

# 隧道工程施工质量管理体系构建与实际施工情况结合策略研究

张鹏 李冰会

中国人民解放军 96781 部队

DOI:10.32629/etd.v6i5.16846

**[摘要]** 隧道工程建设因其地质情况复杂、施工工法多等特点,需要对工程的质量管理水平提出更高的要求。针对隧道工程施工质量管理体系与实际施工的衔接性进行分析,充分结合隧道施工作业的质量管理难点与地质危险源,从质量管理工作的前期阶段至施工过程的各道工序和应急事件的管理环节全面展开论述,构建一套具有强适应性、高执行力、动态优化能力的隧道施工质量管理体系,为融入隧道工程施工实践,提高工程质量提供一定的理论支撑以及实践经验。

**[关键词]** 隧道工程; 质量管理; 施工; 地质; 工艺控制

中图分类号: U45 文献标识码: A

## Research on the Strategy of Combining the Construction Quality Management System of Tunnel Engineering with the Actual Construction Situation

Peng Zhang Binghui Li

Unit 96781 of the Chinese People's Liberation Army

**[Abstract]** tunnel engineering construction due to its complex geological conditions, construction methods and other characteristics, need to put forward a higher level of engineering quality management requirements. This paper analyzes the connection between tunnel construction quality management system and actual construction, and fully combines the difficulties of tunnel construction quality management and geological hazard sources. From the early stage of quality management to the process of construction and the management of emergency events, to build a set of tunnel construction quality management system with strong adaptability, high execution and dynamic optimization ability, in order to integrate into tunnel construction practice, to improve the quality of the project to provide a certain theoretical support and practical experience.

**[Key words]** tunnel engineering; quality management; construction; geology; process control.

### 引言

隧道工程是用于突破地理屏障的重要工程,在公路、铁路及市政等都有应用,隧道工程在施工中存在着围岩不稳定,水文地质条件复杂等问题,渗漏水、衬砌开裂等问题时常发生。因此建立一套切合隧道工程施工实际的管理体系十分必要。要在原有管理方式的基础上,把管理重点放在隧道工程“地质变数大、工艺专业性高、隐蔽工程多”等特点上,使整个管理体系与围岩特性、施工工艺等相联系,构建特色鲜明的质量管控体系。

#### 1 隧道工程施工质量管理的特殊性分析

##### 1.1 地质环境的决定性影响

隧道施工过程受地质控制, I—V 级围岩等级会使围岩自稳能力和地下水赋存状态不同,影响到施工方案的选择和质量控制的重点,比如, V 级软弱围岩,容易出现坍塌和变形现象,应加强超前支护(如超前小导管、管棚)、加强初期支护刚度(加大钢拱架、提高喷射混凝土强度),其监控量测频率应提高到每天 2—3 次。

富水断层带存在突水突泥、涌水等风险,须提前通过地质雷达和超前钻孔进行准确判断;根据水体分布,采用注浆堵水、帷幕灌浆等方法进行工艺控制,用排水盲管和防水板相结合的方式做好防水工作,避免出现渗漏水情况<sup>[1]</sup>。

##### 1.2 施工工艺的复杂性与专业性

隧道施工工艺随开挖的差异显著,常见工艺包括:(1)钻爆法。适用于硬岩地层,需严格控制爆破参数(如炮眼间距、装药量),避免振动导致围岩松弛。某铁路隧道采用钻爆法时,因周边眼间距过大(设计 50cm 实际施工 65cm),造成拱部超挖 1.2m,后期回填不密实,形成渗漏水隐患。(2)盾构法。依赖盾构机设备性能与参数值,土压平衡盾构需实时监控土仓压力(波动范围 ±0.02MPa)与推进速度(30—50mm/min),防止刀盘磨损导致地层沉降。上海某地铁隧道盾构施工中,因刀盘扭矩不足(低于设计值 20%),造成泥岩地层切削不充分,地表沉降达 50mm,远超规范允许值(30mm)。(3)新奥法。以围岩自承能力为核心,强调动态

设计与信息化施工。挪威Eiksund海底隧道采用新奥法施工时,通过实时监测围岩位移(使用激光测距仪)与应力(埋设应变计),动态调整锚杆长度(从3m增至4.5m)与喷射混凝土厚度(从15cm增至20cm),成功穿越高应力岩爆地段<sup>[2]</sup>。

### 1.3 隐蔽工程的质量管控难点

隐蔽工程质量需靠过程控制和检测手段来实现,如隧道初期支护、防水板铺设、衬砌背后回填的质量检测等。初期支护喷射混凝土,如果回弹率过高(大于30%)、或者喷射厚度达不到设计值的90%,则会导致支护刚度不足;某公路隧道检查,左侧拱腰处喷射混凝土厚度仅有12cm(设计值15cm),且局部出现钢筋网外露现象,进而导致相关隐患。防水板焊接质量双焊缝充气检测合格率要达到100%,单条焊缝长度小于15mm或者存在焊焦、假焊等问题都会导致防水失效;某地铁隧道防水板施工出现手工焊接不到位的现象,在抽检的时候发现焊缝上有大约15%左右的气泡,最后项目修补造成增加的费用约80万元。

## 2 隧道工程施工质量管理体系构建的核心要素

### 2.1 组织架构与职责体系

建立“三层级”质量管理组织架构,明确职责边界:

(1)决策层。由项目经理牵头,负责制定质量方针(如“隧道零渗漏、衬砌零裂缝”)、资源配置(确保检测设备、人员到位)与重大方案审批(如穿越断层带施工方案)<sup>[3]</sup>。(2)管理层。设质量总监与专业工程师(地质、测量、试验等),负责编制计划、技术交底、日常巡查等。例如,地质工程师需每日分析掌子面地质素描图,预判围岩变化趋势;测量工程师需每周对隧道轴线偏差(允许±20mm)与高程误差(±30mm)进行复核。(3)执行层。融入班组管理,建立班组责任制和考核机制,各施工班组设兼职质量员,负责工序自检(如锚杆安装深度、钢筋网搭接长度)与质量问题及时反馈。日本北海道某隧道施工中,班组质量员通过敲击法检查喷射混凝土空鼓率,及时发现并处理拱顶部位2处空鼓(面积分别为1.5m<sup>2</sup>、2.3m<sup>2</sup>),避免了后期风险。

### 2.2 制度体系与标准建设

建立“基础制度+专项标准”的制度体系。(1)基础管理制度。质量责任制(明确各考核指标)、技术复核制(测量须二人以上校核);质量验收制(工序验收实行“三检制”:班组自检、技术员复检、质检员终检)。(2)专项技术标准。按照隧道特点制定细化:《隧道超前地质预报技术规程》,明确了各种预报手段(TSP、地质雷达等)的范围(TSP预报距离为100—150m、地质雷达为20—30m),确定了预报成果准则;《隧道衬砌混凝土施工质量控制标准》明确了入模温度(5—30℃)、坍落度(180±20mm)、养护时间(≥14天)及衬砌厚度检查频率(每10米不得少于一个断面,每断面不少于5个测点)等内容。

### 2.3 资源配置与技术保障

成立包括隧道专业人员(拥有隧道穿越复杂地层的经验)、注册岩土工程师(负责围岩稳定性的分析)、无损检测工程师(使用地质雷达、声波透射法检测)的专业化团队;该高铁隧道项目的隧道施工邀请了专家团队到现场对本工程高应力岩爆地段的爆

破,通过采用增加钢纤维喷射混凝土、掺量30kg/m<sup>3</sup>,将岩爆级别由中等降低为轻微方式<sup>[4]</sup>。

配备先进的检测仪器(如:激光断面仪、锚杆拉拔仪、防水板焊缝检测仪);建立材料溯源体系。对某隧道采用“材料二维码管理”,每一批次的钢筋、防水板等均赋二维码,通过扫描二维码可查看该材料的出厂检验报告、进场复试情况等信息,做到质量可追溯。

推广新技术、新工艺,使用数字化监控量测系统,在各处布置振弦式应变计、静力水准仪等自动化监测元件,通过采集围岩位移、支护应力数据并由系统实时预警(当位移速率>5mm/d时,触发橙色预警),以此代替人工检查;采用智能二衬台车,集成了混凝土浇筑监控系统(可监测浇筑压力、温度)和定位系统(定位精度为±5mm),保证衬砌厚度均匀,衬砌轴线偏差满足规范要求。

## 3 质量管理体系与隧道施工实际的结合策略

### 3.1 地质勘察与方案适配

精细化地质勘察:采取“综合勘察法”,即“区域地质调查+物探(TSP、地震反射波)+钻探(超前水平钻)+原位测试(声波测试)”三位一体的手段,建立隧道三类围岩地质三维模型。以一高速公路隧道穿行于喀斯特地貌区为例,经无人机进行航测,并用钻孔CT技术(钻孔间距15m),定位钻孔及区域内溶洞位置,参考其分布、规模、埋深等数据指标,作为施工方案制定的参考依据。

动态施工方案设计:根据现场地质情况不断优化调整支护参数和施工方案,在现场发生围岩级别变化情况下要及时调整为微台阶法(台阶长度小于等于3~5m),增加超前锚杆支护(长4.5m、间距1.0m×1.2m),并对围岩补强加固;对于富水地层要在初期开挖之前预先设计好“堵排结合”的方法,先期帷幕注浆进行封闭水源(注浆压力控制在1.5~2.0MPa)、后期在衬砌背后设置环向盲管(间距为5~10m)和纵向排水盲管(φ100),保证排水流畅。

### 3.2 工序控制与风险预警

(1)关键工序质量管控。对高风险、隐蔽性强、不可逆转的工序(如初期支护拱架安装、锁脚锚杆施工等),必须实施全过程监督,及时纠偏。超前支护施工时严格按照管棚钻孔方向(外插角1—3°)、长度(误差±5cm)等参数进行控制,确保浆液饱满。某隧道管棚施工时因注浆压力不够(只有0.3MPa),管棚无法与围岩充分接触,为此采用补注浆(注浆压力提高到1.2MPa)后消除支护隐患。初期支护施工。喷射混凝土须分层喷射(每次5~7cm),初喷应在开挖后1h内完成,再喷射到设计厚度。用湿喷法施工,要严格控制混凝土坍落度(120~150mm),减小回弹率(≤20%)。做好防、排水工作。防水板铺设要留足10%~20%余量,并用双焊缝焊接(每条焊缝宽度大于等于15mm),焊接时温度控制在200~250℃范围内;防水板铺完之后每10环抽一环做充气检测(0.25MPa压力下保压3分钟),压力降低≤10%判定为合格。(2)实时监测与风险预警。建立“监测-分析-反馈-调整”闭环

管理流程, 监测内容包括: 围岩位移, 采用全站仪(精度 $\pm 1\text{mm}$ )非接触监测与收敛计(精度 $\pm 0.1\text{mm}$ )接触监测; 当累计位移量大于限值(如V级围岩位移累计量达到 $50\text{mm}$ )或位移速率达到一定值(如大于 $10\text{mm/d}$ )时, 则停止开挖, 并增加支护措施。设置好支护结构的应力: 在钢拱架及锚杆上安装应力计, 在达到应力值设计值的80%以上时将报警。某隧道施工时, 利用BIM平台发现右线隧道拱顶沉降速率达到 $8\text{mm/d}$ (预警值 $5\text{mm/d}$ ), 紧急启动应急预案, 及时施作临时仰拱(间距 $3\text{m}$ ), 3d后, 沉降速率达到 $2\text{mm/d}$ 左右趋于稳定。

### 3.3 全项目检测与持续优化

衬砌质量检测: 利用地质雷达(检测衬砌厚度、背后空洞)和声波透射法(检测混凝土强度均匀性)检测, 抽检不低于总延长米数的20%; 某隧道检查出二次衬砌背后有3处空洞(最大直径 $1.8\text{m}$ ), 采用钻孔注浆填充(注浆材料选用微膨胀水泥浆), 经复检合格后, 由隧道建设管理单位组织二次验收。渗漏水检测: 利用红外热成像仪检测衬砌表面温度差, 找寻渗漏水点。对渗漏水部位, 采用“注浆封堵+引排”的方法处理, 在渗漏水处布置注浆管(间距 $50\text{--}100\text{cm}$ )向其中注入聚氨酯堵漏剂, 在漏水点下方做排水槽, 把水引流至隧道排水系统<sup>[5]</sup>。

### PDCA循环改进:

(1) 计划(P1an)。每月召开质量分析会, 汇总施工中存在的问题(如某月统计发现喷射混凝土回弹率超标问题占比 $40\%$ ), 改进目标(回弹率降至 $15\%$ 以内)与措施(优化配合比、加强喷射手培训)。(2) 执行(Do)。组织喷射手专项培训(邀请厂家技术人员现场指导), 调整混凝土配合比(增加速凝剂掺量 $1\text{--}2\%$ , 降低砂率至 $45\%$ )。(3) 检查(Check)。培训后连续监测10个工作日, 回弹率平均值降至 $14.5\%$ , 达到预期目标。(4) 处理(Act)。将改进后的配合比与操作方法纳入企业标准, 形成长效机制。

## 4 高速公路隧道质量管理体系应用实践

### 4.1 工程概况

某高速公路隧道全长 $3500\text{m}$ , 穿越页岩、泥岩互层地层, 其中V级围岩段长 $800\text{m}$ , 地下水较发育, 设计采用复合式衬砌。

### 4.2 质量管理体系实施要点

先采用超前水平钻(每循环钻 $30\text{m}$ , 留 $10\text{m}$ 岩芯)和地质雷达(每 $5\text{m}$ 检测一次)探测, 共发现5处小溶洞及2条地下水径流带, 采取注浆加固(注浆范围为隧道开挖轮廓线外 $5\text{m}$ ), 注浆设计参数: 注浆范围为隧道开挖轮廓线外 $5\text{m}$ ; 注浆材料为水泥—水玻璃双液浆(体积比为 $1:1$ ), 注浆压力控制在 $1.0\text{--}1.5\text{MPa}$ 之间。超前支护采取 $\Phi 108\text{mm}$ 管棚(长 $40\text{m}$ , 环向间距 $40\text{cm}$ ), 注浆采用水泥—

水玻璃双液浆(体积比为 $1:1$ ), 注浆压力控制在 $1.0\text{--}1.5\text{MPa}$ , 确保管棚和围岩形成支护体系。初期支护采用C25喷射混凝土(厚 $25\text{cm}$ )、I20b钢拱架(间距 $80\text{cm}$ ), 每个钢架采用4根 $\Phi 22\text{mm}$ 锁脚锚杆(长 $4.0\text{m}$ )固定, 实测发现: 钢拱架应力最大值 $120\text{MPa}$ (设计允许值 $210\text{MPa}$ ), 在安全系数内。防排水系统采用 $350\text{g/m}^2$ 无纺布+ $1.5\text{mm}$ 厚EVA防水板, 焊点质量抽检合格率 $\geq 98\%$ ; 二次衬砌混凝土为C30P8防水混凝土, 浇筑时要严格控制坍落度( $180\pm 20\text{mm}$ )和浇筑速度( $2\text{--}3\text{m/h}$ ), 养护不少于 $14\text{d}$ 。

### 4.3 实施效果

无涌突坍塌等重大质量事故发生, 隧道渗漏量仅为 $0.05\text{L}/\text{m}\cdot\text{d}$ , 小于规范要求值 $0.1\text{L}/\text{m}\cdot\text{d}$ ; 衬砌厚度及混凝土强度检测合格率为 $100\%$ , 工程质量评定为优良; 因质量管理体系的有效运行, 该隧道工程较原计划提前 $15\text{天}$ 完工, 比原计划节省造价约 $2.3\%$ , 实现了良好的经济和社会效益。

## 5 结束语

隧道工程施工质量管理体系应围绕“地质特性、工艺特点、隐蔽工程”三大重点展开, 突出重点, 以防为主; 采取精准勘察、施工过程动态控制、竣工验收多种方式检测, 是实现“人、机、料、法、环”等全要素管好质量的关键所在。通过信息化(BIM、自动化监测等)和标准化(二维码溯源、PDCA循环等)手段, 可有效提升工程质量管理水平。未来隧道工程施工质量管理应进一步向智能化、绿色化方向发展, 通过持续优化质量管理体系与施工实际的融合策略, 不断提升隧道工程施工质量水平, 为交通基础设施建设的高质量发展提供坚实保障。

### [参考文献]

- [1]陆瑞. 建筑工程施工质量的精细化管理体系构建[J]. 城市开发, 2024, (12): 98-99.
- [2]王战歌. 建筑工程施工质量管理与监督体系构建研究[C]//中国智慧工程研究会. 2024人工智能与工程管理学术交流会论文集. 蓝城乐居建设管理集团有限公司, 2024: 431-432.
- [3]李更新. 大连湾海底隧道沉管工程施工质量管理研究[D]. 沈阳化工大学, 2022.
- [4]余维. 高速公路工程施工质量管理体系构建研究[J]. 建材发展导向, 2021, 19(12): 102-103.
- [5]陈玉双. 绿色环保理念下园林工程施工质量管理体系构建对策[J]. 乡村科技, 2019, (35): 49-50.

### 作者简介:

张鹏(1990—), 男, 汉族, 四川蓬溪人, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道地下工程建设。