

桥梁耐久性提升的设计措施研究

魏孟娇

中交远洲交通科技集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文聚焦桥梁耐久性提升的设计措施研究。先分析环境、材料、结构等因素对桥梁耐久性的影响及失效机理,接着从高性能材料选型优化、结构耐久性优化设计、多层防护体系构建、智能监测与维护设计四方面提出核心措施,通过全寿命周期成本(LCC)分析验证经济性。最后探讨未来3D打印技术、人工智能驱动的衰退预测模型等发展方向,为桥梁耐久性提升提供理论与技术支持。

关键词: 桥梁工程;耐久性设计;全寿命周期

引言:桥梁作为交通枢纽,其耐久性关乎安全与使用。在长期使用中,桥梁受环境侵蚀、材料老化、结构损伤等因素影响,耐久性衰退,承载力下降、寿命缩短,甚至引发安全事故。当前桥梁耐久性问题突出,传统设计方法难以满足需求。研究桥梁耐久性提升的设计措施,对保障桥梁安全、延长使用寿命、降低全寿命周期成本意义重大,是桥梁工程领域亟待解决的关键问题。

1 桥梁耐久性影响因素与失效机理

桥梁耐久性是指桥梁在长期使用过程中,抵抗环境侵蚀、材料老化和结构损伤,维持设计功能与安全性能的能力,其失效本质是多因素耦合作用下结构性能渐进衰减的过程。环境、材料、结构三大核心因素相互作用,共同主导耐久性衰退轨迹。

1.1 环境因素

环境因素是桥梁耐久性衰退的主要外部诱因,不同服役环境会引发针对性损伤。大气环境中,工业区域的二氧化硫、氮氧化物等酸性气体与雨水结合形成酸雨,对混凝土、钢材产生腐蚀作用,破坏材料表层结构并向内部渗透;海洋环境的高盐雾、高湿度特性,会使氯离子侵入钢筋表面,破坏钝化膜引发锈蚀,锈蚀产物体积膨胀导致混凝土开裂剥落^[1]。极端气候条件同样影响显著,高温暴晒加速混凝土干缩开裂,低温冻融使内部孔隙水结冰膨胀,反复循环造成材料酥化;此外,强风、暴雨、地震等自然灾害会直接造成结构损伤,间接加剧耐久性衰退,而土壤中的侵蚀性离子、生物侵蚀等也会对桥梁基础及下部结构产生持续破坏。

1.2 材料因素

材料自身性能是决定桥梁耐久性的内在核心,材料质量缺陷或性能不足会直接引发早期损伤。混凝土材料中,水泥标号偏低、骨料级配不合理、水灰比过大等问题,会导致混凝土密实度不足,孔隙率增加,为有害物

质侵入提供通道;同时,混凝土水化热释放不当引发的温度应力裂缝,以及干燥收缩产生的收缩裂缝,都会成为耐久性衰退的突破口。钢材材料方面,普通碳素钢抗腐蚀性能较差,长期暴露在恶劣环境中易发生锈蚀;而焊接材料与基材兼容性不足、钢材内部存在夹杂物或焊接缺陷,会导致应力集中,加速疲劳损伤。另外,外加剂选型不当、材料混合不均匀等施工阶段的材料控制问题,也会间接降低材料耐久性,缩短桥梁使用寿命。

1.3 结构因素

结构设计的科学性与合理性直接影响桥梁受力状态,进而主导耐久性衰退进程。结构形式选择不当会导致应力分布不均,如悬臂结构悬臂长度过大、刚架结构节点刚度不足,会引发局部应力集中,加速结构开裂;结构尺寸设计不合理,如主梁截面厚度不足、桥墩配筋率过低,会导致结构承载能力储备不足,长期承受荷载后易产生塑性变形。构造设计缺陷同样关键,如桥面排水系统设计不完善,雨水长期积聚在桥面或渗透至结构内部,会加剧材料腐蚀;伸缩缝、支座等易损部件设计不合理,会导致振动冲击荷载传递至主体结构,引发疲劳损伤。结构抗震、抗风等专项设计不足,在遭遇极端荷载时会产生超出设计预期的损伤,间接影响耐久性。

2 桥梁耐久性提升的核心设计措施

针对桥梁耐久性衰退的核心影响因素,需从材料、结构、防护、维护全维度构建系统性设计措施。通过高性能材料选型优化提升内在抗损能力,借助结构设计优化改善受力状态,依托多层防护体系阻断外部侵蚀路径,结合智能监测与维护设计实现损伤早发现、早处置,四大措施协同发力,形成“主动提升+被动防护+动态维护”的全链条耐久性保障体系,从源头降低损伤风险,延长桥梁全寿命周期。

2.1 高性能材料选型与优化

高性能材料选型与优化是提升桥梁耐久性的基础手段，核心在于通过材料性能升级增强抗侵蚀、抗老化能力。混凝土材料应优先选用高标号硅酸盐水泥或特种水泥，搭配级配良好的高强度骨料，严格控制水灰比在0.4以下，掺入优质粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，改善混凝土微观结构，提高密实度；同时添加高效减水剂、引气剂等外加剂，减少孔隙率，提升抗冻、抗渗性能。钢材材料需根据服役环境选型，海洋环境或强腐蚀区域优先采用耐候钢、不锈钢或镀锌钢，普通环境可选用高强度低合金结构钢，关键受力部位采用耐疲劳性能优异的特种钢材；焊接材料需确保与基材性能匹配，采用低氢型焊条减少焊接缺陷。另外，可采用纤维增强复合材料（FRP）等新型材料替代传统钢材，其轻质高强、耐腐蚀的特性能显著提升结构耐久性；同时通过材料配合比优化试验，确定最佳混合比例，确保材料性能稳定发挥。

2.2 结构耐久性优化设计

结构耐久性优化设计核心是通过改进结构形式、尺寸与构造，实现受力合理、损伤可控。结构形式选择应遵循“受力均匀、传力直接”原则，大跨度桥梁优先采用斜拉桥、悬索桥等应力分布均匀的结构形式，中小跨径桥梁可选用装配式结构减少现场施工缺陷；合理增大主梁、桥墩等关键构件截面尺寸，提高刚度与承载储备，避免局部应力集中^[2]。构造设计优化需重点完善细节处理，桥面排水系统采用多坡度设计与高效排水装置，确保雨水快速排出，设置防水层阻断水分渗透；伸缩缝选用抗疲劳、密封性能好的模数式伸缩装置，支座采用高阻尼、耐磨型产品，减少振动冲击影响。配筋设计方面，采用双层双向配筋提高混凝土构件抗裂能力，钢筋保护层厚度按规范上限取值，关键部位采用环氧树脂涂层钢筋或不锈钢钢筋，防止锈蚀。通过结构有限元模拟分析，优化应力分布，避免出现设计盲区。

2.3 多层防护体系构建

多层防护体系构建是阻断外部侵蚀、保护结构主体的关键手段，通过“表层防护+中间阻隔+内部强化”的复合防护策略，形成全方位屏障。表层防护聚焦结构外表面，混凝土构件表面涂刷氟碳涂料、聚脲涂层等高性能防腐涂料，形成致密保护膜，抵抗紫外线、酸雨侵蚀；钢结构表面采用喷砂除锈后，喷涂富锌底漆+环氧中间漆+聚氨酯面漆的复合涂层，提高抗腐蚀能力。中间阻隔层重点阻断有害物质渗透路径，混凝土桥面铺设高性能防水卷材与粘结层，形成双重防水屏障；结构接缝处采用遇水膨胀止水条、密封胶等材料，防止水分、氯离子侵入。内部强化主要针对钢筋等核心受力部件，采用钢筋阻锈剂

掺入混凝土，抑制钢筋锈蚀；对预应力钢束采用真空灌浆工艺，确保孔道密实，防止腐蚀介质进入。多层防护体系相互补充，有效延长结构抵御外部侵蚀的能力。

2.4 智能监测与维护设计

智能监测与维护设计是实现桥梁耐久性动态保障的核心，通过“实时监测+数据分析+精准维护”的闭环体系，提前预警损伤风险。监测系统需覆盖关键指标，布置应变传感器、位移传感器监测结构受力变形，安装温湿度传感器、腐蚀传感器捕捉环境侵蚀状态，利用裂缝监测仪、钢筋锈蚀仪实时跟踪损伤发展；通过物联网技术实现数据无线传输，构建集中式监测平台。数据分析模块采用大数据算法，建立结构性能衰退模型，通过对比实时数据与设计阈值，自动识别异常信号，发出预警信息。维护设计需制定分级响应机制，根据预警等级明确维护流程，配备专用维护设备与材料；针对易损部件设计模块化更换结构，提高维护效率；建立全寿命周期维护档案，记录监测数据、维护措施与效果，为后续维护决策提供依据。智能监测与维护设计实现了从“被动维修”到“主动防护”的转变，显著提升耐久性保障的针对性与有效性。

3 全寿命周期成本（LCC）分析

3.1 成本构成模型

全寿命周期成本构成模型犹如一座精密运转的体系大厦，由四大核心模块紧密搭建而成，形成了一套完整且科学的成本核算体系。初始投资成本作为这座大厦的基石，涵盖了设计费、材料购置费、施工安装费、设备购置费等诸多方面。其中，与耐久性相关的成本占比尤为显著。为提升桥梁耐久性，选用高性能材料会产生溢价成本；构建防护体系时，相应的施工费用也不容小觑；安装智能监测设备用于实时掌握桥梁状态，其购置与安装费用同样是一笔不小的开支^[3]。运营维护成本是桥梁投入使用后的日常“保养费”，包括清洁保养费、监测系统运行费、小型维修材料费等。耐久性设计越完善，桥梁抵御外界侵蚀和破坏的能力就越强，日常出现的问题也就越少，运营维护成本自然随之降低。维修更换成本则像是一笔“应急资金”，涵盖中大修工程费、易损部件更换费、结构加固费等。它与耐久性设计水平直接挂钩，若耐久性设计存在缺陷，桥梁在使用过程中就更容易出现损坏，导致维修周期缩短、更换频率增加，进而大幅提升这部分成本。报废处置成本是桥梁寿命终结时的“收尾费用”，包括结构拆除费、废弃物处理费、土地恢复费等。合理的耐久性设计能够延长桥梁的使用寿命，使得在单位时间内分摊的报废处置成本得以降低。这四大成

本模块并非孤立存在,而是相互关联、相互影响。

3.2 耐久性设计措施的经济性验证

耐久性设计措施的经济性验证通过对比不同设计方案的全寿命周期成本,量化耐久性投入的经济效益。验证过程需建立成本核算指标体系,明确各成本模块的计算标准,如初始投资成本按市场价格核算,运营维护成本按年度均摊计算,维修更换成本根据历史数据与损伤预测模型估算。以两种设计方案为例,方案一采用普通材料与基础防护设计,初始投资较低,但预测运营10年后需进行大规模维修,20年后需更换关键构件;方案二采用高性能材料、多层防护体系与智能监测设计,初始投资较方案一增加15%~20%,但预测运营期内维修频率降低60%,使用寿命延长10~15年。通过LCC分析计算,方案二的单位时间成本较方案一降低25%~30%,且减少了因桥梁故障导致的交通中断损失等间接成本。经济性验证表明,合理的耐久性设计投入虽增加初始成本,但能大幅降低后续成本,实现全寿命周期经济最优。

4 未来发展方向

随着新材料、新技术的快速发展,桥梁耐久性设计正朝着智能化、精准化、创新化方向演进。3D打印技术突破传统施工局限,实现耐久性异形结构的高效制造;人工智能驱动的衰退预测模型提升损伤预判精度,为耐久性设计与维护提供更科学的支撑。

4.1 3D打印技术制造耐久性异形结构

3D打印技术为桥梁耐久性异形结构制造提供了创新解决方案,通过层层叠加的增材制造方式,突破传统施工对结构形式的限制。该技术可采用高性能混凝土、纤维增强复合材料等专用打印材料,直接制造复杂异形结构,如曲面主梁、镂空桥墩等,实现结构形式与受力状态的精准匹配,减少应力集中。打印过程通过数字化控制,确保材料铺设均匀、密实度一致,避免传统施工中人工操作导致的质量缺陷;同时,可根据结构不同部位的耐久性需求,实现材料性能的梯度分布,如在腐蚀风险高的区域增加防腐材料含量,在受力关键部位强化材料强度。3D打印技术还能减少施工废弃物产生,提高材料利用率,且成型速度快,缩短施工周期;未来随着打印设备大型化、材料性能优化,将在大跨度桥梁、特殊

环境桥梁的耐久性结构制造中广泛应用。

4.2 人工智能驱动的耐久性衰退预测模型

人工智能驱动的耐久性衰退预测模型借助先进算法与数据优势,实现桥梁耐久性衰退的精准预判。该模型基于海量历史数据构建,包括桥梁材料性能参数、结构设计数据、环境监测数据、损伤记录等,通过机器学习算法挖掘数据间的潜在关联,建立耐久性衰退与各影响因素的映射关系。模型具备自学习能力,随着监测数据的持续积累,不断优化算法参数,提升预测精度;可实现多因素耦合作用下的衰退趋势预测,如同时考虑环境侵蚀、荷载作用、材料老化的综合影响,预测结构在不同时间节点的性能状态^[4]。通过该模型,能提前识别潜在损伤风险,明确损伤发生的位置、时间与程度,为耐久性设计提供依据,如针对高风险区域强化防护措施;同时为维护决策提供支撑,制定个性化维护方案,避免过度维护或维护不足。未来结合数字孪生技术,可构建桥梁虚拟仿真模型,实现耐久性衰退的可视化预测与动态模拟,进一步提升耐久性保障的科学性与前瞻性。

结束语

桥梁耐久性提升设计措施研究对保障桥梁安全运营至关重要。通过多维度设计措施构建的保障体系,能有效提升桥梁耐久性。全寿命周期成本分析为经济性选型提供依据。未来,3D打印技术与人工智能驱动的衰退预测模型等新技术的应用,将推动桥梁耐久性设计向智能化、精准化、创新化发展,实现桥梁工程“长寿命、低能耗、高可靠”的目标,为交通基础设施建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王敬云.桥梁设计中安全耐久性问题及解决措施分析[J].运输经理世界,2023(12):114-116.
- [2]徐远贺.公路桥梁安全性和耐久性设计研究[J].运输经理世界,2022(9):128-130.
- [3]吴军,潘伟华.桥梁设计中的安全性及耐久性研究[J].运输经理世界,2022(12):58-60.
- [4]肖小铃.混凝土桥梁耐久性设计与施工关键技术研究[J].工程建设与设计,2021(1):80-81,95.