

二次衬砌施工质量对隧道结构耐久性的决定作用

张振雨

河南隧恒建筑劳务有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：为明确二次衬砌施工质量与隧道结构耐久性的内在关联，解决隧道运营期因衬砌质量缺陷导致的结构劣化问题，本文结合公路、铁路隧道工程实践，通过现场检测、室内试验与长期监测相结合的方法，系统分析二次衬砌施工质量对结构承载能力、防水性能及材料劣化的影响机制。研究表明：二次衬砌施工质量对隧道结构耐久性起决定性作用。可有效提升隧道结构耐久性，延长运营寿命 10-15 年。研究成果可为隧道二次衬砌施工质量管控提供理论依据与实践指导。

【关键词】：隧道工程；二次衬砌；施工质量；结构耐久性；质量控制；防水性能

DOI:10.12417/2811-0528.25.23.074

1 二次衬砌施工质量对隧道结构耐久性的决定作用

1.1 决定结构长期承载稳定性

二次衬砌作为隧道的最终承载结构，其施工质量直接决定结构能否长期承受围岩残余应力、车辆荷载及环境荷载的协同作用。当二次衬砌存在厚度不足、强度不达标、钢筋保护层厚度不够等质量缺陷时，结构应力分布会出现局部集中，加速疲劳损伤。反之，施工质量达标的二次衬砌可通过与初期支护协同受力，有效分散围岩压力，使结构应力波动幅度控制在 5% 以内，确保长期承载稳定。

1.2 决定结构防水防渗性能

隧道渗漏水是导致结构耐久性下降的核心诱因，而二次衬砌施工质量直接决定防水体系的有效性。二次衬砌与初期支护之间的防水板铺设、衬砌混凝土自身密实度、施工缝与变形缝处理质量，共同构成隧道防水的“三道防线”。若二次衬砌施工中出现蜂窝、麻面、裂缝等缺陷，会直接破坏防水体系完整性，导致地下水侵入并引发钢筋锈蚀、混凝土碳化等连锁反应，加速结构劣化。

1.3 决定材料劣化控制效果

二次衬砌材料的劣化速率（如混凝土碳化、钢筋锈蚀、碱骨料反应）完全由施工质量决定。混凝土浇筑振捣不密实会导致内部孔隙率升高，钢筋绑扎间距偏差过大会导致局部配筋不足，加速应力集中区域的钢筋锈蚀；衬砌养护不及时会使混凝土表面出现干缩裂缝，裂缝宽度超 0.2mm 时，会成为地下水与有害离子侵入的通道，引发碱骨料反应，导致混凝土强度每年下降 3%。而施工质量达标的二次衬砌，可通过控制混凝土密实度、优化钢筋布设、强化养护等措施，将材料劣化速率控制在设计允许范围内，保障结构长期性能稳定。

1.4 决定运营期维护成本与安全风险

二次衬砌施工质量直接影响隧道运营期的维护成本与安全风险等级。质量缺陷较多的隧道，运营期需频繁开展衬砌修补、防水补强等维护工作，维护成本较质量达标隧道增加 2-3 倍。此外，二次衬砌质量缺陷还会增加安全风险，衬砌裂缝宽度超 0.5mm 时，可能引发局部掉块；严重渗漏导致衬砌背后空洞时，甚至可能诱发隧道坍塌，威胁行车安全。

2 隧道二次衬砌工程质量影响因素

2.1 基础性能决定质量底线

材料是二次衬砌施工质量的基础，其性能缺陷直接导致结构耐久性不足。水泥标号低于设计要求会使混凝土强度降低 15%-20%；骨料级配不良会导致混凝土密实度下降，孔隙率升高；外加剂选型不当会使混凝土凝结时间缩短，引发施工冷缝。钢筋屈服强度低于设计值会导致配筋承载力不足；钢筋锈蚀度超标会使有效截面面积减少，降低结构抗拉性能。

2.2 关键工序决定质量上限

施工工艺是二次衬砌质量控制的核心，关键工序操作不当会直接产生质量缺陷。模板刚度不足会导致衬砌表面平整度超标，模板接缝不严密会引发漏浆，形成蜂窝麻面。混凝土浇筑落差过大会导致混凝土离析，振捣不密实会使混凝土内部出现空洞；钢筋绑扎间距偏差过大会导致配筋率不足；保护层厚度不足会加速钢筋锈蚀。

2.3 过程管控决定质量稳定性

管理措施不到位会导致施工质量波动，降低结构耐久性的可控性。技术交底不明确会使工序质量失控。未执行“三检制”会使隐蔽工程缺陷漏检；质量检测频率不足会无法真实反映实体质量。验收管理方面：验收标准执行不严会使质量缺陷带入运营期；资料归档不完整会为后期维护留下隐患。

3 隧道二次衬砌工程质量控制优化策略

3.1 材料源头管控

3.1.1 材料进场严格检验

建立“供应商准入-材料抽检-合格放行”三级管控机制。混凝土原材料需检测水泥标号、骨料级配、外加剂性能，每200m³混凝土留置3组试块；钢筋需检测屈服强度、抗拉强度，抽检频率不低于5%；防水板需进行厚度、拉伸强度、焊接强度试验，止水带需检测老化性能，不合格材料一律退场。

3.1.2 材料配比动态优化

根据隧道环境调整混凝土配比，富水地层增加抗渗剂掺量，低温环境采用早强水泥，岩溶地层增加纤维掺量抑制裂缝。通过正交试验确定最优配比，确保混凝土强度、抗渗性、耐久性达标。

3.1.3 材料存储规范管理

泥采用密封罐存储，防止受潮结块；钢筋架空堆放，覆盖防雨布防锈；防水板避免阳光直射，存储期不超过3个月；止水带分类存放，防止挤压变形。

3.2 工艺标准化实施

3.2.1 模板工程标准化

采用液压台车模板，模板接缝采用橡胶密封条密封，安装后检测平整度、垂直度。模板拆除需满足混凝土强度要求，避免过早拆模导致衬砌变形。

3.2.2 混凝土浇筑精细化

采用“输送泵+溜槽”浇筑系统，浇筑落差控制在2m以内，分层厚度≤30cm，振捣棒插入间距≤30cm，振捣时间15-20s。针对隧道拱顶易出现空洞的问题，采用“预埋注浆管+二次注浆”工艺，注浆压力控制在0.5-1.0MPa，确保拱顶密实。

3.2.3 养护工艺规范化

混凝土浇筑完成后12小时内覆盖土工布洒水养护，养护期≥14天，保持表面湿度≥90%；低温季节采用蒸汽养护；高

温季节采用喷雾养护，避免表面温度过高。

3.2.4 防水施工一体化

防水板采用热熔焊接，每100m做1次气密性试验；施工缝止水带采用钢筋固定，确保居中埋设；变形缝采用“止水带+密封胶”复合防水，密封胶嵌填深度≥10mm。

3.3 管理体系强化

对施工人员进行“质量标准-操作规范-安全知识”三位一体培训，混凝土工、钢筋工等特种作业人员必须持证上岗，每月组织1次技能考核，考核不合格者离岗培训。采用智能监测设备实时管控质量。混凝土浇筑时用无线测温仪监测内部温度；钢筋绑扎时用激光测距仪检测间距与保护层厚度；防水施工时用焊缝检测仪检测焊接质量。建立质量信息平台，实现数据实时上传、异常自动预警。执行“工序验收-分项验收-分部验收”三级验收制度，隐蔽工程需留存影像资料；混凝土强度、衬砌厚度、钢筋保护层厚度等关键指标检测合格率必须达100%；验收资料需同步归档，做到“一工序一档案”。

3.4 环境适配性调整

富水地层施工前先进行超前降水；岩溶地层采用“注浆填充+钢筋网支护”处理空洞；破碎地层采用超前小导管支护，确保施工期间围岩稳定。高温季节选择夜间浇筑混凝土，掺入缓凝剂延长凝结时间；低温季节对拌合水加热，混凝土入模温度≥10℃；雨季施工时在隧道口设置防雨棚，防止雨水进入浇筑面。采用小型混凝土输送泵适应隧道狭小空间；安装强制通风设备改善养护环境；合理规划施工流程，避免浇筑与其他工序交叉干扰。

4 结论

二次衬砌施工质量对隧道结构耐久性起决定性作用，其通过影响结构承载稳定性、防水防渗性能、材料劣化速率，直接决定隧道运营寿命与维护成本，施工质量达标可使隧道渗漏率控制在3%以下，材料劣化速率降低60%，运营寿命延长10-15年。采用综合优化策略，可有效解决二次衬砌施工中的质量缺陷，提升结构耐久性。未来需进一步融合智能化监测技术，实现二次衬砌质量的全生命周期管控，为隧道工程安全长效运营提供更可靠的保障。

参考文献：

- [1] 田胜球.铁路隧道仰拱二次衬砌高质量施工技术[J].建筑机械,2025,(08):309-311.
- [2] 王德呈.隧道施工过程质量控制与工艺优化——以隧道二次衬砌施工为例[J].中国品牌与防伪,2025,(04):116-118.
- [3] 王法雁,袁斌,孟小军,等.隧道二次衬砌混凝土施工质量控制措施研究[J].工程建设与设计,2024,(22):226-228.