

# 城市桥梁耐久性设计与长期性能监测

孙振阳

河南中平交科研究设计院有限公司 河南 平顶山 467000

**摘要：**城市桥梁作为交通网络核心设施，其长期安全运营与性能稳定直接影响城市交通效率。本文围绕城市桥梁耐久性设计与长期性能监测展开研究，系统分析耐久性设计的理论基础，包括耐久性概念内涵、影响因素及设计原则，进而提出结构优化、材料选择与防护措施三类设计要点与方法。同时探讨长期性能监测的重要性，明确力学性能、材料状态、使用功能三大监测维度，对比传统监测技术与现代传感技术的应用要点，并梳理监测数据采集与传输的具体方案。研究表明，科学的耐久性设计与长期性能监测可保障桥梁安全运营、延长使用寿命，为城市桥梁全寿命周期管理提供技术支撑，对推动城市桥梁建设技术优化具有重要实践意义。

**关键词：**城市桥梁；耐久性设计要点与方法；长期性能监测技术与方法

**引言：**当前部分城市桥梁因耐久性设计不足、缺乏有效长期监测，出现材料劣化、结构损伤等问题，缩短使用寿命并埋下安全隐患。国内外虽在桥梁耐久性与监测领域有相关研究，但在设计与监测的协同衔接、技术落地实用性等方面仍需完善。基于此，本文从理论基础、设计方法、监测内容与技术四个维度展开研究，旨在构建系统的城市桥梁耐久性设计与长期性能监测体系，为解决桥梁运营中的实际问题提供理论与技术参考。

## 1 城市桥梁耐久性设计的理论基础

### 1.1 耐久性的概念与内涵

城市桥梁耐久性是指桥梁在设计使用年限内，在既定的环境条件与荷载作用下，无需过度维护即可保持结构安全稳定、满足使用功能需求的能力。其内涵涵盖结构安全与使用功能两大核心维度：（1）结构安全层面，要求桥梁主体结构具备抵抗材料劣化、结构损伤的能力，避免因耐久性不足引发坍塌、断裂等安全事故；（2）使用功能层面，需保障桥梁在长期运营中维持正常的通行能力，如桥面平整性、抗渗性等指标符合设计标准，同时减少因耐久性问题导致的功能退化，如桥面破损、排水不畅等情况，确保桥梁持续发挥交通枢纽作用。

### 1.2 影响耐久性的因素分析

影响城市桥梁耐久性的因素主要包括以下材料性能、环境因素与荷载作用三类。（1）材料性能是基础，若混凝土强度不足、抗渗抗冻性差，或钢筋耐腐蚀性能低，易导致结构早期劣化；（2）环境因素是外部诱因，城市中工业废气、酸雨、高温高湿等环境，会加速材料腐蚀与老化，如氯离子侵入引发钢筋锈蚀；（3）荷载作用是关键驱动因素，长期超负荷通行、车辆冲击荷载等，会加剧结构疲劳损伤，破坏材料内部结构，缩短桥

梁耐久性寿命。

### 1.3 耐久性设计的基本原则

城市桥梁耐久性设计要遵循以下安全性、适用性与经济性三大原则。（1）安全性原则是核心，要求设计方案能抵御各类不利因素，保障结构在设计年限内的安全稳定；（2）适用性原则强调设计需满足桥梁的使用功能需求，确保桥梁在运营过程中能持续发挥交通作用，避免因耐久性问题导致功能失效；（3）经济性原则则要求在保障安全与适用的前提下，合理控制设计与后期维护成本，实现桥梁全寿命周期内的资源优化配置，平衡长期效益与短期投入<sup>[1]</sup>。

## 2 城市桥梁耐久性设计要点与方法

### 2.1 结构设计优化

结构设计优化要从以下结构选型与构造措施两方面入手，为桥梁耐久性奠定基础。（1）结构选型时，结合城市桥梁的通行需求、所处环境条件，优先选择受力明确、传力路径简洁的结构形式，减少应力集中区域，降低结构因受力不均引发的局部损伤风险；同时，避免采用过于复杂的节点构造，简化施工流程，减少施工误差对结构耐久性的影响。（2）构造措施设计要重点关注易受损部位的细节处理。在构件连接部位，需合理设置过渡构造，增强连接节点的刚度与稳定性，避免因荷载传递不畅导致的局部开裂；对于受弯、受剪较大的构件，需优化截面尺寸与配筋方式，确保钢筋布置均匀，满足结构受力需求的同时，减少钢筋密集区域的混凝土浇筑难度，避免因振捣不密实形成的内部孔隙。此外芭合理设置排水构造，在桥面、支座垫石等部位设计顺畅的排水路径，避免雨水积聚引发的材料腐蚀；同时考虑温度变化对结构的影响，合理设置伸缩缝与沉降缝，减少温

度应力与沉降差导致的结构裂缝。

## 2.2 材料选择与应用

材料选择围绕提升桥梁耐久性展开,优先选用性能稳定、抗劣化能力强的材料,具体如下:(1)高性能混凝土是城市桥梁的核心材料之一,选择时需关注其强度、抗渗性、抗冻性与抗氯离子渗透性指标,根据桥梁所处环境(如干湿交替、氯离子环境)确定混凝土的强度等级与抗裂性能参数,确保混凝土在长期使用中不易出现裂缝与渗透问题;同时,可通过添加矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣粉)优化混凝土的微观结构,提升其抗腐蚀能力。(2)耐候钢适用于腐蚀环境较严重的城市桥梁部位,选择时需依据桥梁所处区域的腐蚀等级,确定耐候钢的牌号与耐候性能指标,确保其在自然环境中能形成稳定的氧化保护膜,减少锈蚀速度;在应用过程中,需注意耐候钢的焊接工艺,选择匹配的焊接材料,控制焊接过程中的温度与冷却速度,避免焊接接头部位出现性能劣化。(3)对于桥梁的钢筋材料,选用高强度、高韧性且耐腐蚀的钢筋,如环氧树脂涂层钢筋、不锈钢钢筋等,根据构件的受力需求与所处环境确定钢筋的直径、强度等级,确保钢筋在混凝土结构中能长期发挥受力作用,避免因锈蚀导致的结构承载力下降。

## 2.3 防护措施设计

(1)桥面防水设计要构建多道防水体系,首先需在桥面铺装下层设置防水卷材或防水涂料,选择时需考虑材料的耐候性、粘结性与抗裂性,确保防水层能紧密贴合桥面基层,避免雨水渗透;防水卷材的铺设需保证搭接宽度符合设计要求,卷材接缝处采用热熔或粘结剂密封处理,防止渗水;防水涂料需均匀涂刷,确保涂层厚度一致,无漏涂、气泡等缺陷。同时,需在桥面设置排水坡度与排水孔,排水孔的布置密度与孔径需根据桥面面积与降雨量确定,排水孔周边需做好密封处理,避免雨水从排水孔周边渗透至桥面结构内部。(2)混凝土防腐涂层设计需根据混凝土表面所处环境确定涂层类型与厚度,对于暴露在大气中的混凝土构件,可选用丙烯酸树脂、聚氨酯等防腐涂层,涂层施工前需对混凝土表面进行打磨、清理,去除表面的灰尘、油污与疏松层,确保涂层与混凝土表面粘结牢固;对于处于潮湿或腐蚀性环境的构件,需增加涂层厚度或采用多道涂层体系,提升防腐效果。(3)钢筋阻锈剂的应用需根据混凝土结构的类型与所处环境选择合适的阻锈剂种类,如亚硝酸钠类、有机胺类阻锈剂等,阻锈剂的掺量需严格按照设计要求控制,避免因掺量不足影响阻锈效果或掺量过高对混凝土性能产生不利影响;在施工过程中,需确保阻锈

剂与混凝土原材料均匀混合,避免出现局部浓度不均的情况,同时需对添加阻锈剂的混凝土进行性能检测,确保其强度、抗渗性等指标符合设计标准<sup>[2]</sup>。

## 3 城市桥梁长期性能监测的重要性与内容

### 3.1 长期性能监测的重要性

城市桥梁长期性能监测是保障桥梁安全运营、延长使用寿命的关键手段,其重要性体现在以下方面:(1)从安全层面看,桥梁在长期服役中,受环境侵蚀、荷载累积作用,结构易出现隐蔽性损伤,如钢筋锈蚀、内部裂缝等,此类损伤难以通过常规巡检及时发现,而长期监测能实时捕捉结构性能变化,提前预警潜在安全风险,避免坍塌、断裂等恶性事故发生。(2)从维护层面讲,长期监测可提供桥梁性能动态数据,替代传统“定期大修”的盲目维护模式,使维护工作更具针对性,减少不必要的资源浪费,同时通过跟踪结构劣化规律,为制定科学的维护周期与方案提供依据。(3)长期监测数据还能反馈桥梁设计与施工的实际效果,为后续同类桥梁的设计优化、规范完善提供真实数据支撑,推动城市桥梁建设技术的持续改进。

### 3.2 长期性能监测的核心内容

城市桥梁长期性能监测要聚焦结构关键指标,覆盖以下力学性能、材料状态与使用功能三大维度。(1)力学性能监测以结构受力与变形为核心,包括关键部位的应力应变、整体结构的竖向与水平位移、支座沉降等,通过实时跟踪这些指标,判断结构是否处于安全受力状态,是否存在超出设计允许的变形。(2)材料状态监测主要针对结构材料的劣化情况,如混凝土的碳化深度、氯离子含量、裂缝宽度与发展趋势,以及钢筋的锈蚀速率与程度,精准掌握材料劣化进程,评估结构耐久性衰减情况。(3)使用功能监测则围绕桥梁通行保障展开,包括桥面平整度、伸缩缝工作状态、排水系统通畅性等,确保桥梁在长期使用中始终满足正常通行需求,避免因功能失效影响交通运行效率<sup>[3]</sup>。

## 4 城市桥梁长期性能监测技术与方法

### 4.1 传统监测技术

(1)水准仪测量技术以水准测量原理为核心,通过建立水平视线,测量桥梁不同测点间的高差,计算测点高程变化,进而判断桥梁结构的竖向位移情况。应用时需先在桥梁周边设置稳定的基准点,基准点需避开沉降影响区域,采用混凝土浇筑固定,确保长期稳定性;测量过程中需严格控制仪器安置精度,避免视差影响,同时多次观测取平均值,减少偶然误差。(2)全站仪监测技术基于三角测量原理,通过测量测点的水平角、竖

直角与斜距,计算测点的三维坐标,追踪结构空间位置变化。应用时需先完成仪器设站与定向,设站位置需视野开阔,能覆盖全部监测测点,定向需采用高精度后视点,确保测量基准准确;监测过程中需对测点进行编码标识,避免测点混淆,同时定期对仪器进行校准,保证测量精度。

#### 4.2 现代传感技术

(1) 光纤传感器技术利用光的反射、折射等特性,将桥梁结构的物理参数(如应变、温度)变化转化为光信号变化,通过光信号解调获取监测数据。应用时需根据监测需求选择不同类型的光纤传感器,如应变型光纤传感器用于监测构件应力应变,温度型光纤传感器用于补偿温度对测量结果的影响;传感器布设需贴合构件表面或植入构件内部,布设过程中需避免光纤弯折过度,确保光信号传输通畅,同时做好传感器防护,防止外力损坏。(2) 无线传感器技术以无线通信为核心,通过传感器节点采集桥梁结构参数,再经无线传输模块将数据发送至接收终端。应用时需合理规划传感器节点布设位置,确保节点间通信信号稳定,避免遮挡导致的数据传输中断;节点需具备低功耗特性,采用电池供电或能量收集技术(如太阳能、振动发电),延长使用寿命;同时需对传感器节点进行定期检查,及时更换故障节点,保证监测系统连续性。

#### 4.3 监测数据的采集与传输

监测数据采集需确定合理的采集频率与方法。采集频率需根据监测指标特性与桥梁运营状况调整,对静态指标(如沉降、位移),可采用低频率采集,如每日1次或每周1次;对动态指标(如振动、应变),需提高采集频率,如每秒10次至每秒100次,确保捕捉结构瞬时变化。采集方法分为自动采集与手动采集,自动采集通过监测系统预设程序,实现数据定时自动获取,减少人工干预,适用于长期连续监测;手动采集需监测人员现场操作仪器获取数据,适用于临时补充监测或设备故障时的应急监测,采集过程中需做好数据记录,标注采集时

间、环境条件等信息,避免数据混淆。

监测数据传输需选择适配的传输方式与技术。有线传输通过电缆、光纤等物理线路传输数据,具有传输速率高、稳定性强、抗干扰能力好等特点,适用于固定监测站点与数据中心之间的连接,如光纤传感器数据多采用光纤传输;但有线传输布设成本高,后期维护难度大,难以适应桥梁结构变形或临时监测需求。无线传输包括蜂窝通信(如4G、5G)、物联网(如LoRa、NB-IoT)、无线局域网(如WiFi)等技术,蜂窝通信适用于远距离、大数据量传输,能实现监测数据远程实时上传;物联网技术具有低功耗、广覆盖特性,适用于大量传感器节点的数据传输;无线局域网适用于短距离、高频率数据传输,如桥梁现场临时监测数据传输。无论采用何种传输方式,均需对数据进行压缩与加密处理,压缩可减少数据量,提高传输效率,加密可防止数据泄露与篡改,保障数据安全性,同时需建立数据传输校验机制,及时发现并修正传输过程中的数据丢失或错误<sup>[4]</sup>。

结束语:本文全面梳理城市桥梁耐久性设计的理论与方法,明确长期性能监测的核心内容与技术路径,形成了从设计到监测的完整技术框架。研究通过细化结构优化、材料选用、防护设计要点,以及规范监测技术应用与数据处理流程,为桥梁耐久性提升与性能管控提供了可操作方案。未来要进一步推动设计与监测的协同机制落地,结合智能化技术,实现城市桥梁全寿命周期的精准化管理,助力城市交通基础设施高质量发展。

#### 参考文献

- [1]李延望,纪召新,刘敏.公路桥梁安全性和耐久性设计中的问题及对策[J].建筑与装饰,2024(8):4-6.
- [2]胡照星.道路桥梁结构的耐久性设计与服役期性能监测技术[J].山西建筑,2025,51(17):140-143.
- [3]倪艳春,蔡永谊,张启伟.大跨径斜拉桥长期健康监测数据的性能分析与应用[J].结构工程师,2024,40(5):19-27.
- [4]周隆文.桥梁健康监测系统在长期性能评估中的作用[J].工程技术研究,2025,7(3):230-232.