

桥梁设计的耐久性提升与质量监控方法

雷 力

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要]桥梁结构在长时间服役期间遭受着环境因素、材料退化以及反复荷载的影响,耐久性的设计与监测是保证桥梁全寿命周期安全的关键问题之一,文章全面介绍了桥梁耐久性设计理念及其理论依据,基于高性能材料选用、结构设计改进、防锈蚀处理和防疲劳设计四个方面分析了提高桥梁结构耐久性的关键技术,同时对于施工过程和使用过程也给出了检测方法 with 监测评价方式。通过把耐久性的思想融入设计、施工和使用的整个生命周期中,建立全过程协作模式可以大大延长桥梁构件的使用年限并提高其安全性。

[关键词]桥梁设计;耐久性提升;质量监控

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19787

中图分类号: U443.5

文献标识码: A

Durability Improvement and Quality Monitoring Methods for Bridge Design

LEI Li

Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Bridge structures are affected by environmental factors, material degradation, and repeated loads during long-term service. Durability design and monitoring are one of the key safety issues to ensure the entire life cycle of bridges. This article comprehensively introduces the concept and theoretical basis of bridge durability design, and analyzes the key technologies to improve the durability of bridge structures based on the selection of high-performance materials, structural design improvement, anti rust treatment, and anti fatigue design. At the same time, detection methods and monitoring evaluation methods are also provided for the construction and use processes. By integrating the concept of durability into the entire lifecycle of design, construction, and use, establishing a collaborative model throughout the entire process can greatly extend the service life of bridge components and improve their safety.

Keywords: bridge design; durability improvement; quality control

引言

伴随着我国交通运输基础设施建设规模的不断扩大,桥梁结构在长期服务期间所承受的环境腐蚀、材料老化、疲劳荷载等各种病害问题越来越严重。桥梁结构耐久度低不仅是造成大量维护加固资金的巨大浪费,更是对结构安全以及公众生命财产安全构成严重危害的隐患。怎样通过合理的设计方式、加强质量监控等手段提高桥梁耐久性已经成为工程界、学术界共同探讨的话题。现阶段我国桥梁结构特别是预应力桥梁结构耐久性的缺陷表现出明显的区域性特点,进行桥梁耐久性环境的研究已经迫在眉睫。基于设计层面,选用高性能原材料、改进结构形式、加强腐蚀防护以及疲劳防护设计并结合施工期及使用期内对工程质量的全面管控,构成一个完整的管理体系,是提高桥梁使用寿命的有效措施。本文意在归纳桥梁耐久性设计

重要技术和质量控制手段,用于桥梁工程施工应用借鉴。

1 桥梁耐久性设计的理论基础

桥梁耐久性就是整个桥梁结构在规定的使用寿命期间内,面对自然环境以及外部荷载条件的影响能够维持它的正常使用功能及安全性的一种能力。耐久性设计的关键是从结构所使用的材料、构件以及整个结构体系三个方面构建起防劣化的措施来使得桥梁结构可以一直处在良好的服务状态当中而不会出现严重的功能恶化情况。影响桥梁结构耐久性的因素可分为两大类:一个是内部因素,另一个就是外界因素。内部因素主要有材料强度等级、结构细节处理及施工质量等;对于外界因素来说主要包括了环境状况、外部载荷以及养护程度等。在环境的影响之下,预应力混凝土结构会逐步老化;载荷量不断增加而造成的构件损伤也会导致它的力学性能逐年下降。此外,高强度

预应力钢构件承受着较大工作应力,也会导致应力腐蚀后的脆性断裂风险增大。所以持久性能设计需要兼顾材料的劣化方式及环境的影响。从整个使用寿命的角度来看,对桥梁持久性的设计要覆盖规划、设计、施工、运行、养护全过程。在设计中确定持久性目标及极限状态标准,在施工中保证设计意图的正确实施,在使用期间设置监测评估以及维护修复措施。这就使得设计人员不仅要关注建设初期的投资成本,还要兼顾整个生命周期中的维护费用以及风险费用等。

2 桥梁设计中持久性提升关键技术

2.1 高性能材料的选型与应用

高性能材料是保证桥梁持久性的物质保障。目前桥梁建设工程上常用的高性能材料有高性能混凝土、高强度钢筋、纤维增强复合材料和耐候钢。高性能混凝土具有较低的水灰比、较密实的结构及较好的抗渗性,能够有效的减缓氯化物、碳酸盐等侵蚀物质对混凝土结构的侵入速度,增强混凝土结构的耐腐蚀性能。高强度钢筋可以减薄结构截面,减轻结构自重,但是需要注意高强度钢筋在应力状态下容易产生腐蚀现象。超高性能纤维增强水泥基复合材料组合钢桥面体系研究结果显示,纤维种类与纤维掺量对材料的轴拉性能及抗弯性能有很大作用,在设计中合理搭配纤维能够使组合构件具有较好的不开裂能力和耐疲劳能力。而纤维增强树脂基复合材料优越的力学强度以及良好的耐腐蚀性能和耐疲劳性能使其适用于在恶劣环境条件下使用的桥梁建设项目上。

2.2 基于持久性的结构构造优化

结构构造的设计对桥梁的持久性能有着决定性的影响。构造设计上的优化即要使结构体系更加简单化,受力情况更加合理化以及增强其可检性和维修性。以整体性为出发点,应该尽可能降低结构中存在的一些薄弱部位以及应力集中的位置;不应使用受力复杂的构造做法,并且要保证传力途径清晰明确;对于可检性而言,重要的部件及易损部分应设计相应的检查通道以及满足一定的检测条

件,从而可以保证检测仪器能够进入到该处并且检测视野不会受到阻碍;从可维修方面,应该考虑到部件更换的可能性及其方便程度,在设计当中要给工作人员足够的操作空间以及吊装条件等。从结构的设计、构造等方面的技术措施上来保证桥梁的耐久性能,需要对防水设计、排水设施以及伸缩缝、支座这些经常受外力作用而损坏的部位加以考虑,同时也要注意保护层的厚度,这是决定结构耐久性的最主要构造因素之一;通过对应力状态下的碳化扩散机理的研究,可以得出碳化失钝长度的计算公式,从而推导出大气环境下的预应力混凝土结构持久性临界状态方程来作为选取构造保护层厚度的一项重要依据。另外针对沿海氯盐环境要建立相应的氯离子侵蚀环境下的最小保护层厚度计算公式,同时也要考虑好钢筋的分布情况,适当地减小钢筋间距有利于提高混凝土的整体浇筑质量,减少由于振捣不到位造成的问题。预应力管道同普通钢筋布置相配合的设计能减少管道对构件截面的削弱作用,提升结构的整体耐久能力。

2.3 防腐蚀与抗劣化综合设计

腐蚀是造成桥梁结构持久性的主要原因之一。防腐蚀设计需要从材料、构造、防护三个方面进行控制。对于混凝土结构来说,防腐蚀措施主要为:使用高性能混凝土来增大密实程度、加大保护层厚度、施加表面防护涂层、使用阴极保护等。而对于钢结构,则是使用耐候钢、涂刷防腐涂料、布置排水防潮构造、阴极保护等。耐候钢桥研究显示,稳定耐候锈层形成的原理就是耐候钢材自我防腐的基础,其材料要求、腐蚀疲劳失效机理、耐候构造设计及锈层监测评估技术等方面都是耐候钢桥运用的重要技术要点。对于耐候钢的应用环境必须根据其所处环境的腐蚀等级情况及结构形式、维护可达性等进行考虑。

2.4 抗疲劳与抗裂性能提升措施

疲劳损伤问题是影响钢桥、预应力混凝土桥的主要持久性因素之一,在正交异性钢桥面板中由于车辆反复碾压引起的车轮荷载作用会使得钢板横隔板弧口处出现疲劳

表 1 高性能桥梁材料性能对比

材料类型	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (Gpa)	耐久性特点	适用环境
高性能混凝土	80~120	5~8	40~45	高密实、抗渗性强	海洋、冻融环境
高强钢材	≥400	540~1860	200~210	高应力腐蚀风险	预应力结构
超高性能纤维增强水泥基复合材料	120~200	8~15	45~55	超高韧性、抗裂	组合桥面、薄壁结构
纤维增强复合材料	300~1200	600~2800	30~150	耐腐蚀、抗疲劳	恶劣环境、加固修复
耐候钢	345~485	485~690	200	耐大气腐蚀	裸露结构、免涂装

裂纹现象。针对正交异性钢桥面板横隔板弧形切口,在长期车辆振动与反复轮载压力作用下易产生疲劳开裂的问题,可采用以下两种维修加固措施:一是粘贴碳纤维增强复合材料布至止裂孔处进行修复;二是采用可通过形状记忆合金激活施加预应力的形状记忆合金/碳纤维增强复合材料组合片,粘贴于止裂孔位置进行加固处理。对于预应力混凝土结构的开裂预防设计来说,需要注意的是能否有效地建立及长久维持预应力的作用效果。针对两种腐蚀环境下的预应力混凝土桥梁结构即碳化及氯离子侵蚀环境下的预应力混凝土桥梁结构,要计算预应力钢筋锈蚀脱氧时长与普通钢筋锈胀开裂时间,构建预应力钢筋的耐腐蚀寿命以及普通钢筋的锈胀开裂寿命模型,在碳化环境中北方地区预应力混凝土桥梁结构中的预应力筋耐腐蚀寿命短于普通钢筋的锈胀开裂寿命,在南方高温潮湿环境中则正好相反。

3 桥梁施工阶段质量控制方法

3.1 关键工序与隐蔽工程监测

施工阶段的质量管理是保证工程耐久性的决定因素,其中重要环节有混凝土浇筑、预应力张拉、管道压浆、装配式构件吊装等,而隐蔽工程则有基础处理、钢筋绑扎、预应力管道布置等,预应力管道压浆属于后张法预应力混凝土桥梁工程的重要施工步骤,它的好坏直接影响到结构的耐久性,在现阶段,预应力管道压浆施工工艺机械化水平偏低,人为干预过多的现象比较突出,由于它是隐蔽工程,所以对于压浆施工过程的监督一直以来都成为预应力桥梁工程质量管理难题。使用自动压浆设备可以克服压浆不足、排气孔堵塞、管道堵塞等一系列问题,增强压浆密实程度及施工质量。采用概率极限状态设计法进行耐久性设计时,要将预应力混凝土桥梁结构耐久性的极限状态分为预应力钢筋初锈极限状态、普通钢筋锈胀极限状态以及受力开裂极限状态三个部分,分别建立起对应的极限状态方程及目标可靠指标。此方法对于施工过程中的质量保证作出了具体的规定,就是要保障保护层厚度、混凝土密实度以及预应力系统完整性等一系列关键项指标满足设计要求。

3.2 无损检测技术在施工中的应用

无损检测技术在工程施工过程中的质量检查中有着快速而准确的作用,常用的一些无损检测方式有超声波检测、回弹法、雷达探测、红外成像等。而预制桩作为桥梁工程的一种重要组成物,为了保证其制作的质量,一定要对其进行可靠的无损检测,其中机械裂纹检测技术可以很

好地对预制桩的内部问题以及裂缝情况进行了解;而超声波检测可用于混凝土内部空洞及密实度检测,回弹法可用于混凝土强度推定,雷达探测可用于钢筋位置及保护层厚度检测,在对预应力混凝土结构的质量检查当中,孔道压浆密实度检测尤为重要,而冲击回波法以及超声波透射法则能有效的找出压浆存在的缺陷及其位置大小。建设期间做好检查记录以及影像资料保存,在运营期间对设备进行评价时有参考依据。

4 桥梁运营阶段质量监控与评估

4.1 结构健康监测系统的建立与应用

结构健康监测系统通过对结构的状态信息进行实时监测及分析,以作为对桥梁的安全运营以及后期养护的重要依据。中国基础设施建设规模不断扩大,结构健康监测工程的应用越来越广泛,健康监测通过对结构的状态信息进行实时监测及分析以作为桥梁这类重要建设工程的安全预警以及决策参考^[1]。结构健康监测系统的组成主要包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与管理系统、评估与预警子系统。监测指标包括环境载荷、结构响应、结构劣化性能等诸多方面信息。而由于现场情况复杂多变,传感器失灵、通讯中断等原因会造成大量的监测数据缺失。对此问题可以通过数据重组建模成矩阵填充问题,使用基于时间序列专门设计的桥梁监测数据重组的方法,在此过程中建立一种掩码矩阵来模拟数据包随机丢失以及传感器通道全部失效等情况,并建立多个深层次神经网络进行探索性分析,达到精准还原的效果。

4.2 运营期桥梁性能评估方法

运维阶段桥梁性能评价是判断结构状况、做出维修决策的基础依据,评价手段有目测观察、无损检测、加载试验、健康状态分析等。

基于概率理论的时变可靠度评价方法,能定量刻画桥的耐久性与服役年限的关系^[2]。通过研究处于碳化及氯盐侵蚀环境中的预应力结构开裂破坏临界点处抗力衰退规律,提出基于受力开裂寿命准则的预应力结构耐久性剩余寿命时变可靠度评价方法。

4.3 病害识别、预警与维护机制

病害诊断是桥梁维护的基础。利用各类检测设备及数据处理方法可以对桥梁结构出现的病害种类、部位、程度以及变化趋势等问题进行有效的判定。对于传统的桥结构健康监测系统存在对地震事件判断易受到传感器损坏或者环境噪音等影响的问题,在此情况下可以使用基于多输入端到端深度学习的地震事件自动识别方式,把握

表 2 运营期桥梁性能评估方法对比

评估方法	评估内容	技术特点	适用阶段	局限性
外观检查	表观病害、构件损伤	直观、成本低	日常巡检	主观性强、无法发现内部缺陷
无损检测	内部缺陷、材料性能	定量化、不破坏结构	定期检测	需专业设备与人员
荷载试验	承载力、刚度、变形	直接验证结构性能	验收、加固前评估	需封闭交通、成本高
健康监测	实时响应、长期趋势	连续、自动化	大型、重要桥梁	系统投资大、数据量大
可靠度评估	失效概率、剩余寿命	概率化、时变性	综合评定	需大量基础数据

动加速度信号经过分解成各个方向以后转换成时域图、频域图、概率密度图，组成三通道图像神经网络输入模型，使用特征融合与决策融合策略提高识别能力^[3]。预警制度要制定分级别应急响应机制，根据病害状况及危害等级启动应急预案。养护措施要落实以防为主、防重于治的理念，依据桥梁的重要性以及病害种类、养护费用等指标综合判断。对已接近设计使用年限或者有严重问题的桥梁需要单独做专项评估来确定可否继续运营及其使用寿命。

5 结语

提高桥梁耐久性及质量控制是一个综合性的课题，需要从设计、施工到使用全过程进行统筹管理。文章对桥梁耐久性设计的基本原理进行了全面综述，在此基础上介绍了高性能材料的应用、结构设计改进、防腐蚀设计、防止疲劳损坏等方面的技术手段，并且提出了针对施工及使用过程中开展质量监督评价的方法。研究认为，

只有把耐久性理念融入整个桥梁生命周期内的设计、施工及养护环节中去，并形成设计—施工—运营一体化监管体系，才能达到延长桥梁使用寿命的目的。预计随着智能检测技术的发展，高强材料的应用及安全可靠度设计理论的进步，未来桥梁耐久性设计将会更加精确合理、经济适用并具有良好的耐久性能。

[参考文献]

- [1]谢助兵,李治国.桥梁设计的耐久性提升与质量监控方法[J].产品可靠性报告,2024(9):115-116.
 - [2]段兰,袁翊竑,王春生,等.长寿命 UHPFRC 组合钢桥面板研究综述[J].交通运输工程学报,2024,24(1):68-84.
 - [3]任吉源.桥梁结构耐久性的影响因素及优化设计研究[J].交通世界,2024(1):205-207.
- 作者简介：雷力（1994—），男，汉族，湖北省黄冈市，工程师，2019 年 6 月毕业于武汉理工大学，研究生，现主要从事桥梁设计。