

# 高速公路隧道桥梁加固技术和施工工艺分析

谢星明

云南腾陇高速公路有限责任公司 云南瑞丽 678600

**摘要:** 高速公路隧道桥梁因多种因素常出现结构病害,如裂缝、钢筋锈蚀、变形过大等。本文分析其病害成因,包括设计施工问题与环境侵蚀作用;阐述加固技术原理分类,如强度恢复、刚度提升和耐久性增强原理;介绍加固关键技术要点,涉及材料性能、计算设计、施工质量控制;还详细分析了增大截面、粘贴纤维复合材料、体外预应力等加固施工工艺。通过全面研究,为保障高速公路隧道桥梁安全运营提供理论与实践指导,助力延长其使用寿命。

**关键词:** 高速公路;隧道桥梁;加固技术;施工工艺

## 一、高速公路隧道桥梁结构病害类型与成因分析

### (一) 结构病害主要类型

**混凝土结构裂缝:** 混凝土作为隧道桥梁主要建筑材料,常因多种因素产生裂缝。如温度收缩裂缝,在混凝土浇筑后硬化过程中,水化热释放导致内外温差大,加之外界气温变化,使混凝土热胀冷缩受约束而开裂;还有因荷载作用产生的弯曲裂缝、剪切裂缝等,尤其在桥梁梁体跨中底部或支座附近易出现此类受力裂缝,影响结构承载力与耐久性,水分渗透加速钢筋锈蚀。**钢筋锈蚀与损伤:** 隧道桥梁处于潮湿甚至腐蚀性环境(如沿海或工业污染区),钢筋保护层厚度不足或碳化至钢筋表面时,钢筋极易发生锈蚀。锈蚀产物体积膨胀使混凝土保护层沿钢筋方向产生顺筋裂缝,削弱钢筋与混凝土粘结力,降低结构承载能力,严重时可能导致结构破坏失效。**结构变形过大:** 包括桥梁梁体下挠、桥墩倾斜等。长期超载交通、基础不均匀沉降是常见原因。例如山区高速公路桥梁,因地基处理不当或山体滑坡等因素引发基础沉降差异,致使桥墩受力失衡倾斜,上部梁体随之变形,改变结构内力分布,影响行车舒适性与安全性。

### (二) 病害成因深度剖析

**设计与施工因素:** 部分早期设计未充分考虑未来交通增长与复杂环境影响,如荷载标准取值偏低、耐久性设计不足。施工环节质量控制不严,混凝土浇筑振捣不密实有蜂窝麻面缺陷,钢筋加工安装不符合规范要求,这些初始质量瑕疵为后期病害滋生埋下隐患。**环境侵蚀作用:** 除化学腐蚀外,冻融循环对北方寒冷地区隧道桥梁破坏显著。冬季水分渗入混凝土孔隙结冰膨胀,春季融化收缩,反复作用使混凝土疏松剥落;酸雨侵蚀使混凝土中碱性物质中和,破坏钢筋钝化膜,加剧钢筋锈蚀

风险,多因素耦合加速结构劣化进程。

## 二、高速公路隧道桥梁加固技术原理与分类

### (一) 加固基本原理

**强度恢复原理:** 通过在结构薄弱部位增设补强材料或构件,如粘贴钢板、外包钢等,提高结构截面抗弯、抗剪承载能力,弥补因材料劣化、截面损伤导致的强度损失,使结构能重新满足设计荷载等级要求,确保行车安全。**刚度提升原理:** 采用增大截面法、增设支撑体系等方式增加结构整体刚度,减小结构变形。例如在连续梁桥中合理设置体外预应力索或型钢支撑,限制梁体下挠与裂缝开展,改善结构受力性能,延长结构疲劳寿命。**耐久性增强原理:** 利用防护涂层、阴极保护(针对钢结构)等手段阻止外界环境侵蚀介质接触结构材料,延缓钢筋锈蚀、混凝土老化速度。如环氧涂层包裹钢筋或在混凝土表面涂刷防水防腐涂料,形成物理阻隔屏障,提升结构耐久性。

### (二) 加固技术分类

#### 1. 直接加固法

**增大截面加固法:** 在梁、柱等构件外表面浇筑新混凝土并配筋,增大构件截面尺寸与配筋率,从而提高承载能力。此方法适用于原结构截面尺寸偏小、承载力不足且有足够空间实施加固的情况,如老旧简支梁桥的梁体加固。例如在某城市立交桥改造中,对下部V型桥墩采用增大截面法,外包C30混凝土并植入钢筋,经检测桥墩承载力提升约30%,有效改善了桥梁通行能力。**粘贴纤维复合材料加固法:** 以树脂类胶粘剂将碳纤维布(CFRP)、玻璃纤维布(GFRP)等纤维材料粘贴于结构表面协同受力。CFRP具有高强度、高模量、耐腐蚀、自重轻等优点,广泛应用于梁、板抗弯加固。如某高速公路特大桥箱梁底板出现裂缝与承载力不足问题,粘贴

多层CFRP布后,经荷载试验验证,梁体抗弯刚度提高40%,裂缝宽度明显减小,有效抑制了裂缝进一步发展。外包钢加固法:以型钢(角钢、槽钢、工字钢等)外包在结构四角或两角并灌注胶粘剂使之共同工作,显著提高结构承载力与延性。常用于柱、梁加固,尤其对轴压比超标的柱加固效果突出。在某工业厂房排架柱加固工程中,采用湿式外包钢法,角钢与缀板焊接后灌注环氧砂浆,柱承载力较加固前提升约50%,同时改善了结构的抗震性能。

### 2. 间接加固法

体外预应力加固法:通过在结构外部设置预应力筋并对梁体施加反向荷载,抵消部分外荷载产生的内力,减小结构应力水平与变形。常用于大跨度连续梁桥、桁架桥加固,可有效改善结构使用性能。如某铁路旧桥加固项目,采用体外预应力索加固技术,张拉预应力索后主梁下挠值减少60mm,梁体裂缝宽度控制在允许范围内,成功提升了桥梁运营安全性。增设支点加固法:在梁、板结构下方增设中间支承结构(如钢柱、墩柱等),减小结构跨度与内力。适用于大跨度结构因承载力不足或变形过大需改善受力状况的情形。例如某大型体育馆屋盖钢桁架结构加固改造,在桁架跨中增设刚性支点,使桁架杆件内力大幅降低,结构整体稳定性显著增强。

## 三、高速公路隧道桥梁加固关键技术要点

### (一) 加固材料性能要求与选择

#### 1. 纤维复合材料

CFRP等纤维材料需具备高抗拉强度(一般碳纤布抗拉强度标准值 $\geq 3400\text{MPa}$ )、高弹性模量(约 $230\text{GPa}$ )、良好的耐久性与耐腐蚀性。选用时应根据结构加固需求、环境条件综合考量,如潮湿环境下优先选耐腐蚀性能好的GFRP,对承载力要求极高部位采用高强度I级碳纤布,且要确保材料来源正规、质量稳定,附有权威检测报告。

#### 2. 胶粘剂

胶粘剂是粘贴类加固材料与结构粘结的关键媒介,应满足高强度(钢-钢拉伸抗剪强度 $\geq 15\text{MPa}$ )、良好的韧性与耐老化性、适应一定环境温度范围(一般 $-5\text{℃} \sim 40\text{℃}$ 可良好固化)。不同品牌胶粘剂性能差异大,施工前需进行适配性试验,检测其与被加固材料、纤维材料的粘结强度、长期耐环境性能等指标,合格后方可批量使用。

#### 3. 钢材

外包钢加固用钢材宜选用Q235、Q345级钢材,材质应符合国家标准,无明显缺陷与锈蚀。钢材表面预处理

至关重要,除锈等级需达Sa2.5级,确保与混凝土粘牢牢固;焊接钢材应采用低氢焊条,控制焊接质量,防止焊接应力与变形对加固效果产生不利影响。

### (二) 结构加固计算与设计要点

#### 1. 现状评估与模型建立

加固前需对隧道桥梁进行全面检测评估,确定结构实际承载能力、损伤状况与病害程度。采用专业有限元软件(如Midas Civil、ANSYS等)建立精细化三维模型,模拟结构受力行为,依据检测结果修正模型参数,精准分析结构薄弱部位与内力分布规律,为加固设计提供可靠依据。例如在某拱桥加固设计中,通过现场检测获取拱肋混凝土强度、钢筋锈蚀率等数据输入模型,准确计算出拱顶、拱脚等关键截面内力超限情况,针对性制定加固方案。

#### 2. 加固方案比选与优化

根据结构特点与病害类型制定多套加固方案,从技术可行性(施工难度、工艺成熟度)、经济合理性(材料成本、施工费用)、耐久性(预期使用寿命、后期维护成本)等方面进行综合比选。运用层次分析法、模糊综合评价法等决策方法量化各方案优劣,确定最优方案;同时对选定方案进行细节优化,如调整加固材料布置、优化节点构造等,提升加固效果与经济效益。如某斜拉桥比选增大截面与体外预应力加固方案时,综合考虑施工期交通影响、造价及长期效益,最终选定体外预应力加固为主、局部增大截面为辅的优化方案。

### (三) 施工过程质量控制要点

#### 1. 表面处理

混凝土表面需凿除松散层、油污、浮浆等杂质,露出坚实骨料,保证粘结面平整度与清洁度。对于严重缺陷部位应进行修补打磨,如采用环氧砂浆填补坑洼不平处;钢材表面除锈要彻底,采用喷砂、抛丸除锈方式确保除锈等级达标,处理后及时涂刷防锈漆防止二次锈蚀,为后续加固施工创造良好条件。

#### 2. 材料粘贴与安装

粘贴纤维复合材料:严格控制胶粘剂涂刷厚度(一般为 $2\sim 3\text{mm}$ )、均匀度,避免产生气泡与漏刷现象;纤维布粘贴要平整顺直,沿纤维方向搭接长度不小于 $100\text{mm}$ ,按设计要求缠绕锚固,滚压驱赶气泡确保粘结密实。例如在某桥梁底板CFRP布粘贴施工中,采用专用滚筒从中间向两侧滚压,压力控制在 $0.5\text{MPa}$ ,保证纤维布与混凝土紧密贴合无空鼓。外包钢施工:型钢下料尺寸精度要高,焊接前进行预制拼装检查尺寸偏差;焊接过程控

制焊接电流、电压、速度等参数，分层分段焊接防止焊接变形过大；灌注胶粘剂时要振捣密实，确保灌注饱满无空洞，养生期间保持环境湿度、温度适宜，促进胶粘剂固化。如某框架柱外包钢加固焊接时，采用CO<sub>2</sub>气体保护焊，焊接电流200~250A，焊速20~30cm/min，焊后静置养护7天以上。

### 3. 预应力施加与监测

体外预应力加固施工中，预应力筋张拉要严格按设计程序操作，控制张拉应力、伸长值在允许误差范围内（张拉应力误差 $\leq \pm 5\%$ ，伸长值误差 $\leq \pm 6\%$ ）；张拉过程中实时监测梁体变形、裂缝发展情况，如有异常立即停止张拉查明原因；预应力筋锚固后要做好防护防锈措施，定期检查锚具松动情况。如某连续梁桥体外预应力加固张拉时，安装应变传感器、位移计实时监测梁体关键截面应变与挠度变化，张拉完成后锁定预应力筋并灌注防护蜡。

## 四、高速公路隧道桥梁加固施工工艺分析

### （一）增大截面加固施工工艺

#### 1. 施工准备

材料采购与检验：按设计要求采购钢筋、水泥、砂石等原材料，进场后抽样送检，确保材料质量合格；对新增混凝土配合比进行试验设计，确定最佳配合比满足强度、耐久性要求。

基面处理：对原构件表面凿毛，清除松散混凝土、浮渣等杂质，露出坚实骨料；对较大裂缝进行灌浆封闭处理，保证粘结面粗糙度与清洁度。模板制作与安装：根据加固部位尺寸定制钢模板或木模板，模板接缝严密不漏浆；安装模板时设置对拉螺栓、支撑系统确保模板稳固，预留振捣口便于混凝土浇筑振捣。

#### 2. 钢筋绑扎与安装

植筋施工：按设计间距、深度钻孔植入钢筋，清孔后注入植筋胶粘剂插入钢筋并固化养护；采用非破损检测方法抽检植筋锚固拉拔强度是否达标。钢筋绑扎：在原构件表面绑扎新增钢筋，注意与原钢筋连接牢固、间距均匀；设置钢筋保护层垫块保证厚度符合设计要求。钢筋安装：将绑扎好的钢筋骨架整体吊装或分片安装在模板内，校正位置后固定牢固。

#### 3. 混凝土浇筑与养护

混凝土浇筑：采用分层浇筑、振捣密实方法，每层浇筑厚度不大于500mm；振捣时避免触碰钢筋与预埋件，确保混凝土填充模板各个角落。养护管理：浇筑完成后及时覆盖塑料薄膜、草帘保湿养护；前7天保持湿润养护环境，此后定期洒水养护不少于28天；养护期间控制环境

温度在5℃~35℃，避免暴晒、骤冷骤热影响混凝土性能。

### （二）粘贴纤维复合材料加固施工工艺

#### 1. 施工准备

材料裁剪与下料：根据设计尺寸在工厂或现场裁剪纤维布、纤维板，保证尺寸精度；配套胶粘剂提前搅拌均匀静置备用。基层清理：用角磨机、砂纸打磨混凝土表面去除疏松层、污物，直至露出坚实基层；用压缩空气吹净表面粉尘，保持干燥清洁。

#### 2. 粘贴施工

底胶涂刷：均匀涂刷底层胶粘剂于混凝土表面，厚度约2mm，不得有漏刷、流淌现象；晾置10~15分钟至指触干燥后进行下一步。纤维材料粘贴：将纤维布或板按设计位置敷设，从一端向另一端逐渐铺贴并用滚筒压实赶平，排除气泡；多层粘贴时重复涂刷浸渍胶、铺贴纤维材料步骤，控制总厚度与搭接长度符合要求。面胶涂刷：粘贴完成后在纤维材料表面均匀涂刷面层胶粘剂进行防护密封，厚度约2~3mm。

#### 3. 固化养护与质量检查

固化养护：常温下自然固化养护7天以上，期间保持环境通风良好、温湿度相对稳定；必要时可采用加热设备辅助升温加速固化（升温速率 $\leq 10^\circ\text{C}/\text{h}$ ）。质量检查：固化后采用目视检查纤维布有无空鼓、翘曲现象；用小锤轻敲检测粘结密实度；按批次抽样进行正拉粘结强度试验，不合格部位及时返工处理。

## 结语

总之，高速公路隧道桥梁加固技术是确保桥梁安全运营的关键环节。通过对病害成因的深入剖析，明确了加固方向；加固技术原理及分类为方案选择提供依据；关键技术要点把控保障加固效果；施工工艺分析有助于提高施工质量。未来，应持续关注新材料、新技术应用，不断优化加固方法，加强施工过程管理，以更好地应对日益复杂的桥梁病害问题，保障我国高速公路隧道桥梁的安全、稳定运行，为交通运输事业保驾护航。

## 参考文献

- [1] 林哲宇. 高速公路隧道与桥梁加固技术和施工工艺研究[J]. 工程建设与设计, 2024, (12): 177-179.
- [2] 吴建华. 高速公路隧道桥梁加固技术和施工工艺分析[J]. 运输经理世界, 2024, (03): 76-78.
- [3] 肖勇. 高速公路隧道桥梁加固技术和施工工艺研究[J]. 中华建设, 2023, (09): 137-139.