量控制方面,监理人员必须按照《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80-1-2017)的要求,对锚杆的安装数量、间距和抗拔力进行校核,每20 m取一段,设计上拔力不少于50 kN,现场抽检率不得低于5%,并要求每20 m取一段。同时,依据《公路工程施工安全技术规范》(JTG F90-2015),严格控制钢拱架间距允许偏差为 ± 50 mm,垂向偏差不得大于 2° ,采用激光断面仪逐榀进行监测,保证初期支护及时

闭合成环。喷浆混凝土厚度采用埋设钉钉法或地雷达法测得,其平均厚度不小于设计值,其最小厚度不得低于设计值的80%,每10延米至少进行一次测量。这种精细化作业步骤和量化指标是保证隧道工程质量和结构安全的关键^[1]。

2. 量测数据: 动态化质量研判支撑

测量数据的动态采集和分析是隧道施工监理质量判断和现场控制的核心支持。根据《公路隧道施工技术规范》(JTG F60-2019)的要求,监理单位必须对主要变形指标(如拱顶沉降和周边收敛等)进行全天候自动化监测,监测点间距不大于20 m,开挖后12小时内必须完成初读数的采集。在野外作业时,利用高精度全站仪和激光断面扫描器,每8小时进行一次数据采集,并利用无线传输技术将数据实时传输到监理管理平台上。每天由监理工程师对监测数据进行趋势分析,关注变形率是否超出规范规定的日内2 mm预警值。一旦发现异常情况,立即启动三级响应机制:暂停施工,每5米增加一个测点;联合施工单位开展地质雷达检查,查明围岩松动、支护缺陷;按《铁路隧道监控量测技术规程》(T10121-2018)对累计变形超过30 mm的隧道,采用径向灌浆或增设格栅钢结构加固。在一条正在建设的铁路隧道中,利用这套监测系统成功地对一处断裂松动带进行了预警。监测数据显示,连续两天,拱顶沉降速度超过3.5 mm/d,监理立即下令停工,经过进一步调查,在支护后面发现了一个2米深的空洞。及时采取超前小导管注浆措施,使基坑变形控制在25 mm以内,避免了塌方。这种以测量数据为驱动的闭环管理方式,实现了由被动检测到主

动控制的根本性转变^[2]。

3. 整改闭环：精准化问题纠偏落实

现场监理质量控制的有效性，最终体现为对问题的整改闭环管理。依托JTG F80/1-2017《公路工程质量检验评定标准》及相关规范，构建“发现—评价—处置—确认”的精细化纠偏流程。具体操作步骤为：（1）监理人员根据现场巡查或实测资料（如拱顶沉降速度连续2小时大于5 mm/h），及时发出《监理工程师通知单》（TJ-09号），明确存在的问题部位、违章情况和初步处理要求。随后，与施工单位技术负责人共同开展现场勘察，采用BIM模型模拟工作状态，形成书面整改方案，明确技术措施（如WSS工法径向注浆、注浆压力控制在0.5-1.0 MPa）、资源分配和完成时限。整改期间，监理人员全程旁站，加密监测频次至每小时1次，实时收集灌浆压力和沉降数据，以保证措施的有效性。最后，在整改结束后，由监理组织复查，对实测量数据进行复核（如沉降稳定小于0.1 mm/天），生成《问题整改复查报审表》（TJ-10表格），形成精准闭环，实现从发现问题到销售的全过程可追溯，数据可验证，确保质量隐患完全消除^[3]。

二、现代监理模式的实践优化路径

1. 施工质量动态监控体系的构建与实施

建立和实施一套科学、有效的施工质量动态监测系统，是保证隧道工程质量和安全的关键。通过全过程、多角度的监测手段，有效地控制了隧道工程的质量。在工程实施过程中，要根据工程地质、结构特点和技术难度等因素，采取科学合理的施工技术和控制措施。建立动态监测体系，首先要明确监测的内容和技术标准；根据JTG/T 3660-2020《公路隧道施工技术规范》，对关键指标如开挖断面尺寸、支护系统质量和衬砌混凝土厚度等进行了严密的监测。以某铁路隧道为例，应用高精度全站仪和断面扫描器对开挖超欠量控制，达到 ± 2 mm精度，比传统方法提高50%以上。对于支护质量的监测，采用锚杆拉拔试验和喷射混凝土强度实时监测的方法，保证了初期支护的安全性。为使监理系统真正落地，监理单位应制定有针对性的监理实施细则，明确各工序的检查要点、验收程序和质量标准。构建“监控—分析—反馈”闭环管理机制，利用信息化监测平台对施工质量状况进行实时监测，对施工质量状况进行动态评估，及时发现问题并进行整改，保证工程质量始终在可控状态下。

以第三方监测数据为基础，构建施工质量动态监测系统，实现监理单位对工程质量状况的实时监控。其实质过程包括监测点的布置，监理单位应按照设计要求对施工单位提供的监测点布置方案进行审核。一般要求沿隧道轴线每10 m布设一段监测断面，重点部位如洞口段、变质岩段、断层带等，应按5 m为一段。测点需设置高反射率专用标识，以保证不同光照条件下的准确识别，为数据获取精度提供基本保证。在数据采集环节，监理人员对施工单位所使用的自动监测设备（如高精度GPS全站仪等）及相关证书进行审核，以保证数据的可靠性。实践证明，采用自动采集技术，单次测量所需时间由30分钟左右缩短到8分钟左右，大大提高了监测数据的时效性，为动态监控提供数据依据。关键在于建立标准化的数据处理过程。监理单位应按要求及时将监测数据上传至共享信息平台，并由专门的软件对监测数据进行自动分析处理。监理工程师通过对比设计允许值（拱顶沉降限值为30 mm，周边沉降限值为20 mm），及时发现质量偏差。某隧道施工过程中，监理人员通过对监测数据变化趋势进行分析，及时发现3个断面沉降速率超过每日5 mm的预警值，立即下达停止施工指令，并要求采取加固措施，有效地避免了一起可能出现的质量事故。同时，要建立相应的分级预警机制。当监测数据到达预定的阈值后，自动触发三个级别的报警（提示）、2级（警告）和1级（危险）报警。监测人员按照不同级别采取相应的应对措施：三级预警要求加强监测频次；二级预警组织专题分析，提出解决方案；一级预警即要求施工单位停止施工，并向施工单位报告，形成“监控—分析—预警—处置”的闭环管理，真正实现对施工质量进行全程动态控制^[4]。

在新技术的运用上，采用三维激光扫描，大大提高监测的效能。将此方法应用于一条隧洞工程中，可以在一次测量中获得数百万个数据点，从而构建出一个较为完备的隧洞的3D模型。通过与BIM的比较，可以更好地反映出工程的实际情况。另外，采用无线网络的方法，通过在衬里植入传感器，可以持续地监测混凝土的强度变化。对产品的品质问题进行修正和确认，形成一个完整的监测系统。对于出现的问题，由监理工程师下达改正通知书，并提出具体的整改要求和时间。修正结束后，再按原来的检验方式对其进行检验和检验。对一项实际施工中出现的质量问题进行了分析，并对其全面的分析，结果表明，采用本系统对其进行全面的检查，其

结果为98.7%，比常规监控方式提高20个百分点左右。并在此基础上，对工程中出现的质量问题进行了分析，为以后的工程建设提供了借鉴（如表1所示）。

表1 动态监控体系实施效果对比

监控指标	传统方法	动态监控体系	提升效果
单点测量耗时（分钟）	30	8	73.3%
超欠挖控制精度（mm）	±50	±20	提高60%
质量问题发现率（%）	80.5	98.7	提升22.6%

2. 安全风险分级管控机制的创新应用

在建设项目建设中，创造性地运用安全风险分级控制体系，是保证项目成功实施的重要一环。其关键是构建一套科学的风险评价指标，并对其进行差异化控制。中国现行的《隧道工程施工安全技术规范》（JGJ/T428-2018）对隧道项目进行了危险程度的分类，并将其分为“特别重大”“重大”“较大”和“一般”四类。施工过程中，应由监理方组成专门队伍，利用地质雷达探测、三维激光扫描等多种探测方法，对开挖而开展综合地质超前预测。以一条正在建设中的一条铁路隧道为研究对象，利用TSP203超前地质预报技术，对50 m范围内的断裂松动区进行了准确的预测，并对其进行了相应的优化，从而有效地防止了塌方。

在实际中，风险等级控制是一个复杂的过程。在风险辨识中，应以120多个危险指数为基础，将项目地质调查结果与施工图相融合，构建综合120多个风险指数的评价数据库。对该数据进行动态分析，如果在基坑施工中，一旦出现与设计要求不一致的情况，则应及时对其进行风险评估。针对危险性较大的工作面，监理单位应实行“双人旁站”管理，由两位以上的专职监理人员负责全程监控。以一条典型的城市轨道交通工程为背景，以BIM为基础，构建了一套可视化的施工过程模型，实现每天观测到的沉降变形量与早期预警值的实时对比，并在变形速度大于0.2 mm/天的情况下，及时启动预警系统。在风险管理手段上，创新的分层管理模式，需要实施不同类型的应急预案。特殊情况下，如需跨越富水区等，应由监理单位审查并进行专业审查，并进行专业论证。一座跨河隧道，在设计过程中，监理小组对其进行了超前灌浆，并对其进行了现场取样，以检验其加固效果。并将监测频次、控制标准、应急预案等内容纳入控

制表，例如将高危工作时段监测频次从每日1次提升至2 h 1次等。同时，也要由管理者对控制的结果进行周期性的评价，并对控制水平进行动态地调节。某山区一条公路隧道工程中，采用了“物联网”的方法，在钢拱架上设置了一个应力传感装置，对围岩的受力情况进行监测，并在其超过80%的情况下，将控制级别提高至最高。通过对监控方式的改革，进一步实现对危险等级控制的创新。现代监理已从单纯的旁站检测向远程监控、智能预警和数据分析等多种监控手段发展。在一条特长隧道工程中，利用无人机巡视法，每周对整个隧洞进行一次全面的立体探测，并将其与设计计算结果进行对比，以检测出早期支护存在的问题^[5]。

结束语

综上所述，在施工过程中，加强对施工质量和施工安全的监督管理，是保证施工质量和提高施工安全的有效途径。随着人工智能、物联网等技术的不断发展，监测工作将越来越多地依靠大数据与智能决策，由应急反应向事前防范转型。在此基础上，通过完善产业标准，培训专业人才，强化跨学科合作，使我国的隧道施工监理工作向高效率、高精度方向发展。

参考文献

- [1] 高雄鹰. 城市地铁建设工程施工监理管理分析[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(03): 56-58.
- [2] 杜鹏. 隧道工程机械化配套施工技术优势及应用研究[J]. 汽车周刊, 2025, (07): 99-100+130.
- [3] 唐树华. 桥梁和隧道施工中注浆技术的应用研究[J]. 汽车周刊, 2025, (07): 228-230.
- [4] 刘昕, 李准, 徐涛. 铁路单线隧道全断面机械化支护工程施工经济分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2025, 40(03): 38-43.
- [5] 洪浩平. 电力隧道大直径顶管工程施工技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (15): 73-75.
- [6] 莫言迟, 刘占省, 刘子昌, 等. 大型隧道施工过程安全数字孪生建模方法与优化分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(03): 843-855. [1] 周路. 铁路隧道施工监理现场管控方法与措施探讨[J]. 建设监理, 2024, (S1): 24-25+31.