

# 公路与桥梁工程中的耐久性设计与施工技术研究

成军涛

秦皇岛润恒公路工程咨询设计有限公司 河北 秦皇岛 066000

**摘要:** 公路与桥梁作为交通核心基础设施,其耐久性至关重要。本文阐述了耐久性研究的背景与意义,分析了材料性能、环境、荷载使用、设计施工缺陷等因素对耐久性的影响。探讨了耐久性设计理论与方法,包括设计原则标准、结构耐久性设计方法及评估预测模型。研究了耐久性施工技术,涵盖材料选择优化、施工工艺控制、质量检测与监测技术。通过系统研究,为提升公路与桥梁工程耐久性,延长其使用寿命、降低全生命周期成本、保障交通安全及促进区域经济发展提供理论与技术支持。

**关键词:** 公路工程;桥梁工程;耐久性设计;施工技术

引言:公路与桥梁工程是区域经济联动、社会资源流通的关键依托。然而,随着交通流量增长、重载车辆增多及极端气候频发,大量公路与桥梁出现耐久性失效问题,缩短使用寿命、增加成本,甚至引发安全事故。我国早期部分交通工程老化,耐久性不足问题凸显。在此背景下,开展公路与桥梁工程耐久性设计与施工技术研究迫在眉睫。研究旨在揭示工程失效机理,为延长结构服役年限、降低全生命周期成本提供支撑,对保障交通网络稳定、促进经济可持续发展意义重大。

## 1 公路与桥梁工程耐久性研究的背景与意义

公路与桥梁作为交通基础设施的核心组成部分,是区域经济联动、社会资源流通的关键载体。随着交通流量持续增长、重载车辆比例上升以及极端气候事件频发,大量服役中的公路与桥梁出现混凝土碳化、钢筋锈蚀、结构开裂等耐久性失效问题,不仅缩短工程使用寿命,还增加养护维修成本,甚至引发安全事故。我国早期建设的部分交通工程已进入老化阶段,耐久性不足导致的结构病害日益凸显,直接影响交通网络的稳定性与可靠性。开展耐久性研究,能够揭示工程失效机理,为延长结构服役年限、降低全生命周期成本提供理论支撑,同时契合绿色交通发展理念,减少资源消耗与环境污染<sup>[1]</sup>。提升公路与桥梁耐久性有助于强化交通基础设施的抗灾能力,保障公众出行安全,对促进区域经济可持续发展、完善交通强国建设体系具有重要现实意义与战略价值。

## 2 公路与桥梁工程耐久性影响因素分析

### 2.1 材料性能因素

材料自身性能是决定公路与桥梁工程耐久性的基础条件。混凝土的强度等级、水胶比、骨料质量及矿物掺合料掺量直接影响其抗渗、抗冻、抗碳化能力,若混凝土密实度不足,外界有害物质易渗透内部引发结构损伤;

钢筋的材质、直径、防腐处理工艺与耐久性密切相关,普通碳素钢在潮湿环境中易发生电化学腐蚀,导致钢筋截面缩减、握裹力下降,进而引发混凝土开裂剥落。外加剂的选型与掺量也会影响材料性能,不当使用缓凝剂、早强剂可能导致混凝土内部应力不均,降低结构耐久性。此外,防水材料的抗渗性、粘结性,钢材的耐腐蚀性、韧性等性能指标,均会直接作用于公路与桥梁工程的长期服役状态,成为耐久性保障的关键因素。

### 2.2 环境因素

环境条件是影响公路与桥梁工程耐久性的重要外部因素。大气中的二氧化碳会引发混凝土碳化,破坏钢筋钝化膜,加速钢筋锈蚀;氯离子来源于海洋环境、除冰盐使用等,其渗透能力强,能快速抵达钢筋表面并引发腐蚀,且腐蚀速率远高于普通大气环境。温度变化会导致结构产生热胀冷缩,反复温度应力易造成混凝土开裂,为有害物质渗透提供通道;潮湿环境会持续为钢筋腐蚀、混凝土冻融破坏提供必要条件,尤其在雨季、雾天较多的区域,结构耐久性衰减更为明显。此外,工业环境中的二氧化硫、氮氧化物等有害气体,会与混凝土成分发生化学反应,生成易溶于水的物质,导致混凝土强度下降、表面剥落;紫外线照射会加速桥面铺装材料老化、开裂,进一步影响工程整体耐久性<sup>[2]</sup>。

### 2.3 荷载与使用因素

荷载作用与使用状况对公路与桥梁工程耐久性产生直接影响。交通荷载中的重载、超载车辆会使结构长期处于高应力状态,导致钢筋疲劳损伤、混凝土裂缝扩展,降低结构抵抗外界侵蚀的能力;车辆行驶产生的振动荷载会加剧结构连接部位的磨损、松动,破坏局部防护体系,为有害物质侵入创造条件。使用过程中,桥面铺装层长期承受车辆碾压、摩擦,易出现磨损、坑槽、裂缝

等病害,若未及时维修,会导致水分、有害物质快速渗透至桥面板,引发结构内部损伤。此外,工程使用频率过高、超出设计预期的交通流量,会缩短结构疲劳寿命;部分工程存在违规使用情况,如桥面堆放重物、随意开挖铺装层等,会直接破坏结构整体性与防护体系,加速耐久性失效进程。

#### 2.4 设计与施工缺陷

设计与施工环节的缺陷是导致公路与桥梁工程耐久性不足的重要内在原因。设计阶段,若结构选型不合理、受力分析不全面,会导致局部应力集中,易引发裂缝产生;防护措施设计不到位,如未设置有效的防腐涂层、排水系统设计缺陷等,会降低结构抵御外界侵蚀的能力;设计参数选取不当,如混凝土强度等级偏低、钢筋保护层厚度不足等,会直接限制工程耐久性潜力。施工过程中,混凝土搅拌、浇筑、振捣工艺不规范,会导致混凝土密实度不足、内部孔隙率过大,降低抗渗、抗冻性能;钢筋安装位置偏差、绑扎不牢固,会影响结构受力传递,且若保护层厚度未达到设计要求,会缩短有害物质抵达钢筋的路径;施工缝、伸缩缝处理不当,易形成渗漏通道;养护不及时、养护措施不到位,会导致混凝土强度发展不足、表面开裂,进而影响工程整体耐久性。

### 3 公路与桥梁工程中的耐久性设计理论与方法

#### 3.1 设计原则与标准

公路与桥梁工程耐久性设计遵循“预防为主、性能导向、全生命周期”的核心原则。设计需以结构长期服役性能为目标,综合考虑使用环境、荷载条件、材料特性等因素,提前预判可能出现的耐久性病害,采取针对性防护措施。设计过程中需严格遵循相关标准规范,如《公路工程技术标准》《混凝土结构耐久性设计标准》等,明确混凝土强度等级、钢筋保护层厚度、防腐措施等关键指标的最低要求。同时,坚持“因地制宜”原则,根据工程所在地的环境类别(如海洋环境、严寒地区、工业污染区等)制定差异化设计方案;注重“经济合理”原则,在保障耐久性的前提下,平衡初期建设成本与长期养护成本,实现全生命周期效益最大化。此外,设计需具备前瞻性,充分考虑交通流量增长、气候环境变化等潜在影响,预留一定的耐久性冗余,确保结构在设计使用年限内稳定可靠。

#### 3.2 结构耐久性设计方法

结构耐久性设计方法已从传统的“经验型”向“性能化”转变。基于可靠度的设计方法通过分析结构在使用年限内的失效概率,确定合理的设计参数,保障耐久性目标的实现;性能化设计方法以明确的耐久性性能指

标(如混凝土抗渗等级、钢筋锈蚀速率限值等)为核心,结合环境作用等级、荷载等级,系统制定材料选择、结构构造、防护措施等设计方案<sup>[3]</sup>。针对不同结构类型,采用针对性设计方法:混凝土结构重点强化抗碳化、抗氯离子渗透设计,通过优化配合比、增设防腐涂层、采用阻锈剂等措施提升耐久性;钢结构设计注重防腐与防火设计,选用耐候钢、施加防腐涂层、设置防火保护层等;桥面铺装层采用高耐久性材料,优化结构层组合设计,提升抗磨损、抗开裂、抗水损害能力。此外,设计中还需考虑结构可维护性,预留检测与维修通道,为后期耐久性提升创造条件。

#### 3.3 耐久性评估与预测模型

耐久性评估与预测模型作为保障公路与桥梁工程长期安全稳定服役的核心技术手段,在工程全生命周期管理中发挥着不可替代的作用。耐久性评估以结构检测数据为基石,系统整合环境侵蚀条件(如氯离子渗透、冻融循环)、荷载历史作用、材料性能退化规律等多维度因素,采用层次分析法构建指标权重体系、模糊综合评价法处理不确定性信息、神经网络法挖掘非线性关系等多元方法,对结构当前耐久性状态进行精细化分级评定。评估指标体系涵盖混凝土强度、碳化深度、钢筋锈蚀电位与质量损失率、裂缝宽度及分布特征、结构整体变形模态等关键参数,数据获取通过现场无损检测技术(如回弹法测强、超声法测缺、电磁感应法测锈)与实验室加速试验相结合的方式,确保评估结果的客观性与准确性。耐久性预测模型则基于材料退化机理与结构受力分析,引入环境作用函数量化气候、交通荷载等外部因素的影响,构建结构性能随时间演变的数学模型。典型模型包括混凝土碳化深度预测模型、钢筋锈蚀速率预测模型、结构裂缝扩展预测模型等,通过实测数据反演模型参数并进行验证优化,显著提升预测精度。该模型体系可为工程养护决策提供量化依据,科学制定维修方案,指导耐久性提升改造,最终实现结构全生命周期的动态管理,有效延长工程服役寿命,降低全寿命周期成本。

### 4 公路与桥梁工程中的耐久性施工技术研究

#### 4.1 材料选择与优化

材料选择与优化是提升公路与桥梁工程耐久性的关键施工技术环节。混凝土材料选择需优先选用高强度、低水化热、高密实度的水泥,搭配级配良好、杂质含量低的骨料,合理掺加粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料,优化水胶比与配合比设计,提升混凝土抗渗、抗冻、抗碳化及抗氯离子渗透性能;钢筋选用耐腐蚀性强的低合金高强度钢筋,重要结构部位可采用不锈钢钢筋或施加环

氧涂层、镀锌等防腐处理的钢筋，增强钢筋抗腐蚀能力。桥面铺装材料选用高模量、高耐磨性、抗水损害能力强的沥青混合物（如改性沥青混合物、橡胶沥青混合物）或水泥基复合材料，提升铺装层耐久性；防水材料选用粘结力强、抗渗性好、耐老化的高分子防水卷材或防水涂料，确保结构防水效果。通过材料性能试验与现场试用，优化外加剂掺量、矿物掺合料比例等参数，实现材料性能与工程需求的精准匹配，为耐久性施工提供优质材料保障。

#### 4.2 施工工艺控制

施工工艺控制是保障公路与桥梁工程耐久性的核心环节。混凝土施工前需严格控制原材料计量精度，采用机械搅拌确保搅拌均匀，根据施工环境温度调整搅拌时间与坍落度；浇筑过程中分层浇筑、连续作业，选用合适的振捣设备（如插入式振捣器、平板振捣器）确保振捣密实，避免漏振、过振导致混凝土内部缺陷；浇筑完成后及时进行覆盖保湿养护，根据混凝土强度发展情况调整养护时间（一般不少于14天），防止表面开裂。钢筋施工需精准控制安装位置与保护层厚度，采用垫块固定钢筋，确保钢筋间距均匀、绑扎牢固，避免施工过程中钢筋移位；焊接接头需符合规范要求，避免焊接缺陷导致应力集中。桥面铺装施工前需处理桥面板表面，清除浮浆、杂物并进行拉毛处理，提升铺装层与桥面板的粘结力；采用摊铺机匀速摊铺，控制压实温度与压实度，确保铺装层密实均匀<sup>[4]</sup>。另外，施工缝、伸缩缝处理需严格遵循工艺要求，采用专用材料填充、密封，防止渗漏；防腐工程施工需保证涂层厚度均匀、粘结牢固，避免漏涂、流挂等缺陷。

#### 4.3 质量检测与监测技术

质量检测与监测技术是保障公路与桥梁工程耐久性施工质量的重要手段。施工过程中质量检测涵盖原材料检测、施工过程检测与实体质量检测；原材料进场前需进行性能指标检验（如水泥强度、骨料级配、钢筋力学

性能等），不合格材料严禁使用；施工过程中检测混凝土坍落度、扩展度、初凝时间等工作性指标，钢筋安装位置、保护层厚度，桥面铺装层摊铺厚度、压实度等；实体质量检测采用无损检测与破损检测相结合的方式，检测混凝土强度（回弹法、超声回弹综合法）、碳化深度（酚酞试剂法）、钢筋锈蚀情况（电磁感应法、极化电阻法）、结构裂缝宽度与深度（裂缝宽度仪、超声法）等指标，及时发现施工缺陷并整改。耐久性监测技术通过在结构关键部位布设传感器（如钢筋锈蚀传感器、混凝土应变传感器、温湿度传感器、氯离子传感器等），实时采集结构受力状态、环境参数及材料性能退化数据，建立监测数据库，运用数据分析模型评估结构耐久性状态演变趋势，为施工质量控制、后期养护维修提供实时、精准的技术支持，确保工程耐久性目标实现。

#### 结束语

公路与桥梁工程耐久性设计与施工技术研究是一项复杂且意义深远的工作。通过深入剖析耐久性影响因素，明确设计原则标准，创新设计方法，构建评估预测模型，以及优化材料选择、强化施工工艺控制、完善质量检测与监测技术，可有效提升工程耐久性。这不仅有助于延长公路与桥梁的使用寿命，降低养护维修成本，更能保障公众出行安全，推动绿色交通发展。未来，应持续深入研究，不断优化技术，以适应交通事业发展的新需求，助力交通强国建设。

#### 参考文献

- [1]李杰.公路桥梁安全性和耐久性设计研究[J].城市建设理论研究(电子版), 2023,(29):149-151.
- [2]胡志刚.公路桥梁设计中的安全性及耐久性研究[J].运输经理世界, 2023, (26):83-85.
- [3]苏亚崇.公路桥梁工程中现浇箱梁的施工技术研究[J].中国住宅设施, 2024, (04):184-186.
- [4]王文学.公路与桥梁工程中的耐久性设计与施工技术研究[J].冶金动力, 2025,39(4):119-121.