

高速公路桥梁隧道施工中的施工质量控制与优化

孙恒

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

DOI:10.61369/ME.2025040027

摘 要： 高速公路桥梁与隧道工程作为交通基础设施的关键组成部分，其施工质量直接关系到行车安全、工程寿命及社会经济效益。本文围绕高速公路桥梁隧道施工中的质量控制与优化展开研究，首先分析桥梁与隧道施工的特点及质量控制的重要性，随后从施工准备、关键工序、安全管理、环境适配四个维度探讨质量控制要点，并结合工程案例说明具体应用；接着从技术、管理、材料、协同机制四个层面提出优化策略，最后总结质量控制与优化的实践经验及发展方向，为同类工程提供参考。

关 键 词： 高速公路；桥梁施工；隧道施工；质量控制；优化策略

Construction Quality Control and Optimization in the Construction of Expressway Bridges and Tunnels

Sun Heng

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311300

Abstract： As a key component of transportation infrastructure, the construction quality of expressway Bridges and tunnels directly affects driving safety, project lifespan and social and economic benefits. This paper focuses on the research of quality control and optimization in the construction of expressway Bridges and tunnels. Firstly, it analyzes the characteristics of bridge and tunnel construction and the importance of quality control. Then, it discusses the key points of quality control from four dimensions: construction preparation, key procedures, safety management, and environmental adaptation. It also explains the specific application by combining engineering cases. Then, optimization strategies are proposed from four aspects: technology, management, materials, and collaborative mechanisms. Finally, the practical experience and development direction of quality control and optimization are summarized to provide references for similar projects.

Keywords： expressway; bridge construction; tunnel construction; quality control; optimization strategy

引言

随着我国高速公路网络的不断完善，桥梁与隧道工程在复杂地形区域的应用日益广泛。桥梁工程需跨越江河、峡谷等障碍，隧道工程则需穿越山体、不良地质带，二者施工环境复杂、技术难度高、风险因素多，质量控制难度远超普通路基工程。近年来，因施工质量问题引发的桥梁坍塌、隧道渗漏等事故时有发生，如某高速公路隧道因初期支护强度不足导致塌方，造成严重经济损失和工期延误；某跨江大桥因承台混凝土裂缝处理不当，通车后出现钢筋锈蚀，被迫进行大规模维修。因此，加强桥梁隧道施工质量控制，优化施工工艺与管理模式，成为保障工程安全、提升工程品质的核心任务。本文结合实际案例，系统分析高速公路桥梁隧道施工中的质量控制要点与优化路径，为工程实践提供理论与技术支撑。

一、高速公路桥梁隧道施工的特点及质量控制的重要性

（一）桥梁施工的主要特点

桥梁施工具有结构复杂性、环境依赖性强、高空作业多等显著特点。以斜拉桥为例，其索塔与斜拉索安装需严格控制垂直度与张力平衡，某跨江斜拉桥施工中因索塔倾斜偏差超3mm，导致

后续梁体拼装出现应力集中，被迫返工调整，额外投入成本200余万元。跨河桥梁基础施工受水文条件影响大，某高速公路特大桥在钻孔灌注桩施工期间遭遇暴雨，河水上涨导致钻机倾覆，延误工期15天，直接经济损失达500万元。

（二）隧道施工的主要特点

隧道施工面临地质条件不确定性、空间封闭性等问题。某山区隧道施工至K12+300处时，突然遭遇富水断层，每小时涌水量

达500m³，初期支护被冲毁，被迫采用管棚注浆超前支护方案抢险，额外投入1200万元。隧道内部作业空间狭小，某黄土隧道因通风不足，混凝土养护环境湿度超标，导致二次衬砌出现裂缝，后期采用压力注浆修补，增加成本80万元。^[1]

（三）质量控制的重要性

质量控制直接关系到结构安全与工程寿命。某高速公路隧道通车3年后，因二次衬砌厚度不足，在车辆荷载反复作用下出现拱顶掉块，被迫封闭交通进行加固，直接经济损失超5000万元。而某跨海大桥通过优化混凝土配合比，使承台混凝土抗氯离子渗透能力提升40%，预计使用寿命延长至100年，显著降低了全生命周期成本。^[2]

二、高速公路桥梁隧道施工质量控制要点

（一）施工准备阶段的质量控制

施工准备是质量控制的基础，需重点做好以下工作：

勘察设计交底：施工单位需联合设计、勘察单位核实地质资料，明确关键工序技术要求。例如，某桥梁工程施工前，通过现场钻探发现原设计桩基持力层存在厚度约1.5m的软弱夹层，经三方会商调整桩长增加5m，避免了后期桩基沉降超标。某隧道施工前，对比勘察报告与现场超前地质预报结果，发现存在一条未探明的断层破碎带，及时调整开挖工法，从全断面开挖改为CRD工法，降低了施工风险。

材料设备检验：严格核查进场材料的质量证明文件，对钢材、水泥等进行抽样送检。某隧道施工中，抽检发现锚杆屈服强度低于设计标准（235MPa），实测仅210MPa，立即清退该批次材料（约5000根），避免了支护强度不足的风险。某桥梁项目部对进场的钢绞线进行力学性能试验，发现3批钢绞线伸长率不达标，及时更换供应商，确保了预应力施工质量。^[3]

施工现场布置：合理规划施工便道、材料堆场、拌合站位置。某预制梁场因拌合站距离梁体浇筑区过远（运输距离1.5km），导致混凝土运输时间过长（超过2小时），初凝前未完成浇筑，造成3片梁体报废，后将拌合站迁至距离0.5km处，解决了该问题。

（二）桥梁施工关键工序的质量控制

桥梁施工需重点控制以下关键环节：

基础施工：钻孔灌注桩需控制孔深、孔径及混凝土灌注质量。某大桥桩基施工中，采用超声波检测发现3根桩存在断桩缺陷，经分析为灌注时导管埋深不足（小于2m）所致，随后采用高压注浆补强处理，单桩处理成本增加5万元。某桥梁承台施工时，因基坑排水不彻底，混凝土浇筑时混入泥水，导致承台底部出现蜂窝麻面，后期采用环氧树脂修补，确保了结构耐久性。

梁体施工：悬臂浇筑需控制挂篮变形与节段标高。某高速公路T梁预制中，发现预应力孔道定位偏差超5mm，立即调整定位钢筋间距，避免了钢绞线张拉时的应力损失。某连续梁桥合龙段施工时，因未严格控制混凝土浇筑温度（昼夜温差15℃），导致合龙段出现纵向裂缝，后采用覆盖保温的温控措施重新浇筑，确

保了梁体受力均匀。

桥面系施工：防水层施工需保证粘结牢固，伸缩缝安装需与桥面平顺。某大桥桥面防水层施工时，因基层清理不彻底（存在浮渣），导致防水层起皮脱落，返工处理面积达1000m²。某桥梁伸缩缝安装时，因高程控制不严，与桥面存在3mm高差，通车后出现跳车现象，重新调整后才解决，保障了行车舒适性与安全性。^[4]

（三）隧道施工关键工序的质量控制

隧道施工质量控制的核心工序包括：

开挖作业：根据围岩等级选择开挖方法，控制循环进尺。某Ⅳ级围岩隧道采用台阶法施工时，因一次开挖进尺达3m（规范要求≤2m），导致掌子面失稳，采用立即喷射混凝土封闭掌子面+增设锚杆的措施处理，额外投入30万元。某Ⅴ级围岩隧道采用CD法开挖，因左右导洞开挖步距过大（超过5m），导致中隔墙变形，后调整步距至3m内，有效控制了围岩变形。

初期支护：确保喷射混凝土强度与厚度，锚杆锚固力达标。某隧道初期支护质量检测中，发现10%的锚杆锚固力不足设计值80%，通过重新钻孔注浆加固，使锚固力全部达标。某隧道钢拱架安装时，因连接螺栓未拧紧，导致拱架整体刚度不足，围岩变形增大，后对所有螺栓进行复拧，扭矩达300N·m，保障了支护结构的稳定性。

防水层施工：防水层搭接宽度不小于10cm，确保无破损。某隧道二次衬砌施工前，检查发现防水层在拱顶处存在3处破损，采用热熔焊接修补后再进行衬砌浇筑，有效避免了渗漏水问题。某隧道变形缝处止水带安装偏移，导致接缝处渗水，后采用注浆+止水条修补，彻底解决了渗漏隐患。

二次衬砌施工：控制混凝土配合比、浇筑顺序及养护条件。某隧道二次衬砌施工时，因混凝土坍落度控制不严（波动范围±30mm），导致拱顶出现气泡、蜂窝，后将坍落度控制在±20mm内，改善了混凝土外观质量。某隧道衬砌养护时，因洞内湿度不足（低于80%），混凝土强度增长缓慢，7天强度仅达设计值60%，采用喷雾增湿后，28天强度满足要求。^[5]

（四）施工安全管理对质量的保障作用

安全管理是质量控制的前提，二者相辅相成：

风险预警机制：对高风险工序建立实时监测系统。某隧道施工中，通过围岩变形监测发现K8+100处日变形量达15mm（预警值10mm），立即停止开挖并采取加强支护措施（增加钢拱架密度），防止了塌方事故对质量的破坏。某桥梁挂篮施工时，监测发现吊带应力超设计值10%，及时更换吊带，避免了挂篮坠落风险，保障了梁体施工质量。

人员培训考核：特种作业人员需持证上岗，定期开展技能培训。某桥梁项目部因张拉工操作不当导致预应力损失超10%，随后组织全员进行张拉工艺培训，考核合格后方可上岗，后续预应力施工合格率提升至98%。某隧道爆破作业中，因爆破工未按参数操作，导致超挖量达50cm（规范允许15cm），增加了初期支护成本，后加强培训与现场监督，超挖量控制在允许范围内。

应急处置能力：制定突发事件应急预案并定期演练。某高速公路隧道突水事故中，施工单位依据预案迅速启动排水系统（每

小时排水量800m³)，同时加固初期支护，24小时内控制险情，减少了对施工质量的影响。某桥梁施工中遭遇台风，项目部按预案提前加固模板与材料堆场，避免了设备损坏与材料受潮，保证了后续施工质量。

三、高速公路桥梁隧道施工质量的优化策略

（一）技术层面的优化

新型材料应用：推广高性能材料提升结构质量。某桥梁工程采用 C80 自密实混凝土浇筑索塔，其流动性达700mm，无需振捣即可填充密实，抗压强度比传统混凝土提高30%，且28天弹性模量达4.5×10⁴MPa。某隧道采用改性沥青防水板，其耐穿刺性能提升50%，避免了施工中被尖锐物刺破的风险，减少了后期渗漏水隐患。

施工工艺改进：优化传统工艺减少质量缺陷。某隧道采用“三台阶七步开挖法”替代全断面开挖，使围岩变形量减少40%。某桥梁预制梁场引入智能张拉系统，预应力张拉误差控制在±1%以内，远超人工操作的±5%标准。某隧道初期支护采用湿喷混凝土工艺，与干喷相比，混凝土强度提高20%，粉尘浓度降低80%，改善了施工环境与支护质量。

数字化技术赋能：利用 BIM 技术进行虚拟施工交底，某跨河大桥通过 BIM 模型模拟挂篮行走轨迹，提前发现梁体与桥墩的碰撞风险，调整施工顺序后避免了返工。某隧道应用三维激光扫描技术，对初期支护轮廓进行实时检测，使超挖量控制在10cm以内，节约混凝土用量15%。^[6]

（二）管理层面的优化

精细化管理模式：建立“班组自检+技术员复检+监理验收”的三级质控体系。某隧道项目部将初期支护厚度、锚杆间距等指标纳入班组考核，与绩效奖金挂钩，使质量合格率从85%提升至98%。某桥梁工程实行“首件认可制”，每道工序首件施工合格后才全面铺开，避免了大规模质量问题。

信息化监测系统：应用物联网技术实时监控关键指标。某高速公路桥梁安装智能传感器，实时传输墩台沉降、梁体应力数据，当沉降量超5mm时自动预警，便于及时采取调整措施。某隧道建立“围岩变形-支护应力-渗水量”联动监测系统，实现多

参数协同分析，提高风险预判能力。

第三方检测介入：引入独立第三方机构进行质量评估。某项目委托第三方对隧道二次衬砌进行无损检测，发现3处隐蔽缺陷（内部空洞），及时督促施工单位修复，避免了运营期隐患。某桥梁工程邀请第三方对预应力张拉过程进行全程监督，确保张拉工艺符合规范要求。

（三）材料层面的优化

材料采购管控：建立合格供应商名录，实行材料溯源管理。某桥梁工程对钢筋供应商进行实地考察，选择具有央企资质的厂家，确保钢筋力学性能稳定，进场抽检合格率达100%。某隧道对防水材料供应商要求提供5年以上工程应用案例，避免使用新型但不成熟的产品，降低了质量风险。

材料储存养护：根据材料特性制定储存方案。某项目部将水泥储存在密闭罐中，安装湿度监测仪，当湿度超70%时自动启动除湿设备，避免水泥受潮结块影响强度。某桥梁对钢绞线采用防雨棚覆盖储存，下方垫设方木（离地30cm），防止锈蚀，保证了材料性能。

配合比动态调整：根据现场条件优化混凝土配合比。某隧道施工中，因洞内温度较低（10℃），将混凝土粉煤灰掺量从20%调整为15%，并添加早强剂，确保28天强度达标。某桥梁在夏季高温施工时，混凝土中加入缓凝剂，将初凝时间从4小时延长至6小时，避免了施工冷缝。

四、结语

高速公路桥梁隧道施工的质量控制与优化是一项系统性工程，需结合工程特点、地质条件及技术要求，从施工准备到竣工交付全过程落实管控措施。本文通过分析桥梁隧道施工的特点，明确了基础施工、初期支护等关键工序的质量控制要点，并从技术、管理、材料、环境四个维度提出优化策略，相关案例验证了措施的有效性。未来，随着智能化、绿色化技术的发展，桥梁隧道施工质量控制将向数字化监测、自动化管控方向升级，进一步提升工程质量与安全水平。工程实践中，需因地制宜选择管控方法，实现质量、安全、效益的有机统一，为交通基础设施高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1]何宗儒.高速公路桥隧施工质量控制分析[J].北方建筑,2025,10(3):42-45.
- [2]高立广.基于BIM技术桥梁施工全过程优化研究[J].交通科技与管理,2024,5(12):103-105.
- [3]赵久敏,张昕琪.预应力技术在道路桥梁施工中的应用探讨[J].建设机械技术与管理,2024,37(03):135-137.
- [4]汪波,喻炜,刘锦超,等.交通/水工隧道中基于预应力锚固系统的及时主动支护理念及其技术实现[J].中国公路学报,2020,33(12):118-129.
- [5]陶志刚,任树林,王丰年,等.高地应力软岩隧道围岩大变形NPR锚索控制方法研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(增2):82-92.
- [6]王志坚.高速铁路隧道机械化修建技术创新与智能化建造展望——以郑万高速铁路湖北段为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(3):339-348.