

关于隧道施工技术分析和质量控制探讨

童斌

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/UAID.2025020035

摘 要：隧道工程作为交通基础设施的重要组成部分，其施工技术水平与质量控制效果直接关系到工程安全与使用寿命。本文围绕隧道施工技术分析和质量控制展开探讨，从常见隧道施工技术及应用场景、质量控制关键环节、质量问题防治与优化措施三个方面进行系统研究，结合实际工程案例阐述技术要点与控制方法。研究旨在为隧道工程施工提供实践参考，推动施工技术的规范化与质量控制的精细化，保障隧道结构安全与运营可靠性。

关 键 词：隧道施工；施工技术；质量控制；问题防治；安全管理

Discussion on Technical Analysis and Quality Control of Tunnel Construction

Tong Bin

Zhejiang Provincial Hongtu Transportation Construction Co., LTD. Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract：As an important component of transportation infrastructure, the construction technology level and quality control effect of tunnel engineering directly affect the safety and service life of the project. This article focuses on the analysis of tunnel construction technology and quality control. It conducts a systematic study from three aspects: common tunnel construction technologies and application scenarios, key links in quality control, and prevention and optimization measures for quality problems. It elaborates on the technical points and control methods in combination with actual engineering cases. The research aims to provide practical references for tunnel engineering construction, promote the standardization of construction techniques and the refinement of quality control, and ensure the structural safety and operational reliability of tunnels.

Keywords：tunnel construction; construction technology; quality control; problem prevention and control; safety management

前言

随着我国交通建设向山区、复杂地质区域延伸，隧道工程的数量和规模不断扩大，施工难度也日益增加。隧道施工环境封闭、地质条件复杂（如断层破碎带、富水地层、高地应力区等），施工过程中易出现塌方、涌水、支护变形等问题，质量控制面临严峻挑战。例如，某山岭隧道施工至 K1+250 段时，因未及时处理掌子面涌水，导致初期支护出现 5cm 沉降；另一城市地铁隧道因二次衬砌混凝土强度不足，运营 3 年后出现裂缝。在此背景下，深入分析隧道施工技术特点，强化全过程质量控制，对解决工程难题、降低安全风险具有重要意义。本文基于多项工程实践，系统总结隧道施工技术与质量控制要点，为类似工程提供借鉴。

一、隧道常见施工技术及应用场景

隧道施工技术需根据地质条件、断面尺寸、工程环境等因素选择，不同技术适用于不同场景，需结合实际情况合理应用。

（一）钻爆法施工技术

钻爆法是山岭隧道常用的施工方法，通过爆破破碎岩体实现开挖，具有适应性强、成本较低的特点，适用于岩质围岩（Ⅱ—Ⅳ级）。

施工工艺要点：采用光面爆破或预裂爆破技术，控制超挖量（Ⅲ级围岩 $\leq 15\text{cm}$ ，Ⅳ级 $\leq 20\text{cm}$ ），减少对围岩的扰动。某

铁路隧道Ⅲ级围岩段采用光面爆破，周边眼间距 40cm，抵抗线 50cm，装药量控制在 0.2kg/m，爆破后轮廓平整度达 90%，超挖量平均 8cm，减少了混凝土回填量。^[1]

应用场景与案例：适用于中等硬度以上岩体（单轴抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$ ），如花岗岩、石灰岩地层。某高速公路隧道穿越花岗岩地层，采用钻爆法施工，循环进尺 3m，月进尺达 120m，较机械开挖效率提升 40%，且成本降低 25%。

（二）盾构法施工技术

盾构法是地下工程机械化施工的主要方法，通过盾构机完成“开挖—支护—出渣”一体化作业，适用于软土、砂土等软弱地层

(城市地铁、越江隧道常用)。

盾构机选型与施工要点：根据地层条件选择盾构机类型，土压平衡盾构适用于富水软土地层，泥水平衡盾构适用于高水压地层。某城市地铁隧道穿越粉质黏土地层（含水率35%），选用直径6.28m土压平衡盾构，设定土仓压力0.3–0.5MPa，同步注浆压力略高于土压力（0.1MPa），有效控制了地表沉降（最大沉降30mm）。^[2]

应用场景与案例：适用于城市密集区、水体下方等对沉降敏感的区域。某越江隧道采用泥水平衡盾构施工，穿越长江河床（最大水深30m），通过控制盾构推进速度（3–5cm/min）和注浆参数，使江底隆起量控制在5mm以内，避免了河床变形对航运的影响。

（三）新奥法与浅埋暗挖法

新奥法以“围岩承载”为核心，适用于岩质隧道；浅埋暗挖法是新奥法在浅埋软弱地层的延伸，强调“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”。

新奥法施工要点：采用喷锚支护（喷射混凝土+锚杆+钢拱架）及时封闭围岩，利用围岩自承能力。某水电站隧道（Ⅳ级围岩）采用新奥法施工，开挖后立即喷射5cm厚早强混凝土封闭表面，24小时内完成锚杆（长度3m）和钢拱架安装，使围岩变形速率控制在0.5mm/d以内。

浅埋暗挖法应用案例：某城市地下隧道（埋深8m，Ⅴ级围岩）采用CRD法（交叉中隔壁法）施工，单循环进尺0.5m，开挖后12小时内完成初期支护封闭，通过地表沉降监测（最大沉降25mm）验证了施工安全性，成功穿越既有建筑物下方。

二、隧道施工质量问题防治与优化措施

（一）常见质量问题及防治措施

隧道施工质量问题具有隐蔽性和连锁性，需针对具体问题制定精准方案，从源头控制风险。

围岩失稳防治：多因地质勘察不足、开挖扰动或支护滞后导致。某深埋隧道（埋深300m）穿越断层破碎带时，掌子面每小时掉块0.5m³，超前地质雷达显示前方5m为富水软弱夹层。应急措施：采用Φ108mm管棚（长10m，环距40cm）超前支护，注入水泥–水玻璃双液浆（凝胶时间30s）形成加固圈；循环进尺从1.5m缩至0.5m，CRD法分4部开挖，每部开挖后2小时内完成I25a钢拱架+25cm厚喷射混凝土支护；加密监测（1次/小时），拱顶下沉速率从0.8mm/h降至0.2mm/h，最终安全穿越。^[3]

支护开裂处理：多因应力集中、材料缺陷或安装偏差。某浅埋隧道（埋深12m）偏压段初期支护出现5mm宽斜裂缝（长3m），检测发现钢拱架中线偏差8cm（规范≤5cm）致应力超限。处理：① 架设I20a临时横撑（间距1.5m）限制扩展；② 拆除偏差钢拱架重新安装（偏差≤3cm），拱脚增设4根Φ25锁脚锚杆（长5m）；③ 沿裂缝钻孔（孔径10mm，间距30cm）注入改性环氧树脂（压力0.4MPa），7天后裂缝闭合度90%，应力回归正常范围。

渗漏水治理：分点漏、线漏和面漏，需结合水压选择“堵排

结合”方案。某跨河隧道（水下段500m）侧墙3处点漏（单孔涌水量5L/min，水压0.6MPa）：先埋Φ50mm引流管降压至0.2MPa，再用Φ48mm袖阀管分段注浆（水泥+水玻璃，压力1.2MPa），范围覆盖漏水点外2m；5m²面渗区域采用2mm厚水泥基防水涂料+5cm防水砂浆处理。闭水试验（0.3MPa恒压24小时）渗漏量≤0.1L/m²，确认合格。

二次衬砌缺陷修复：针对蜂窝、强度不足、保护层不够等问题，结合无损检测修复。某高速隧道拱顶雷达扫描发现0.3m³空洞，钻芯显示强度C25（设计C30）：① 风镐破除缺陷区（扩大至健康混凝土50cm），浇筑C35微膨胀混凝土（掺10%膨胀剂）；② 强度不足区粘贴0.167mm厚碳纤维布（抗拉强度3400MPa），布长超缺陷区1m；③ 保护层不足段（设计5cm，实测2cm）凿除表层，聚合物砂浆回填。修复后强度达C32，保护层偏差≤5mm，符合要求。

（二）技术创新助力质量控制

技术创新是提升质量控制精度的核心驱动力，通过智能化、数字化技术实现施工全过程的可视化、可追溯与精准管控。

智能化监测与预警系统：利用物联网技术构建“感知–传输–分析–预警”闭环体系，实时捕捉质量隐患。某特长隧道（全长10km）部署了分布式光纤传感系统，在初期支护内预埋光纤（每5m一个监测点），实时采集应变数据（精度±2μ ϵ ）。施工至K5+300段时，系统显示右侧拱腰应变突增（从200μ ϵ 升至600μ ϵ ），同步监测的净空变化速率达1.5mm/d（规范≤0.5mm/d）。系统自动推送预警信息至管理人员手机，经现场核查，发现该段围岩为遇水软化的泥岩（含水率从15%升至25%）。技术团队立即调整支护参数：将钢拱架间距从80cm缩至50cm，喷射混凝土掺加5%硅灰提升抗渗性，3天后应变值降至300μ ϵ ，避免了支护失稳。^[4]

BIM技术全流程质量管控：通过BIM模型整合设计、施工、检测数据，实现质量问题的溯源与预控。某城市地铁隧道项目构建了“BIM+质量”管理平台，将设计模型（包含衬砌厚度、钢筋间距等参数）与现场施工数据（如每榀钢拱架安装坐标、混凝土试块强度）关联。施工中，平台自动比对实际参数与设计值：发现K0+500段仰拱钢筋间距偏差达12cm（规范≤10cm），立即推送整改单至作业班组，追溯显示为钢筋定位卡具松动，更换卡具后偏差控制在5cm内。此外，利用BIM进行碰撞检测，提前发现衬砌钢筋与预埋件冲突点12处，避免了后期返工（节省成本约50万元）。

无损检测技术深化应用：采用先进无损检测手段替代传统破损检测，提升质量评估的全面性与准确性。某隧道采用地质雷达（主频200MHz）对二次衬砌进行全断面扫描，发现3处脱空（最小厚度5cm）和2处钢筋缺失；结合超声波检测（换能器频率50kHz）评估混凝土密实度，定位2处蜂窝区域（面积约0.3m²）。相比传统钻芯法（抽检率0.1%），无损检测覆盖率达100%，且对结构无损伤，为修复方案制定提供了精准数据。

（三）管理体系优化

完善的管理体系是质量控制的制度保障，需通过责任细化、

流程规范与协同机制，形成“全员参与、全过程管控”的质量管理格局。

全流程质量责任矩阵：构建“岗位－工序－责任”三维矩阵，明确从项目经理到作业人员的质量职责。某隧道项目将施工过程划分为28个关键工序（如超前地质预报、钢拱架安装、混凝土浇筑），每个工序明确“操作人－质检员－技术负责人”三级责任：操作人对工序结果直接负责（如焊工需在防水板焊接记录上签字）；质检员每道工序必检（如检查锚杆锚固力，不合格不得进入下道工序）；技术负责人每周组织质量复盘会，分析不合格项原因（如某周混凝土强度合格率92%，追溯为砂石料含水率波动，随即增加含水率检测频率至每小时1次）。实施后，质量问题整改率从85%升至100%。

第三方检测与飞行检查结合：引入独立第三方检测机构，采用“常规抽检＋突击检查”模式，确保检测数据客观公正。某项目委托具有甲级资质的检测单位，对初期支护强度（每月钻芯30点）、衬砌厚度（每50m雷达扫描1次）等指标进行抽检；同时业主单位每季度开展“飞行检查”（不提前通知），重点检查隐蔽工程（如锚杆长度、注浆饱满度）。某次飞行检查发现，某作业队为赶进度，锚杆实际长度比设计短0.5m（设计3m），立即要求返工并对责任单位罚款5万元，有效震慑了偷工减料行为。^[5]

质量追溯与终身责任制：利用信息化手段建立“一工序一档案”，实现质量问题可追溯、责任可倒查。某隧道项目应用“二维码质量追溯系统”，每个构件（如钢拱架、防水板）粘贴专属二维码，扫码可查看材料合格证、安装记录、检测报告等信息。运营5年后，某段衬砌出现裂缝，通过扫码追溯发现该段混凝土

浇筑时未按要求分层振捣（记录显示单次浇筑厚度50cm，规范≤30cm），随即对当年施工负责人启动终身追责程序，强化了“质量终身负责”的意识。

（四）人员素质提升与培训

人员是质量控制核心，需通过分层培训、实战演练与激励机制，变“被动管理”为“主动控制”。

建立分级培训体系：决策层聚焦质量战略与风险管控，通过案例研讨提升决策力；执行层强化专业技能，某技术员经培训后能凭拱顶下沉曲线提前3天预判失稳风险；作业层专攻实操，某焊工培训后双缝焊接合格率从80%升至99%。

搭建模拟训练场，设置“断层开挖”“涌水处理”等场景，作业人员需10分钟内完成突水应急处置。某班组经10次训练，实际突水处置时间从30分钟缩至8分钟，避免事态扩大。^[6]

完善激励机制，设“质量之星”月度评选（获奖班组奖2万元），优先推荐无质量问题人员晋级；通过“质量宣誓”“故事分享会”强化意识，员工改进建议从月均5条增至30条，形成“人人重质量”的氛围。

三、结语

隧道施工技术的先进性与质量控制的有效性，是保障隧道工程安全可靠的关键。本文通过分析隧道施工技术特点、质量控制环节及问题防治措施，结合案例表明：合理选择施工技术是基础，严格把控各工序质量是核心，针对性防治质量问题是保障。

参考文献

- [1] 刘畅, 李勇, 张峰. 智能化监测技术在特长隧道施工质量控制中的应用 [J]. 现代交通科技, 2024, 45(6): 45-49.
- [2] 王强, 赵悦, 陈晨. BIM技术在城市地铁隧道施工全流程质量管控的实践与创新 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1483-1490.
- [3] 黄宏, 周明, 郑亮. 岩溶地区交通隧道突涌水灾害防控技术研究与应用 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 2081-2090.
- [4] 孙悦, 吴刚, 徐宁. 铁路隧道衬砌病害成因分析与整治技术研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2385-2393.
- [5] 赖金星, 李阳, 王鹏. 浅埋黄土隧道地表裂缝形成机理与防治措施研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4091-4100.
- [6] 李明, 张伟, 赵刚. 高地应力偏压隧道初期支护优化设计与施工技术 [J]. 隧道建设, 2020, 40(8): 1199-1206.