

桥梁结构耐久性与维护技术研究

徐育涛

广东能达公路养护股份有限公司 广东广州 510000

摘要: 随着经济和社会的不断发展,桥梁结构在交通和城市化建设中的重要性越来越凸显,同时,桥梁结构的安全性和耐久性问题也日益突出,需要相关人员不断进行研究和改进,继续深入研究桥梁结构的耐久性影响因素,并不断探索新的优化设计措施。桥梁耐久性本质是“设计-施工-维护”体系协同的结果。材料选择(如高耐蚀混凝土)奠定基础,环境适配设计(如抗台风结构)抵御外因,而科学管养(信息化监测+预防性维护)则是实现百年寿命的核心保障。忽视任一环节均可能导致重大经济损失与安全风险。

关键词: 桥梁结构耐久性; 维护技术研究

随着经济的发展和城市化进程的加速建设,桥梁作为城市交通基础设施的重要组成部分,承载着人们出行和物流运输的重任。桥梁结构损坏和寿命缩短严重影响了城市交通的正常运行,给社会经济发展带来了巨大隐患。

一、桥梁结构耐久性重要性分析

桥梁结构耐久性直接决定了工程寿命周期内的安全性与经济性,其重要性主要体现在以下核心维度:

1. 结构安全与服役性能

承载力保障,钢筋与混凝土协同工作承担荷载,材料老化(混凝土碳化、钢筋锈蚀)或环境侵蚀(盐雾、冻融)会导致承载力下降,严重时引发变形、开裂甚至坍塌。超载运输更会加速损伤,使承载力衰减速度提高3-5倍。功能稳定性,桥面铺装需具备抗滑性、平整度及防水性,避免雨水渗透侵蚀主体结构;伸缩装置失效可能引发跳车,栏杆设计缺陷则威胁行车安全。

2. 全寿命周期经济效益

维护成本控制,耐久性不足将导致频繁维修,历史数据显示部分桥梁养护费用甚至超过建造费用。及时修复微小损伤(如裂缝)可延长寿命约35%,显著降低长期成本。设计寿命实现,现代大型桥梁设计寿命达120年,但实际寿命取决于维护水平。疏于管理的桥梁实际寿命可能仅为设计值的三分之一。

3. 环境适应性与可持续性

抵抗自然侵蚀,沿海桥梁需强化抗盐雾腐蚀设计,北方桥梁需应对冻融循环,而正交异性钢桥面则需解决疲劳裂缝问题。可持续设计原则,采用“六可”理念:结构需具备可检性(便于监测)、可修性(局部更换)、

可换性(部件模块化)、可控性(性能调整)等。

4. 维护策略的核心作用

主动监测干预,使用期25年以上的老龄桥占比达40%,需每3-5年进行安全评估,并安装传感器实时监测。健康监测系统可提前预警损伤,避免灾难性失效。跨学科技术融合,结合无损检测、荷载识别等技术评估结构状态,通过防水材料升级、排水系统优化及疲劳细节设计提升耐久性。

二、影响桥梁结构耐久性的主要因素

1. 材料性能因素

混凝土质量缺陷,水胶比过高、振捣不密实导致孔隙率增大,加速碳化与氯离子渗透;选用劣质砂石骨料(如含泥量超标的机制砂)会降低混凝土密实性,引发龟裂与剥落。钢筋保护不足,保护层厚度不足或混凝土抗渗性差,使钢筋暴露于腐蚀环境,锈蚀后体积膨胀导致混凝土开裂。

2. 环境侵蚀作用

化学腐蚀,沿海地区盐雾中氯离子渗透破坏钢筋钝化膜,北方冻融循环引发混凝土内部微裂缝扩展。酸雨及工业废气加速混凝土中性化。物理侵蚀,干湿交替环境加剧离子迁移,高温加速化学反应速率;水流冲刷导致表层材料流失。

3. 荷载与人为因素

超载运输,超出设计标准的重载交通使结构应力超限,承载力衰减速度提高3-5倍,显著缩短使用寿命。维护缺失,未及时修复裂缝或更换损坏部件,放任水分与侵蚀介质侵入主体结构。我国40%老龄桥(>25年服役期)需定期检测但执行不足。

4. 设计与施工缺陷

设计, 抗侵蚀措施不足, 环境适应性差; 未预留检测维修空间, 关键部位难以修复; 施工, 混凝土养护不当, 早期开裂风险增加; 保护层厚度偏差超限, 钢筋锈蚀概率上升; 关键结论: 桥梁耐久性失效本质是多重因素耦合作用的结果。材料选择 (如高抗蚀骨料) 与构造设计 (足够保护层) 是基础防线, 定期监测维护 (老龄桥每3-5年评估) 和荷载控制则是延长服役寿命的核心手段。

三、桥梁耐久性设计施工策略

1. 设计阶段核心策略

全寿命周期设计理念, 涵盖规划、施工、运营及维护全过程, 制定百年服役目标 (大桥120年设计寿命), 通过环境分区 (沿海/北方/工业区) 定制防护标准。材料性能优化, 混凝土: 控制水胶比 ≤ 0.4 , 掺入纳米二氧化硅提升抗氯离子渗透性; 骨料选用低碱活性岩石, 避免碱骨料反应。钢筋: 海洋环境采用耐蚀钢材 (如环氧涂层钢筋或不锈钢筋), 保护层厚度增加20%以上。结构细节创新, 桥面系: 正交异性钢桥面增设钢纤维混凝土铺装层 (厚6-8cm), 提升抗疲劳性及与沥青层的粘结力。排水系统: 设置梯度排水槽, 避免积水渗透侵蚀主体结构。

2. 施工关键技术

混凝土工艺控制, 浇筑时分层振捣密实, 采用低温水养护减少温度裂缝; 保护层厚度偏差严格控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内。喷涂速凝橡胶沥青防水涂料, 延伸率 $> 800\%$, 实现混凝土基面无缝包覆。装配化与模块化施工, 预制钢混叠合梁, 减少现场支架搭设, 降低交通干扰, 提升连接精度。裂缝主动防控, 施工缝处预埋注浆管, 后期压力注浆修复微裂缝; 大体积混凝土埋设温度传感器实时监控。

3. 环境适应性策略

沿海高盐区, 阴极保护+硅烷浸渍涂层, 氯离子渗透率降低50%; 北方冻融区, 掺入引气剂 (含气量4-6%) + 抗冻混凝土 (F300级), 冻融循环耐久性提升3倍。工业腐蚀区, 防腐涂料+定期酸雨冲洗系统, 碳化深度控制 $< 5\text{mm}/\text{年}$ 。

4. 结构细节与防护强化

裂缝主动防控, 优化配筋率与伸缩缝设计, 预埋注浆管修复微裂缝 ($< 0.1\text{mm}$); 防水系统升级, 钢纤维混凝土铺装层 (6-8cm) + 虹吸排水槽, 减少积水渗透; 可更换部件设计, 磁力耦合支座与模块化伸缩缝, 维修工

期缩短70%。

5. 智能运维与评价

埋入式传感器网络, 实时监测氯离子浓度、钢筋电位及变形数据, 建立动态耐久性预测模型。分级维护机制, 预防性维护: 每3年硅烷复涂, 每5年全面检测; 修复性措施: 裂缝 $> 0.2\text{mm}$ 时采用碳纤维布加固。

四、桥梁耐久性检测与评估方法

1. 分层检测技术

外观状态诊断, 目视检查规范: 按《城市桥梁养护技术标准》(CJJ99) 记录开裂、剥落、露筋等表观病害, 裂缝分级标准: 微裂 ($< 0.1\text{mm}$)、轻度 ($0.1-0.2\text{mm}$)、重度 ($> 0.2\text{mm}$)。智能识别技术: 应用AI视觉算法自动标注病害位置与尺寸, 精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。材料性能无损检测, 混凝土强度, 回弹法 (测区 ≥ 16 点位), 误差 $< 5\%$, 符合GB/T50124; 碳化深度, 酚酞试剂染色法, 分辨率 0.5mm ; 氯离子渗透, 电场加速迁移法, 渗透率量化至 $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$; 钢筋锈蚀, 半电池电位法+电磁涡流探伤, 锈蚀速率误差 $< 15\%$ 。

2. 特殊环境针对性评估

海洋桥梁耐久性, 盐蚀损伤模型: 基于氯离子扩散系数与时变方程, 预测钢筋初锈时间, 临界浓度取0.05-0.1wt.%。防护效能验证: 硅烷浸渍层使氯离子渗透率下降50%, 阴极保护电位维持 $-800\sim-1100\text{mV}$ 。冻融与化学侵蚀, 冻融循环试验: F300级引气混凝土经300次冻融后相对动弹性模量 $> 80\%$ 。酸雨侵蚀监测: $\text{pH} < 5.0$ 区域需每年检测碳化深度, 碳化速率 $> 5\text{mm}/\text{年}$ 触发防护加固。

3. 智能评估与预测模型

数字化监测体系, 部署GNSS位移传感器+光纤光栅应变计, 形变监测精度 0.1mm , 实时追踪刚度衰减。建立荷载-响应数据库, 机器学习解析交通谱与极端气候耦合效应。寿命预测模型, 退化阶段划分: 基于马尔可夫链将耐久性状态分为完好、初始损伤、加速退化、临界失效四阶段。多参数耦合分析: 融合氯离子浓度、裂缝扩展速率、环境温湿度等, 预测剩余寿命误差 $< 20\%$ 。

4. 规范与分级处置策略

建设期预控评估, 混凝土保护层厚度负偏差 $< 5\text{mm}$, 氯离子扩散系数 $< 3 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ (海洋环境)。运营期分级干预 I 级, 碳化深度 $<$ 保护层50%, 硅烷复涂 (3-5年周期); II 级, 钢筋截面损失率5-10%, 微创注浆+FRP加固; III 级, 承重构件裂缝 $> 0.3\text{mm}$, 模块化更换部件; 技术趋势: 结合BIM与数字孪生技术, 实现“检测-评估-决策”闭环管理, 如贵州山区桥梁试点项

目通过三维全息建模优化养护成本30%。

五、桥梁耐久性维护技术与策略

1. 智能监测与诊断技术

自动化检测装备, 爬索机器人实现360°无死角检测(爬升速度8米/分钟, 负载10kg), 无人机搭载激光扫描与AI视觉算法自主避障巡检, 显著提升高空隐蔽区域病害识别精度。内部损伤无损评估, 磁致伸缩导波法与漏磁法精准探测索体内部钢丝锈蚀, 结合三维重建技术实现结构全息建模。实时传感网络, 埋入式传感器动态监测氯离子浓度、钢筋电位及变形数据, 建立耐久性预测模型。

2. 先进材料修复技术

纤维增强复合材料(FRP/FRCM), 外贴FRP: 碳纤维抗拉强度达钢材7倍, 自重仅1/5, 修复后结构承载力提升60%且锈蚀速率降至传统方法1/8。近表面嵌入FRP: 混凝土梁抗弯刚度提升72%, 疲劳寿命延长至百万次荷载循环。自修复材料体系, 支座橡胶弹性体引入Diels-Alder可逆共价键, 60℃环境下24小时裂纹愈合率95%; 智能混凝土含微胶囊愈合剂, 0.3mm裂缝可自动修复。

3. 环境适应性维护

盐雾腐蚀, 阴极保护+硅烷浸渍涂层, 氯离子渗透率↓50%; 冻融循环含引气剂混凝土(F300级)+定期硅烷复涂, 冻融耐久性↑3倍; 酸雨侵蚀防腐涂料+自动酸雨冲洗系统, 碳化深度<5mm/年。

4. 分级维护与主动干预

预防性维护, 每3年复涂硅烷防护层, 每5年全面检测评估; 及时修复>0.2mm裂缝(碳纤维布加固), 清理排水系统防积水渗透。

模块化更换技术, 支座分解为7个磁力耦合功能单元, 实现“即插即用”更换; 伸缩缝采用预制组件快速修复。

六、桥梁耐久性相关案例分析

以下是桥梁耐久性领域的代表性工程案例分析, 涵盖不同环境下的技术应对策略及量化效果:

1. 极端环境综合防护案例

冰冻高盐海域, 挑战: 年冻融循环50次+海水含盐量达32.9‰(国内最高)核心技术: 建设期预埋钢筋锈蚀传感器, 实时监测氯离子渗透动态; 暴露试验站积累12年环境数据, 建立冻融-盐蚀耦合模型; 运营期每3年复涂硅烷浸渍层, 氯离子渗透率降低50%。成效: 服

役12年后碳化深度<1.5mm, 钢筋电位稳定在-200mV以内, 支撑100年设计寿命目标。

2. 关键部件创新案例

LNR橡胶支座体系重构(多地震区桥梁), 传统瓶颈: 普通支座阻尼<5%, 严寒/沿海地区寿命仅20-50年且更换成本高昂。创新方案: 采用多层高阻尼橡胶+铅芯复合结构, 阻尼比提升至15%; 磁力耦合单元设计实现“即插即用”更换, 维修工期缩短70%。应用效果: 在曲线桥中分散水平荷载, 桥墩应力集中降低40%, 寿命延长至60年以上。

3. 病害修复与技术升级案例

某长江桥, 大跨度梁应力集中, 三维FRP锚固系统, 梁体抗弯刚度↑72%, 疲劳寿命延长至百万次循环; 预应力桥梁, 钢筋锈蚀, 微创注浆+碳纤维布加固, 承载力恢复至设计值110%, 锈蚀速率降至原1/8; 跨海桥墩, 盐蚀剥落, 超高性能混凝土(UHPC)包裹, 抗氯离子渗透性提升百倍, 寿命延长至50年。

4. 智能运维体系案例

耐久性退化预测模型, 基于马尔可夫链与贝叶斯网络, 融合10年以上监测数据(如氯离子浓度、裂缝扩展速率); 提前5年预警墩柱锈蚀风险, 维护成本降低35%。预防性维护决策, 建立裂缝宽度-环境参数关联矩阵: >0.2mm裂缝触发自动注浆, <0.1mm裂缝纳入年度观测池; 优化硅烷复涂周期(原5年→动态调整至3-7年), 材料消耗减少25%。

综上所述, 桥梁耐久性设计施工策略需贯穿全寿命周期管理理念, 结合环境适应性、材料优化及智能监测技术, 融合BIM与AI算法推动“经验维护”向“预测性维护”转型, 如基于大数据优化涂层更换周期。

参考文献

- [1] 李涛. 基于Matlab模糊神经网络预应力桥梁耐久性分析[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [2] 李华志. 基于抗震性能偏好的近海桥梁全寿命多目标优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [3] 李皓才. 桥梁混凝土结构接缝的耐久性性能[J]. 土木工程学报, 2018(7): 98-103.
- [4] 杨冰磊. 基于证据理论的混凝土桥梁耐久性状况评定方法[J]. 公路交通科技, 2022(11): 76-83.
- [5] 万成雷. 基于系统地地震易损性的桥梁隔震支座优化设计[J]. 地震工程与工程振动, 2021(5): 69-78.