

公路桥梁耐久性试验检测与劣化评估研究

阳枝萍

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]公路桥梁在服役期间由于自然因素及车辆荷载等的影响, 不断发生着耐久性的衰退。文章全面阐述了公路桥梁耐久性试验检查的方式以及对桥梁耐久性损伤程度进行评定的技术难点, 同时针对如何保证公路桥梁耐久性给出了建议措施。通过研究可以得出科学合理的检测方法以及完善的桥梁耐久性评估体系对于保证公路桥梁长期的安全使用具有重要意义, 多元化的检测方式相结合和科技手段的应用将会使桥梁管理养护更加有条不紊。

[关键词]公路桥梁; 耐久性; 试验检测; 劣化评估; 无损检测

DOI: 10.33142/aem.v8i4.19617

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

Research on Durability Testing and Deterioration Assessment of Highway Bridges

YANG Zhiping

Xinjiang Beixin Science and Technology Innovation Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: During the service period, highway bridges are constantly experiencing durability degradation due to natural factors and vehicle loads. The article comprehensively elaborates on the methods of durability testing and inspection for highway bridges, as well as the technical difficulties in evaluating the degree of durability damage to bridges. At the same time, suggestions and measures are provided on how to ensure the durability of highway bridges. Through research, it can be concluded that scientifically reasonable detection methods and a comprehensive bridge durability evaluation system are of great significance for ensuring the long-term safe use of highway bridges. The combination of diversified detection methods and the application of technological means will make bridge management and maintenance more orderly.

Keywords: highway bridges; durability; experimental testing; deterioration assessment; non-destructive testing

引言

由于我国公路桥梁服役年限普遍较长, 在材料老化、环境侵蚀以及荷载长期作用下, 不可避免地造成桥梁结构性能劣化, 耐久性问题越来越严重。截至 2023 年底, 全国共有公路桥梁约 108 万座, 其中服役年限较长再加上环境侵蚀作用、荷载长期作用等因素的影响, 不可避免会导致桥梁结构劣化、材料老化、性能退化等一系列问题。耐久性试验检测是对桥梁现状了解的主要方式之一, 而劣化评估则是对桥梁进行养护管理的重要决策依据。但是目前工程中的实际应用还存在着检测手段选择不合理、劣化评价不够完善等问题。《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)把桥梁的技术状况划分为五个等级: I 类桥是完好或者良好的; II 类桥是较好的; III 类桥是较差的; IV 类桥是差的; V 类是危险的。这个标准 2026 年版报批稿已经完成并且对社会进行了广泛的公开征集意见, 表明我国的公路桥梁技术状况评定由“综合评判”进

入到“精确检查、分等管理”的时代, 为耐久性的检查及分析研究提供更加权威的数据支撑。

1 公路桥梁耐久性试验检测方法

1.1 混凝土强度检测

混凝土强度作为衡量桥梁构件承重能力大小及抗疲劳强度的重要参数之一。常见的混凝土强度检测方式有回弹法、超声回弹综合法、钻芯法以及超声回弹综合法修正法等。回弹法简单易行, 适合大面积抽测; 混凝土强度换算值的变异系数应该在百分之十以下, 不超过百分之十五。预测时要根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)对混凝土碳化深度加以修正, 在表里质有较大差距或内有空洞的情况下不能使用回弹法来测量混凝土强度。超声回弹综合法同时获取超声波速值与回弹值, 结合二元回归关系式计算强度, 准确度比单纯的回弹法高。芯样法是在结构受力薄弱处用钻机钻取芯样, 然后在压力试验机上做抗压试验, 可以直接得到混凝土的实际

强度值,可用作仲裁、检验手段,实际工程一般先利用回弹法大面积筛查,然后选择典型位置用芯样法检验校正,既保证了检测准确率又能降低对构件的损坏程度。

1.2 碳化深度检测

混凝土碳化是引起钢筋钝化层破坏的关键因素,而碳化的程度直接影响了桥梁结构耐久性的好坏,所以混凝土28d碳化深度不能超过0.5mm,混凝土经过365d碳化后它的深度不能超过1.5mm。现场检查中最常用的是酚酞试剂法,用2%的酚酞酒精溶液喷上去如果呈紫色说明pH值大于10,则未发生碳化;如变为白色则表示pH值小于10,已经碳化。芯样取样法是通过钻取混凝土芯样到实验室中进行加工后使用酚酞试剂测定可以得到准确的数值,在近年超声波检测法和红外热像检测法等非接触的方式也开始被用于对碳化程度进行测量。在潮湿及寒冷干旱的盐碱地带等特殊环境下,其碳化速度远远大于设计要求,实际测量得到的保护层厚度和碳化深度之间的差距已经成为判断钢筋锈蚀程度的最主要的依据了。

1.3 钢筋锈蚀检测

钢筋锈蚀是桥梁结构耐久性劣化的根本原因,而半电池电位法则是通过测试工作电极与参比电极之间所形成的电位差来对钢筋混凝土的腐蚀情况进行准确描述的一种方法。当半电池电位值大于-200MV时表示钢筋锈蚀的概率小于10%,而当电位值小于-350MV时,则表示该区域钢筋发生腐蚀的概率会达到90%以上;另外,混凝土电阻率法则以四电极法测定测得电阻率大小,电阻率越小说明混凝土抵抗离子渗透的能力就越差,在沿海氯盐侵蚀环境下,因氯离子而导致的钢筋锈蚀比碳化所带来的腐蚀要迅速得多,同时也会使结构的承载力降低得更加明显。进行电化学检测时一定要保持混凝土表面干燥且干净、仪器接触部位钢筋以及待测钢筋相连通,电位数值要保持相对平稳^[1]。定量检测的同时还可以测定钢筋锈蚀电流以及混凝土的电阻率等等,总体来说判定结果应该从裂缝宽度、混凝土保护层厚度等多方面一起考虑。

1.4 裂缝检测

混凝土裂缝是最为普遍的病害种类之一,其同时也是造成碳化和钢筋锈蚀发展的途径。裂缝现场检测分为长度测定、宽度测定以及深度测定三项。宽度的测定根据的是GB/T50344-2019的规定,用的是裂缝显微镜法,在宽度测定过程中需把裂缝显微镜的两根针尖指向所要测定的裂缝上,并使裂缝与刻度基准线保持垂直状态,而深度则是通过超声波法或者电磁涡流法来进行测试的,超声波法中使用的频率为2~5MHz之间,准确度能达到±5%左右。

桥梁裂缝可分为两种,一种是浅裂缝,也就是只位于构件表面,开裂程度小于等于500mm;另一种就是深裂缝,它的开裂程度已经大于等于500mm了。统计裂缝检测的数据以及注意裂缝宽度的发展变化与裂缝的增长情况,有利于了解结构承受的压力和破坏程度。

1.5 无损检测技术

新的无损检测方法快捷,低成本并且不会对桥梁产生二次破坏,成为质量评估的一个新趋势。采用超声波、红外热成像仪、地质雷达,建立包括结构完好性、耐久性和承载力在内的多层次的质量评估标准以及相应的综合评估方法。红外热成像可以通过比较被碳化的部分与未被碳化的部分之间的温度差来进行快速的大范围扫描;雷达可以利用雷达信号在不同介质中传播的速度的不同来对保护层的厚度以及混凝土内的缺陷进行准确测量。混凝土桥梁病害裂缝、蜂窝、孔洞和空心病害的存在不仅损害了桥梁的耐久性,而且还存在行车安全隐患,新发展的非破损检测为这些隐患带来了更为简易有效的解决方案。实际中要根据需要采用多种不同的无损检测方法形成互为补充,提高检测数据分析精度。

2 公路桥梁劣化评估方法

2.1 劣化等级划分

劣化等级分级是对于桥梁耐久性判断的前提,主要参考的是对检测结果同规范指标相比较。《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21)2011年版是针对构件、部件以及部位进行叠加评分的方式,对桥梁的技术状况做出划分,有五个不同的级别。而2026年的报批稿细化为以上细部破损评价为基础的分类系统,在此基础上增加了专门的“构件耐久性缺损评定”的部分,在此基础上从耐久性缺损、功能性破损、结构受损伤及损害影响程度扩大的方面做出全方位综合判定,使得各等级间的差异更为显著。为方便在工程施工过程中根据实验数据对损坏程度进行分级,本文整理了桥梁损坏等级划分标准见表1。

该系统强调部件权重以及边界精确化,完成了由“有没有损坏”向“功能是否完善”的转变,对缺陷处理有了更清晰的方向。

2.2 劣化影响因素分析

桥梁结构老化影响的因素十分繁杂,在环境因素、材料因素以及荷载因素方面都要综合考虑。混凝土碳化速率取决于CO₂含量、相对湿度、水胶比以及材质等众多因素,水灰比越大,碳化深度越大,水泥用量越多,混凝土碳化程度越低;相对湿度越小,混凝土碳化程度也越低。荷载以及环境因素对桥梁的设计耐久性的参数设置有误或者

表 1 公路桥梁劣化等级划分标准

劣化等级	劣化状态描述	碳化深度/保护层比	钢筋锈蚀电位 (mV)	裂缝宽度 (mm)	建议处理措施
I类	无可见劣化, 钢筋完好	≤0.3	>-200	<0.05	正常保养或预防性养护
II类	轻微碳化或局部色差	0.3~0.6	-200~-300	0.05~0.10	加强预防性养护
III类	碳化接近钢筋, 局部锈斑	0.6~0.9	-300~-400	0.10~0.20	开展修复性养护
IV类	碳化超出保护层, 锈蚀明显	0.9~1.2	-400~-500	0.20~0.30	加固改造, 必要时交通管制
V类	保护层剥落, 钢筋截面损失显著	>1.2	<-500	>0.30	封闭交通, 拆除重建

施工过程中养护不当都会使碳化与锈蚀相互叠加, 加快桥梁损耗^[2]。氯离子侵蚀在含有融雪剂或处于海洋中的桥梁中表现也很突出, 所造成的钢筋腐蚀速率远远高于碳化腐蚀。另外构件开裂、保护层厚度变化等混凝土施工缺陷也会打乱混凝土的碳化与锈蚀的关系, 促使钢筋加速去钝化以及降低其力学性能指标。

2.3 桥梁耐久性评价方法

目前国内外桥梁耐久性评估方式主要有四种: 外观观察法、荷载测试法、规范判定法以及可靠度计算法, 根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011) 的规定, 从缺损状况检验、材料状况及检测状态参数检验、结构计算检验三个方面对桥梁承载能力做出评估, 在外部检查阶段已经确定了构件腐蚀、碳化损伤的位置之后再通过实验室现场测定材料强度、钢筋锈蚀电位以及混凝土氯离子扩散系数来进行承载力退化系数调整, 并进而比较抗力和荷载效应。另外, 采取分层次评估和单项指标控制相结合的策略, 可以得到构件、桥孔以及全桥的整体性能评分 (BCI)。使用以持续状态为基础的设计准则的极限状态法来对桥梁不同残余寿命状态下进行安全性可靠性分析, 在一定程度上也可以为桥梁加固方案的选择提供量化可靠的科学参考。

2.4 劣化发展趋势分析

精确地掌握劣化演变趋势, 是对进行预防性维护以及确定施加干预的最佳时机的技术要求。混凝土碳化程度与使用年限的平方根接近成直线的关系, 碳化速度的快慢就依赖于混凝土本身微细孔隙量大小、保护层厚薄及环境中的相对空气湿度等条件来决定。在检测观测中加入腐蚀电流密度、锈迹扩展速度及截面面积损耗比率等多个变量参数, 可以得出若干个时间节点上的钢筋锈蚀累积趋势曲线以及混凝土开裂预报公式。目前随着结构健康监测系统的逐步完善, 利用健康监测系统采集到的压力值数据、风向流速数值、周围环境温湿度值以及结构内力实时变化情况的数据都可用于对桥梁的状态实现智能化管理及预警监控。检测数据对于桥梁超限警报、应急处置以及保养工作有重

要意义。一旦系统提示碳化深度超过保护层就需及时留意钢筋锈蚀并且通过报警来进行防腐及补修等处理, 从根本上提高结构耐久年限。

3 公路桥梁耐久性提升措施

3.1 提高施工质量

施工品质是影响桥梁寿命的关键因素, 在源头上要做好把关工作。加强对砼配合比、搅拌质量的管理, 防止因水灰比过高引起骨料间隙率太大而造成密实性差的问题; 搅拌均匀度也要加以重视, 搅拌时间不能低于 120s 以保证混合物中有足够的水来填充水泥石之间的空隙; 通过有效的手段进行保护层垫块定位精度以及垫块自身的稳固性, 从根本上减少保护层厚度变异系数; 现浇梁砼要有充足的保湿养护期, 砼浇筑完毕后要尽快地对其表面进行覆盖浇水养护, 防止因养护不足而出现的早期开裂及表层起粉问题; 振捣时单个振点的振捣时间约为 20~30s, 防止因振捣不足或过度而导致砼内部分布不均及分层离析情况发生。

3.2 加强材料质量控制

材料的质量也影响到桥梁结构的耐久年限, 在以干湿循环和碳化为主要侵蚀因素的桥梁中, 可以选择低水化热的碱性硅酸盐水泥。粗细骨料需要符合级配标准, S 含量以及含泥量都要在一定的范围内。加入适量的粉煤灰、矿渣粉等矿物掺和料可以改善混凝土的孔隙结构并且减慢碳化的速度。复合添加了粉煤灰和矿渣的情况下高性能混凝土的耐久性有了很大的提高, 在粉煤灰和矿渣的比例是 8:2 的时候抵抗碳化的能力最强。钢筋的表面可预先采用环氧涂层或者镀一层锌质保护层来增加其防锈能力^[3]。要依据使用目的及施工方法选择高效减水剂和引气剂, 在施工过程中还应该注意对材料中的氯离子含量加以调控, 保证材料的化学稳定性以及电化学相容性等等。

3.3 完善桥梁养护管理

健全养护管理体系是保证桥梁可持续服役能力的基础。对于劣化程度达到三、四级的桥梁应该结合病害特点及等级别进行区别化维修养护方案, 实行规范化检测并且

加快损伤构件定期检测频率,在此基础上需详细记载好裂缝扩展以及混凝土碳化情况等信息。做到基层养护部门和上级管理部门的信息一致化存档。对四五级病害桥梁要及时开展大修加固设计工作,2026 版报批稿中新增加了维修加固构造本身评价一节内容,解决了原来旧标准中缺乏的相关行业需求问题。对于钢筋腐蚀环境敏感部位,适时采取可靠的防腐措施,在剩余耐久年限的基础上选用合适的混凝土维修以及表面覆盖材料,使桥梁的运行功能及寿命得到整体提高。

3.4 建立长期监测机制

构建结构长期健康监测是我国不断提高耐久性管理能力的一个必然趋势,在新建桥梁的设计时,应该合理地设置一些耐久性传感器检测点,包括对混凝土内部的温湿度,PH 值以及重要受力区的钢筋锈蚀电位都要实行长期观测,并且用作诊断目的的传感器要能有良好的持久性和连续性,以便获取最接近实际的多元化的动态资讯,对于在役桥梁来说则要依据其等级评定以及环境影响程度的不同来配置适当的模块化检测设备,周期性地测量碳化深度与氯离子含量等参数。而在桥结构健康监测技术规范(JT/T 1037-2022)以及最新的行业指导中都明确了监测系统的建立、数据分析模型构建以及养护措施制定的具体技术标准^[4]。把长期采集的数据有条不紊地导入到省市级或者区县级数字化桥梁养护平台,可以做到用大数据支持桥梁耐久性的风险评估及预防维修措施。

4 结语

道路桥梁耐久性试验检测及老化评价对于保证桥梁的安全运行并进行合理的维护有着十分重要的意义,文章

主要介绍了混凝土强度、混凝土碳化深度、混凝土结构中的钢筋锈蚀程度以及裂缝的检测等耐久性试验的检测技术,在劣化等级分类、影响因素、耐久性评定及发展趋势四个方面讨论了劣化的评定方式,并提出了针对建设质量、材料管控、养护管理以及长期观测四个方面的耐久性的改进办法,抗碳化设计指标、环保型混凝土配合比的应用可以在工程建设过程中取得较好的碳化抑制效果,施工期间的保护层厚度控制和振捣养护直接影响到现场的耐久性状况。《公路桥梁技术状况评定标准》2026 送审稿中有关养护分组以及评判标准的不断改善,使得科学研判有了更加准确的数据基础,在超声波-红外成像-地质雷达等多种方法联合测试及健康监测系统日趋完善的情况下,大数据背景下跨行业联动势必促使公路桥梁耐久性试验及损坏程度判定走向集成化、即时化以及全寿命周期管理的趋势。

[参考文献]

- [1]姜锋.公路桥梁混凝土结构耐久性设计与优化[J].四川建筑,2026,46(1):59-60.
 - [2]准鑫,温学桢.公路桥梁安全性与耐久性提升策略研究[J].运输经理世界,2026(6):130-132.
 - [3]刘铭.公路桥梁设计的安全性和耐久性研究[J].运输经理世界,2025(36):54-56.
 - [4]高万虎.公路桥梁设计中的安全性和耐久性问题分析[J].建材发展导向,2025,23(16):28-30.
- 作者简介: 阳枝萍(1993—),毕业于重庆师范大学涉外商贸学院国际金融专业,中级工程师,现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。