

新奥法隧道二次衬砌施工工艺优化及质量控制研究

张烁腾

中交一公局第五工程有限公司 北京 102477

摘要：随着我国交通基础设施建设的快速发展，山岭隧道工程日益增多，新奥法（NATM）作为当前主流的隧道施工方法，因其“动态设计、动态施工”的理念，在复杂地质条件下展现出显著优势。二次衬砌作为新奥法隧道结构体系中的重要组成部分，不仅承担着永久支护功能，还对隧道结构安全、耐久性及运营舒适性具有决定性影响。然而，在实际施工过程中，二次衬砌常因施工工艺不合理、质量控制措施不到位等问题，导致混凝土开裂、渗漏、强度不足等质量缺陷，严重威胁隧道结构安全。本文在系统梳理新奥法二次衬砌施工流程的基础上，深入分析当前施工中存在的主要问题，结合工程实践与理论研究，提出针对性的施工工艺优化策略，并构建全过程质量控制体系。研究结果表明，通过优化模板台车定位精度、改进混凝土配合比设计、强化施工缝处理、引入智能监测技术等措施，可显著提升二次衬砌施工质量与结构性能，为类似工程提供理论支撑与实践指导。

关键词：新奥法；二次衬砌；施工工艺优化；质量控制；模板台车；混凝土性能

引言

近年来，随着“交通强国”战略的深入推进，我国在高速公路、高速铁路、城市轨道交通等领域建设了大量山岭隧道。新奥法（New Austrian Tunneling Method, NATM）因其强调围岩自承能力、采用柔性支护、实施信息化施工等核心理念，已成为复杂地质条件下隧道施工的首选方法。在新奥法体系中，隧道支护结构通常由初期支护和二次衬砌组成。初期支护主要承担施工阶段围岩变形控制任务，而二次衬砌则作为永久性结构，承担长期荷载、防水、防火及美化等功能^[1]。然而，在实际工程中，二次衬砌施工常被视为“收尾工程”，对其技术要求和质量控制重视不足，导致诸如混凝土开裂、背后空洞、渗漏水、强度不达标等问题频发。这些问题不仅影响隧道使用功能，更可能引发结构安全隐患，增加后期维护成本。因此，系统研究新奥法隧道二次衬砌施工工艺优化及质量控制方法，具有重要的工程价值与现实意义。

1 新奥法二次衬砌的功能与施工流程

1.1 二次衬砌的功能定位

新奥法下，二次衬砌是永久结构，功能多样。与初期支护构成复合体系，围岩变形稳定后承担地层压力，提升承载与稳定性；是隧道防水关键屏障，与防水板等协同阻隔地下水；保护初期支护免受环境侵蚀，延长隧道寿命；平整内表面利于运营设施安装，改善行车环境，提升运营舒适性与安全性。

1.2 二次衬砌典型施工流程

新奥法隧道二次衬砌施工连续性强。先通过监测设

备确认围岩及初期支护变形速率在规范允许范围（每日不超0.2毫米）；接着清理修整初期支护表面，喷射混凝土找平；依次铺土工布缓冲层与防水板，确保焊接牢固；按要求绑扎钢筋、安装预埋件；推进模板台车并精确定位；泵送混凝土，自两侧边墙对称分层浇筑，每层不超50厘米，边浇边振捣，注重拱顶密实性；混凝土达脱模强度后收模养护；最后用多种手段检测衬砌质量，形成验收报告。

2 二次衬砌施工中存在的主要问题

2.1 施工时机把握不当

在实际工程中，二次衬砌施作时机的选择往往受到工期压力与经验判断的双重影响。部分施工单位为加快进度，在围岩变形尚未稳定时便急于施作二次衬砌，导致衬砌结构过早承受围岩持续变形所产生的附加应力，极易引发环向或纵向裂缝，严重时甚至造成结构破坏。相反，若施作时间过晚，则初期支护可能因长期暴露于潮湿、腐蚀性环境中而出现强度衰减、钢筋锈蚀等问题，不仅增加基面处理难度，还可能削弱复合支护体系的整体性能。因此，缺乏科学、量化的判据来指导施作时机，是当前二次衬砌施工中普遍存在的技术短板。

2.2 模板台车定位精度不足

模板台车作为二次衬砌成型的核心设备，其定位精度直接决定了衬砌结构的几何尺寸与净空质量。然而，在实际操作中，由于测量误差、台车变形、轨道不平或操作人员经验不足等原因，常出现中线偏移、高程偏差或断面轮廓不符等问题。这些问题不仅可能导致隧道净空不足，影响后续机电设备安装，还可能造成混凝土超耗或

局部厚度不足,进而影响结构承载能力与耐久性^[2]。尤其在曲线段或变断面段,若缺乏高精度导向系统支持,定位偏差更易放大,施工质量难以保障。

2.3 混凝土施工质量缺陷

混凝土作为二次衬砌的主体材料,其施工质量直接关系到结构性能。在泵送过程中,若配合比设计不合理,如水胶比偏高或外加剂掺量不当,易导致混凝土离析、泌水,影响匀质性。浇筑过程中,由于拱顶部位空间受限,振捣棒难以有效插入,加之混凝土自重作用下粗骨料下沉,常在拱顶形成空洞、蜂窝等缺陷。此外,环向施工缝若未进行充分凿毛处理或界面清理不彻底,新旧混凝土粘结力不足,易成为渗漏通道。而养护环节若被忽视,混凝土在早期失水过快,将产生显著的塑性收缩与干缩裂缝,削弱结构整体性与防水性能。

2.4 防水系统失效

防水系统是保障隧道长期无渗漏的关键。然而,在施工过程中,防水板铺设常因基面处理不到位而被尖锐物刺破,或因焊接温度、速度控制不当导致焊缝不牢。部分施工人员对双焊缝气压检测重视不足,未能及时发现并修补微小破损点。更严重的是,若初期支护表面存在较大凹陷或空腔,防水板在混凝土浇筑压力下可能被压入空腔,形成“假贴”,使地下水绕过防水层直接接触衬砌混凝土,造成局部渗漏甚至涌水。此类问题往往在运营阶段才暴露,修复难度大、成本高。

2.5 质量检测手段滞后

传统质量检测方法多依赖钻孔取芯、回弹测试等局部、破坏性手段,不仅效率低、覆盖面有限,且难以反映衬砌整体质量状况。例如,钻芯仅能反映单点强度与厚度,无法判断背后是否存在大面积空洞;而目视检查又难以发现内部缺陷。这种“事后抽检、被动整改”的模式,无法实现对施工过程的实时监控与动态调整,导致质量问题往往在成型后才被发现,返工成本高昂,且影响整体工期。

3 二次衬砌施工工艺优化策略

3.1 科学确定二次衬砌施作时机

为避免因施作时机不当引发结构问题,应摒弃经验主义,建立基于监测数据与数值模拟的综合判据体系。具体而言,可采用“变形速率+累计变形量+时间”三重控制标准:当围岩周边位移速率连续3天不超过0.15毫米/天,且累计变形量达到预测总变形量的80%以上,同时初期支护完成时间不少于30天(软弱围岩可适当延长),方可考虑施作二次衬砌。此外,可结合FLAC3D等数值模拟软件,对围岩长期变形趋势进行预测,辅助判断最佳

施作窗口。这种多维度、量化的方法,能够有效平衡施工安全与进度需求。

3.2 提升模板台车智能化水平

为提高模板台车定位精度,应推广激光导向与自动调平技术。通过在台车上安装激光接收靶,并与全站仪或GNSS系统联动,可实时获取台车三维坐标,自动调整液压支腿,将定位误差控制在±5毫米以内。同时,优化台车结构设计,如采用分块式模板以适应变断面,增设拱顶排气孔以排出空气,配置附着式高频振捣器以增强混凝土密实度^[3]。更进一步,可将设计BIM模型导入施工管理系统,通过点云扫描获取实际开挖轮廓,与设计断面进行比对,提前预警潜在超欠挖区域,指导台车微调,实现“数字驱动施工”。

3.3 优化混凝土配合比与浇筑工艺

混凝土性能的优化是提升衬砌质量的根本。建议采用低水胶比(0.35~0.40)、高流动性的自密实混凝土(SCC),通过掺加粉煤灰、矿粉等矿物掺合料及高效聚羧酸减水剂,在保证强度的同时提升工作性与耐久性。浇筑过程中,应严格控制分层厚度(≤50厘米)与两侧高差(≤50厘米),采用对称、连续泵送方式,防止模板受力不均。针对拱顶密实难题,可在模板顶部预埋注浆管,待脱模后7天内对雷达检测发现的疑似空洞区域注入微膨胀水泥浆,实现“先浇后补”的双重保障。

3.4 强化施工缝与变形缝处理

施工缝是衬砌结构的薄弱环节,必须采取多重措施加以强化。环向施工缝应同时设置中埋式橡胶止水带与外贴式止水带,形成双重防水屏障。在新旧混凝土接茬处,需彻底凿除浮浆,露出新鲜骨料,并用高压水冲洗干净,随后涂刷水泥基渗透结晶型界面剂,增强粘结力。对于设置变形缝的区段,应采用可卸式止水带,并在缝内预留足够变形空间,避免因温度或沉降变形导致止水带撕裂或混凝土开裂。

3.5 完善防水层施工质量控制

防水层施工应贯穿“预防为主、过程控制”的原则。铺设前,必须对初期支护基面进行严格验收,确保无尖锐凸起、无明水、无松动物。防水板采用双焊缝热熔焊接工艺,焊缝宽度不小于10毫米,并100%进行气压检测,确保密封性。铺设完成后,应采用电火花检漏仪对全线进行扫描,及时发现并修补针孔或微裂纹。此外,可在防水板与初期支护之间布设排水盲管,引导局部渗水有序排出,避免水压积聚。

4 二次衬砌全过程质量控制体系构建

4.1 事前控制:设计与准备阶段

质量控制应始于设计源头。在施工前,需组织设计、施工、监理三方进行深度交底,明确二次衬砌的结构参数、材料性能指标、施工技术要点及验收标准。在此基础上,编制具有可操作性的专项施工方案,涵盖模板台车定位、混凝土浇筑顺序、应急预案等内容。同时,对进场的水泥、骨料、外加剂、防水材料等进行严格复检,确保其符合国家及行业规范要求,杜绝不合格材料用于工程实体。

4.2 事中控制:施工过程监控

施工过程是质量控制的核心环节。应严格执行“三检制”(自检、互检、专检),对钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等关键工序实行旁站监督。同时,积极应用智能监测技术:在衬砌内部布设光纤光栅传感器,实时采集应力应变数据;利用三维激光扫描仪快速获取断面轮廓,与设计模型比对;通过AI图像识别系统自动分析混凝土表面裂缝、蜂窝等缺陷^[4]。所有施工过程均应形成完整的文字与影像记录,建立可追溯的质量档案。

4.3 事后控制:验收与评估

施工完成后,应开展系统性质量评估。采用地质雷达对全线衬砌进行无损扫描,全面检测厚度、背后空洞、钢筋分布等情况,覆盖率达100%。按规范频率进行回弹、超声及钻芯试验,验证混凝土强度与均匀性。在雨季或人工注水条件下进行渗漏检测,对发现的渗点及时采用注浆或表面封堵处理。最后,建立包含合格率、优良率、缺陷率等指标的质量评价体系,用于总结经验、持续改进后续施工。

5 工程应用案例分析

5.1 工程概况

某高速公路隧道全长4.2公里,穿越Ⅳ~Ⅴ级围岩,地质条件复杂,局部存在断层破碎带。工程采用新奥法施工,二次衬砌设计厚度为45厘米,采用C35防水混凝土,抗渗等级为P8。

5.2 优化措施实施

在该工程中,项目团队全面应用本文提出的优化策略。采用配备激光导向系统的智能模板台车,定位精度控制在 ± 3 毫米以内;混凝土配合比优化为水泥:粉煤灰:矿粉:砂:碎石:水:减水剂 = 1:0.2:0.15:1.8:2.6:0.38:0.02,显著提升了流动性

和抗裂性;在拱顶每3米预埋一根注浆管,脱模后7天内完成补浆作业;全线采用地质雷达进行100%覆盖检测,并结合BIM平台进行质量数据管理。

5.3 实施效果

实施结果表明,优化措施成效显著。衬砌平均厚度偏差控制在+10毫米至-5毫米之间,完全满足规范要求;地质雷达检测显示,背后空洞率由传统工艺的8%大幅降至0.5%以下;隧道运营一年内未发现任何渗漏点;混凝土28天抗压强度平均值达38.6兆帕,强度合格率100%。该案例充分验证了所提工艺优化与质量控制体系的可行性与有效性。

6 结语

本文围绕新奥法隧道二次衬砌施工工艺优化与质量控制展开系统研究,得出以下结论:二次衬砌作为隧道永久结构,其功能远超装饰层面,必须从结构安全、防水耐久、运营保障等多维度予以高度重视;施工时机、模板定位、混凝土性能与防水系统是影响质量的四大关键因素;通过引入智能化装备、优化材料设计、强化过程监控,可显著提升施工质量;构建覆盖“事前—事中—事后”的全过程质量控制体系,是实现高质量建造的根本路径。

未来研究可进一步探索数字孪生技术在二次衬砌施工中的深度应用,实现物理施工与虚拟模型的实时交互与动态优化;同时,推动绿色低碳理念落地,研发基于工业固废(如钢渣、建筑垃圾再生骨料)的高性能衬砌混凝土;此外,结合大数据与机器学习算法,构建质量风险智能预警模型,实现从“被动整改”向“主动防控”的转变,助力我国隧道工程迈向精品化、智能化、可持续化发展新阶段。

参考文献

- [1]马磊.新奥法施工技术在隧道工程中的应用[J].运输经理世界,2023,(31):77-79.
- [2]魏云.隧道工程中新奥法施工技术应用研究[J].交通科技与管理,2024,5(21):70-72.
- [3]康昭建.新奥法在高速公路隧道施工中的应用[J].交通科技与管理,2024,5(13):76-78.
- [4]乔跃林.公路隧道建设中的新奥法施工工艺研究[J].交通世界,2024,(11):158-160.