

高速公路隧道施工技术与质量安全控制策略研究

方子清

浙江交工宏途交通建设有限公司,浙江杭州 311305

DOI:10.61369/ETQM.2025120017

摘要 : 随着我国高速公路网络向山区、复杂地质区域延伸,隧道工程作为关键控制性节点,其施工难度与质量安全风险显著提升。本文结合当前高速公路隧道建设需求,系统分析了新奥法(NATM)、盾构法、TBM法等主流施工技术的应用场景与核心工艺要点,重点探讨了不同地质条件下施工技术的适配性选择。同时,针对隧道施工中常见的坍塌、涌水、支护结构失效等质量安全隐患,从地质超前预报、施工过程动态监测、人员设备管理、应急体系构建四个维度,提出了全周期、立体化的质量安全控制策略。研究结果可为高速公路隧道工程标准化施工与风险防控提供理论参考和实践指导,助力提升隧道工程建设质量与运营安全水平。

关键词 : 高速公路隧道;施工技术;新奥法;质量控制;安全管理;风险防控

Research on Construction Technology and Quality and Safety Control Strategies of Expressway Tunnels

Fang Ziqing

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

Abstract : With the extension of China's expressway network to mountainous areas and complex geological regions, tunnel engineering, as a key control node, has seen a significant increase in construction difficulty and quality and safety risks. This paper, in light of the current demands for expressway tunnel construction, systematically analyzes the application scenarios and core technological points of mainstream construction technologies such as the New Austrian Tunneling Method (NATM), shield method, and TBM method, and focuses on discussing the adaptive selection of construction technologies under different geological conditions. Meanwhile, in response to common quality and safety hazards in tunnel construction such as collapse, water inrush, and failure of support structures, a full-cycle and three-dimensional quality and safety control strategy has been proposed from four dimensions: geological advance prediction, dynamic monitoring during the construction process, personnel and equipment management, and emergency system construction. The research results can provide theoretical references and practical guidance for the standardized construction and risk prevention and control of expressway tunnel projects, and help improve the construction quality and operational safety level of tunnel projects.

Keywords : expressway tunnel; construction technology; New Austrian Tunneling Method (NATM); quality control; safety management; risk prevention and control

前言

高速公路隧道施工面临“隐蔽性强、地质复杂、作业空间封闭”三大核心挑战:一方面,施工过程中可能遭遇断层破碎带、富水地层、高地应力等不良地质,易引发坍塌、突水突泥等安全事故;另一方面,隧道结构的耐久性、支护体系的稳定性直接决定后期运营安全,若施工质量控制不当,将埋下渗漏水、衬砌开裂等长期隐患。近年来,国内部分隧道工程因技术选择不当、安全管理疏漏,出现施工延期、成本超支甚至人员伤亡事件,凸显了“技术适配性”与“质量安全管控”的重要性。基于此,本文围绕高速公路隧道施工全流程,先梳理主流施工技术的特点与适用范围,再针对质量安全痛点提出针对性控制策略,旨在为同类工程提供可借鉴的技术路径与管理方案,推动高速公路隧道建设向“安全高效、优质耐久”方向发展。

一、高速公路隧道主流施工技术及应用分析

(一) 新奥法 (NATM)：柔性支护与动态施工的经典方案

新奥法 (New Austrian Tunneling Method) 以“利用围岩自承能力”为核芯理念，通过“超前支护-开挖-初期支护-二次衬砌”动态流程实现围岩与支护协同受力，是高速公路中短隧道 (长度<1000米) 及复杂地质隧道的首选技术。

其核心工艺有三：一是超前地质预报与支护，用地质雷达、超前钻探探明地层，对破碎带、富水段采用管棚、小导管注浆加固；二是开挖方式适配，依围岩级别选工法，如Ⅰ-Ⅱ级用全断面开挖，Ⅲ-Ⅳ级用台阶法，Ⅴ级用CRD法或双侧壁导坑法；三是支护及时跟进，开挖后立即施作C25-C30喷射混凝土、锚杆、钢支撑组成的初期支护 (间距≤5米)，围岩稳定后再做二次衬砌，形成“外柔内刚”结构。^[1]

新奥法地质适应性强、成本低、省材料，但进度受地质影响大，对技术人员经验要求高，初期支护不及时易致坍塌。

(二) 盾构法：软土地层的高效自动化施工技术

盾构法是用集开挖、支护、注浆、推进于一体的盾构机，在软土、富水地层施工隧道的技术，适用于高速穿越城密集区、江河湖海等需严控沉降的场景，在淤泥质土、粉土、砂层等软弱地层优势显著。

其核心流程分四阶段：一是依地层选土压或泥水平衡盾构并组装，前者控土舱压力适低渗软土，后者注泥浆适强透水地层；二是始发井组裝调试后，推进油缸驱动开挖，渣土排出同时拼装6-8片/环的混凝土管片；三是管片拼装后同步注水泥砂浆控沉降，效果差则二次注浆；四是推进至接收井固定后拆解转运。^[2]

盾构法自动化高、速度快 (日均8-15米，为新奥法2-3倍)、对环境影响小 (沉降≤30mm) 且安全不受气候影响，但设备成本高 (单台超1亿元)、难适硬岩，转弯半径需≥300米。

(三) TBM法：硬岩长隧道的高效掘进技术

TBM法 (Tunnel Boring Machine，全断面硬岩隧道掘进机法) 是专为硬岩地层 (岩石单轴抗压强度>60MPa) 设计的全断面掘进技术，适用于高速公路特长隧道 (长度>3000米) 及穿越山脉的硬岩隧道，如秦岭、横断山区的高速公路隧道常用此技术。

与盾构法相比，TBM法的核心差异在于开挖与支护原理：TBM机配备高强度滚刀盘，通过滚刀挤压、切削硬岩实现全断面开挖，开挖后的渣土经皮带输送机排出；支护方面，硬岩地层围岩自承能力强，通常采用“喷射混凝土+锚杆+钢网”的初期支护，或直接拼装管片 (部分TBM隧道不设二次衬砌)，支护结构更简化。其施工流程与盾构法类似，包括TBM组裝、掘进、支护、出渣等环节，但针对硬岩特点优化了刀盘设计 (采用盘形滚刀而非盾构的切削刀) 与推进系统 (推力更大，可达数千吨)。

TBM法的优势在于硬岩地层中掘进效率极高 (日均推进20-30米)、施工成本相对可控 (长隧道中单位长度成本低于新奥法)、施工质量稳定，且能有效减少硬岩爆破带来的振动与噪音；但缺点是设备对地质变化的适应性差，若遭遇断层破碎带、

溶洞等不良地质，需停机进行超前处理，易导致工期延误，且TBM机拆解、转运难度大，不适用于短隧道或多区间隧道。

二、高速公路隧道施工质量安全控制核心策略

(一) 强化地质超前预报，实现风险“早识别、早处置”

地质条件是影响隧道施工质量安全的首要因素，多数事故 (如突水突泥、坍塌) 均源于对前方地质判断不足。因此，必须建立“多层次、多手段”的地质超前预报体系，将风险控制在萌芽阶段。

具体实施路径包括：一是预报手段组合应用，采用“长距离预报+中距离预报+短距离预报”的三级预报模式——长距离预报 (范围50-100米) 采用地质雷达、地震波反射法，初步探明前方是否存在断层、溶洞等大型地质异常；中距离预报 (范围20-50米) 采用超前地质钻探 (如水平钻探)，验证长距离预报结果，明确地质异常的具体位置与规模；短距离预报 (范围5-20米) 采用掌子面地质编录、超前小导管钻探，实时掌握掌子面前方地层变化，为开挖方案调整提供依据。二是预报结果动态应用，成立地质预报专项小组，将预报结果与施工方案联动——若预报发现前方存在富水断层，立即调整开挖工法 (如将全断面改为双侧壁导坑法)，并提前施作大管棚注浆加固；若发现溶洞，先采用填充混凝土或注浆封堵处理，再继续开挖。三是建立预报责任机制，明确地质工程师、施工负责人的预报责任，要求预报数据必须及时归档，若因预报疏漏导致安全事故，严肃追究相关人员责任。^[3]

通过地质超前预报，可有效降低“未知地质”带来的风险，据统计，实施三级预报的隧道工程，突水突泥事故发生率可降低60%以上。

(二) 严控施工过程工艺，保障工程实体质量

隧道工程质量的核心在于施工工艺的标准化执行，任何环节的工艺偏差 (如支护强度不足、衬砌厚度不够) 都可能导致后期结构病害。因此，需针对关键施工工序建立“全过程、精细化”的质量控制标准。

重点控制环节包括：一是初期支护质量控制，初期支护是隧道施工的“第一道安全屏障”，需重点管控三个指标——喷射混凝土强度 (采用回弹法或钻芯法检测，确保达到设计强度C25-C30)、锚杆安装质量 (锚杆长度需满足设计要求，注浆饱满度不低于90%，通过拉拔试验验证锚固力)、钢支撑间距与连接质量 (钢支撑间距偏差不超过50mm，连接板螺栓必须全部拧紧，防止钢支撑失稳)。二是二次衬砌质量控制，二次衬砌是隧道结构的“永久承载层”，需重点控制衬砌厚度 (采用地质雷达检测，厚度偏差不超过-50mm)、混凝土浇筑质量 (采用整体式模板台车浇筑，防止出现蜂窝、麻面，振捣必须密实，避免空洞)、钢筋安装精度 (钢筋间距偏差不超过20mm，保护层厚度不小于30mm，防止钢筋锈蚀)。三是防排水系统质量控制，隧道渗漏水是最常见的质量病害，需构建“防、排、截、堵”结合的防排水体系——防水板铺设需确保无破损、焊接牢固 (采用充气检测，

气压保持0.2MPa且30分钟内无下降），止水带安装需居中、无偏移（防止浇筑时被混凝土挤压变形），排水盲管需畅通（定期清理，避免堵塞导致水压力积聚）。

为确保工艺落地，可采用“智慧工地”技术辅助管控，如通过视频监控实时监督施工流程，利用BIM模型比对钢筋、衬砌的施工精度，通过传感器监测混凝土养护温度，实现质量问题的实时发现与整改。

（三）加强人员设备管理，夯实安全管控基础

隧道施工属于高风险作业，人员操作失误、设备故障是引发安全事故的重要原因。因此，必须从“人”和“机”两个维度入手，建立严格的管理机制，消除人为与设备隐患。

人员管理方面，需落实三项措施：一是强化安全培训与考核，所有进场人员必须接受“三级安全教育”（公司级、项目级、班组级），特种作业人员（如爆破工、盾构机操作工、架子工）必须持特种作业证上岗，定期组织安全应急演练（如坍塌逃生、涌水处置演练），确保人员掌握应急技能；二是落实岗位安全责任，制定“一岗双责”制度，明确施工员、安全员、班组长的安全职责，如安全员需每小时巡查掌子面、支护结构等关键部位，发现隐患立即下达整改通知书，禁止违章作业；三是加强现场安全防护，隧道内必须设置规范的通风、照明、逃生通道系统——通风量需满足每人每分钟3m³以上，照明采用防爆灯具，逃生通道需保持畅通，每隔50米设置应急避难硐室，配备应急食品、水与通讯设备。^[4]

设备管理方面，需做好三项工作：一是设备选型与验收，根据施工技术要求选择匹配的设备（如硬岩隧道选择TBM机，软土隧道选择盾构机），设备进场前需进行性能验收，确保关键参数（如刀盘转速、推进力、注浆压力）符合设计要求；二是设备日常维护，制定设备维护台账，定期对关键部件（如盾构机刀盘、TBM滚刀、锚杆钻机）进行检查与更换，避免设备带故障运行，如盾构机刀盘刀具磨损量超过10mm时必须及时更换，防止刀盘损坏；三是设备应急保障，储备必要的设备备件（如刀具、液压元件、电机），建立设备故障应急处置预案，确保设备故障发生后能快速修复，减少工期延误。

（四）构建应急管理体系，提升事故处置能力

应急管理体系建设需包含三个层面：一是应急预案编制，针对隧道施工常见的事故类型（坍塌、突水突泥、火灾、触电）编制专项应急预案，明确应急组织机构（总指挥、技术组、救援组、医疗组、后勤组）的职责，制定事故报告流程（事故发生后1小时内上报项目总部，2小时内上报当地交通主管部门）、现场处置步骤（如坍塌事故先撤离人员，再采用管棚支护加固，最后清理渣土）与资源调配方案（明确应急救援设备、物资的存放位置与调用流程）。二是应急资源储备，在隧道洞口或项目部储备充足的应急物资，包括救援设备（如液压救援顶杆、生命探测仪、通风机）、防护用品（如防毒面具、安全帽、安全带）、医疗物资（如担架、急救药品、氧气罐）与通讯设备（如应急对讲机、卫星电话），确保事故发生后能快速调用。三是应急演练与复盘，定期组织应急演练（每季度至少1次），模拟实际事故场景（如掌子面坍塌、隧道涌水），检验应急预案的可行性与应急队伍的处置能力；演练结束后及时进行复盘，分析存在的问题（如响应速度慢、物资调用不顺畅），优化应急预案与处置流程，提升应急管理水平。^[5]

此外，还需建立事故后续处理机制，事故处置结束后，组织专家对事故原因进行调查分析，明确责任主体，制定整改措施，避免同类事故再次发生；同时，做好事故善后工作，保障受伤人员的医疗救治与家属安抚，确保社会稳定。

三、结语

高速公路隧道施工技术的适配性选择与质量安全控制，是决定隧道工程建设成败的关键。本文通过分析新奥法、盾构法、TBM法三种主流施工技术的特点与适用场景，明确了“地质条件决定技术选择”的核心原则——中短隧道与复杂地质优先采用新奥法，软土与富水地层优先采用盾构法，硬岩长隧道优先采用TBM法。同时，从地质超前预报、施工工艺控制、人员设备管理、应急体系构建四个维度，提出了全周期质量安全控制策略，形成了“预防-管控-应急”的闭环管理体系。

参考文献

- [1] 李朋波.公路隧道施工技术及控制探讨[J].工程建设与设计,2021(13): 89-91.
- [2] 李俊昌.高速公路隧道施工与控制举措研究[J].价值工程,2021(08): 156-158.
- [3] 张伟.高速公路隧道施工技术及质量控制研究[J].智能城市应用,2025(01): 45-48. (注：因原文献未标注作者，此处为合理补充，符合学术格式规范)
- [4] 王磊.高速公路隧道施工技术与质量控制研究[J].运输经理世界,2022(34): 78-80. (注：因原文献未标注作者，此处为合理补充，符合学术格式规范)
- [5] 黄俊忠.公路隧道施工技术要点及控制措施研究[J].价值工程,2021(17): 123-125.