

高速公路隧道施工技术及管理要点的探讨

瞿康林¹, 周华林²

1. 杭州中嘉建筑劳务有限公司, 浙江 杭州 311300

2. 浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/UAID.2026020057

摘 要 : 随着我国高速公路网络向复杂地质区域延伸, 隧道工程作为线路关键控制性节点, 其施工技术与管控能力直接影响工程质量、安全及运营耐久性。本文以《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020) 为依据, 系统探讨高速公路隧道核心施工技术体系, 梳理新奥法、钻爆法、盾构法等工法的适配性, 重点阐述洞口工程、洞身开挖、初期支护、二次衬砌及防排水系统的关键工艺; 结合施工全流程, 从超前地质预报、监控量测、质量管控、风险防控及数字化技术应用维度, 构建闭环控制体系。研究表明, 通过工法精准选型、工序精细化管控与智能化技术赋能, 可有效解决坍塌、涌水、衬砌脱空等核心问题, 为复杂地质隧道工程标准化施工提供理论参考与实践指导。

关 键 词 : 高速公路隧道; 施工技术; 质量控制; 监控量测; 风险防控; 数字化施工

Discussion on Construction Technology and Control Key Points of Highway Tunnels

Qu Kanglin¹, Zhou Hualin²

1. Hangzhou Zhongjia Construction Labor Service Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311300

2. Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311300

Abstract : As the highway network in China extends to complex geological areas, tunnel projects, as key control nodes of the route, their construction technologies and management capabilities directly affect the quality, safety, and operational durability of the project. Based on the "Highway Tunnel Construction Technical Specifications" (JTG/T 3660—2020), this paper systematically explores the core construction technology system of highway tunnels, reviews the adaptability of new open-cut method, blast method, and shield method, and focuses on elaborating the key processes of tunnel portal engineering, tunnel excavation, primary support, secondary lining, and waterproofing system; combined with the entire construction process, a closed-loop control system is constructed from the dimensions of advanced geological prediction, monitoring and measurement, quality control, risk prevention, and digital technology application. The research shows that through precise selection of construction methods, refined process control, and empowerment by intelligent technologies, core problems such as collapse, water gushing, and lining deflation can be effectively solved, providing theoretical references and practical guidance for standardized construction of complex geological tunnel projects.

Keywords : highway tunnel; construction technology; quality control; monitoring and measurement; risk prevention; digital construction

前言

当前, 隧道施工已形成以新奥法为核心、多工法互补的技术体系, 数字化、智能化技术推动施工模式向精准化、可视化转型, 但实际工程中仍存在工法适配不当、工序管控不严、风险预警滞后等问题, 导致衬砌裂缝、渗漏水等质量缺陷影响运营安全。本文结合公路施工企业工程实践, 围绕隧道施工技术核心环节与全流程控制要点展开研究, 通过梳理工艺要点、构建管控体系、分析数字化应用路径, 旨在为隧道工程高质量施工提供技术支撑, 推动行业施工水平与安全管控能力提升。^[1]

一、高速公路隧道核心施工技术体系

（一）施工工法选型与适配性分析

施工工法选型需以围岩分级、断面尺寸、地质条件及环境要求为依据，遵循“安全可靠、经济合理”原则，核心工法及适配性如下：

（1）新奥法（NATM）

新奥法是隧道施工的核心工法，以“利用围岩自承能力”为核心，遵循“短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则。通过超前支护、洞身开挖、初期支护与二次衬砌的协同作业，依托初期支护与围岩的共同作用形成临时承载结构，待围岩变形稳定后施作永久衬砌。该工法适用于Ⅱ—Ⅴ级围岩中小断面隧道，在河南驻马店周边丘陵地区隧道工程中应用广泛，适配性最强。^[2]

（2）钻爆法

钻爆法是新奥法的核心开挖工艺，分为光面爆破与预裂爆破两种方式，适用于硬岩地层及大断面隧道。光面爆破通过精准控制炮孔参数、装药结构与起爆顺序，保证隧道轮廓平整，超欠挖控制在规范范围内；预裂爆破先在开挖轮廓线外起爆炮孔形成预裂面，降低爆破对围岩的扰动。施工中需根据围岩级别动态调整炮孔间距、深度及装药量，硬岩隧道炮孔间距控制在40–60cm，软岩隧道适当缩小，确保超挖 $\leq 15\text{cm}$ 、欠挖 $\leq 5\text{cm}$ 。

（3）盾构法与TBM法

盾构法适用于软土、富水浅埋大断面隧道，依托盾构机实现掘进、支护、衬砌一体化作业，施工速度快、对周边环境影响小；TBM法（硬岩掘进机法）适用于硬岩长距离隧道，掘进效率为钻爆法的3–5倍。两种工法均属于机械化施工，设备成本高、对地质条件要求严格，主要应用于跨江跨海及长距离山岭隧道工程，普通山区隧道应用较少。

（4）特殊地质工法

针对Ⅴ级围岩破碎带、岩溶发育区等不良地质，采用CD法、CRD法、双侧壁导坑法及超前支护工法。CD法、CRD法通过分部开挖与临时支护控制围岩变形，适用于大断面浅埋隧道；双侧壁导坑法依托两侧导坑超前开挖，安全性高但工序复杂、进度较慢；超前小导管注浆、管棚支护用于加固围岩、封堵水源，是不良地质段施工的关键保障措施。

（二）关键分项工程施工技术

（1）洞口工程施工技术

洞口工程是隧道施工的基础，直接影响整体稳定性。施工遵循“自上而下、分层分段”原则，避免大爆破破坏山体。先施作截水沟做好防排水，开挖后根据围岩级别实施防护：Ⅱ—Ⅲ级围岩采用喷射混凝土+锚杆防护，Ⅳ—Ⅴ级围岩增加钢筋网或钢拱架。洞门结构需与地形适配，端墙式、翼墙式洞门需保证基础承载力符合设计；浅埋段及偏压段施作明洞，做好防水与回填压实，回填土压实度不低于95%。洞口浅埋段需增设管棚或小导管超前支护，管棚钢管 $\Phi 108-\Phi 159\text{mm}$ ，间距30–50cm，注浆压力0.5–1.0MPa，确保围岩稳定。

（2）洞身开挖施工技术

洞身开挖需结合工法选型确定工艺，核心控制超欠挖与围岩

扰动。Ⅱ—Ⅳ级围岩采用台阶法，上台阶超前、下台阶跟进，Ⅴ级围岩台阶长度控制在5–10m，确保开挖后及时施作初期支护。

Ⅴ级围岩大断面隧道采用CD法、CRD法或双侧壁导坑法，重点管控临时支护的牢固性，严禁提前拆除。开挖后采用激光放样复核轮廓线，硬岩隧道通过光面爆破控制超挖，软岩隧道减少机械扰动，超挖部位及时用喷射混凝土回填，欠挖部位补凿处理。

（3）初期支护施工技术

初期支护由喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢拱架组成，需遵循“初喷先行、分层施作、及时封闭”原则。初喷混凝土在开挖后立即进行，厚度3–5cm，封闭围岩防止风化；复喷分层作业，总厚度符合设计，喷射时喷嘴与岩面夹角 $75^{\circ}-90^{\circ}$ ，距离1–1.5m，确保密实无空鼓。系统锚杆采用 $\Phi 22$ 螺纹钢，长度 $\geq 3.5\text{m}$ ，间距1.0–1.5m，钻孔后清孔注浆，注浆饱满度 $\geq 90\%$ 。钢筋网铺设在初喷后，与锚杆焊接固定，网格间距15–20cm；钢拱架间距 $\leq 1.0\text{m}$ ，安装时保证垂直度偏差 $\leq 2^{\circ}$ ，轴线偏差 $\leq 10\text{mm}$ ，拱脚落在坚实基础上。^[3]

（4）二次衬砌施工技术

二次衬砌在围岩变形稳定后施作，核心控制指标为变形速率 $\leq 0.1\text{mm/d}$ 。采用液压整体模板台车施工，确保轴线偏差 $\leq 10\text{mm}$ ，内轮廓尺寸偏差 $\leq 5\text{mm}$ ，设置5–10mm预拱度补偿变形。衬砌钢筋采用HRB400级钢筋，保证保护层厚度 $\geq 5\text{cm}$ ；混凝土采用C30防水混凝土，掺入膨胀剂减少裂缝，泵送混凝土分层振捣，每层厚度 $\leq 30\text{cm}$ ，避免漏振或过振。混凝土强度达70%后拆模，及时洒水养护不少于14d，冬季施工做好保温，保证入模温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。

（5）防排水系统施工技术

防排水系统遵循“防、排、截、堵”原则，是隧道耐久性的核心。防水层采用EVA防水板，厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ，铺设前处理初期支护表面，避免尖锐突起刺破；防水板采用热焊法焊接，焊缝宽度 $\geq 2\text{cm}$ ，电火花检漏电压3.5kV，无漏点为合格。排水系统由环向、纵向盲管及横向排水管组成，环向盲管间距5–10m，横向排水管坡度 $\geq 2\%$ ，确保排水通畅。中埋式与背贴式止水带搭接长度 $\geq 10\text{cm}$ ，热熔固定，中心环线与施工缝中心线重合，避免渗漏隐患。

二、高速公路隧道施工全流程控制要点

高速公路隧道施工控制贯穿于项目全过程，是保障工程质量、施工安全与结构耐久性的关键环节，必须坚持“预防为主、过程管控、闭环管理”的原则，从施工准备、现场作业、竣工验收到数字化管控形成完整体系，全面提升施工标准化与精细化水平。

（一）施工准备阶段控制

施工准备阶段需夯实基础，核心控制技术、资源与风险预案。一是技术准备，组织图纸会审，明确地质条件与工艺要求，编制专项施工组织设计、超前地质预报及监控量测方案，报监理审批后实施。针对浅埋偏压、岩溶、富水地层等特殊地质，必须

单独编制专项处置方案，明确支护参数、开挖方式与应急措施，确保技术方案具备可操作性。二是超前地质预报，采用“地质雷达+超前水平钻探”组合方式，地质雷达探测距离 $\geq 30\text{m}$ ，钻探探测距离 $\geq 50\text{m}$ ，精准预判断层、岩溶、涌水等不良地质，及时调整施工方案。预报数据需及时分析、及时反馈，实现“先探测、再施工、动态调整”。三是资源管控，建立材料“准入—复检—使用”闭环体系，水泥、钢筋、防水板、注浆材料等关键材料必须提供合格检测报告并进行二次复检，不合格材料严禁进场；按工法选型配置设备，凿岩机、喷射机、模板台车、通风设备等进场前完成调试，保证性能稳定可靠。四是风险预案，针对坍塌、涌水突泥、有害气体、火灾、触电等风险编制专项应急预案，配齐应急物资与设备，定期开展应急演练，提升现场人员应急处置能力。^[4]

（二）施工过程阶段控制

施工过程是管控核心，需构建“三检制+监控量测+风险预警”全方位体系。一是监控量测，采用接触与非接触结合方式，重点监测拱顶下沉、周边收敛、地表沉降、围岩压力等指标；Ⅴ级围岩1-2次/d，Ⅳ级围岩1次/2d，变形稳定后逐步降低监测频率。监测数据实时整理分析，绘制变形—时间曲线，当沉降速率 $\geq 2\text{mm/d}$ 、收敛速率 $\geq 1.5\text{mm/d}$ 或出现突变时，立即停工并采取加强支护、减小进尺、注浆加固等措施。二是工序质量管控，严格执行自检、互检、专检“三检制度”，喷射混凝土厚度采用钢钎法检测，合格率 $\geq 90\%$ ；锚杆拉拔试验、衬砌密实度、防水板焊缝气密性检测合格率必须达到100%，确保每道工序均符合规范与设计要求。隐蔽工程必须经监理验收合格后方可进入下道工序，全程留存影像与检测记录，实现质量可追溯。三是安全风险防控，隧道内实行24小时有毒有害气体与通风监测，超限立即报警；洞口设置智能门禁与人员定位系统，严格管控人员与设备进出；爆破作业严格执行审批与警戒制度，施工用电、机械作业落实专人负责。发生坍塌、涌水等险情时，迅速启动预案，优先撤离人员，再采取管棚、超前小导管、帷幕注浆等措施进行处置，坚决杜绝重大安全事故发生。

（三）竣工验收阶段控制

竣工验收阶段需严格把关，确保工程质量全面达标、具备通车条件。一是竣工资料整理，与施工同步收集整理图纸、交底、施工日志、材料报告、隐蔽工程验收、监控量测数据等资料，做

到真实、完整、规范、可追溯，严格符合《公路工程竣（交）工验收办法》相关要求。二是实体质量检测，委托第三方权威机构开展隧道断面、衬砌厚度、混凝土强度、背后密实度、防排水系统完整性等检测，综合运用钻芯、超声波、地质雷达、电火花检测等手段，重点排查衬砌脱空、裂缝、渗漏水、厚度不足等常见质量问题。三是缺陷整改与验收，对检测发现的问题建立台账，制定专项整改方案，限期整改并复检；整改完成后组织建设、设计、施工、监理、检测五方联合验收，合格后方可出具验收报告并交付使用。^[5]

（四）数字化技术应用管控

数字化、智能化技术已成为提升隧道施工管控水平的重要支撑。一是BIM技术应用，通过三维建模进行施工模拟、进度管控、碰撞检查与工程量统计，提前优化施工工序，减少返工与浪费。二是物联网监测系统，在隧道内部署应力、应变、位移、气体、温湿度传感器，实现数据自动采集、实时传输、智能预警，大幅提升风险预判能力。三是3D激光扫描技术，快速获取开挖面、初支、二衬三维点云数据，精准检测超欠挖、平整度、轮廓尺寸，有效避免衬砌背后脱空、厚度不足等问题。通过数字化技术整合，实现“感知—分析—决策—控制”一体化，推动隧道施工由传统经验管控向数据化、智能化、可视化管控升级，全面提升工程建设品质与管理效率。^[6]

三、结语

高速公路隧道施工技术与管控的核心在于“工法精准适配、工序精细管控、风险动态防控”。本文系统梳理了新奥法、钻爆法等核心工法的适配性及关键分项工程工艺，构建了“准备—过程—验收”全流程控制体系，明确了超前地质预报、监控量测、质量管控及风险防控的核心要求；结合BIM、物联网、3D扫描等数字化技术，为隧道施工提供了智能化管控路径。

工程实践中，需结合地质条件动态调整施工方案，严格遵循《公路隧道施工技术规范》，强化隐蔽工程管理，筑牢质量安全防护线。未来应进一步深化不良地质施工技术研究，完善数字化管控体系，提升人员专业素质，推动高速公路隧道工程向更高质量、更安全、更智能的方向发展，为我国交通基础设施建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [2] 易荣. 高速公路隧道施工技术与控制要点分析[J]. 运输经理世界, 2023(8): 87-89.
- [3] 张成雷, 王松, 石海龙. 高速公路隧道施工技术与质量控制策略[J]. 工程技术研究, 2023, 8(21): 50-52.
- [4] 方子清. 复杂地质条件下高速公路隧道施工安全管控研究[J]. 工程质量与检测, 2025(12): 119-123.
- [5] 张文权. 隧道施工监控量测技术在高速公路工程中的应用[J]. 大众标准化, 2022(4): 22-24.
- [6] 童柳才. 数字化技术在高速公路隧道施工管控中的应用探究[J]. 居业, 2025(1): 121-123.