

公路桥梁无损检测技术在质量评定中的应用研究

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不断地遭受着结构劣化的侵蚀，在传统的破损检测中费时费力并且会造成一定的结构损失。无损检测手段以其快速、无损、成本低廉的特点成为桥梁质量检验的一项重要方式，文章详细介绍了回弹法、超声波法、超声回弹综合法、雷达检测以及红外热成像检测五种目前较为常用的无损检测方式的工作机理及其特点，探讨了检测中存在的仪器校准不准、外界因素影响等问题，并结合实际应用情况对其在混凝土强度检测、裂缝检测、钢筋锈蚀检测以及结构安全性评估中的应用进行了阐述，最后提出仪器管理、检测过程规范化、数据标准化等一系列的质量把控策略，以期为公路桥梁的无损检测提供借鉴。

[关键词]公路桥梁；无损检测；质量评定；回弹法；红外热成像

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20233

中图分类号: U445

文献标识码: A

Research on the Application of Non-destructive Testing Technology for Highway Bridges in Quality Assessment

YANG Zhiping

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

Abstract: Highway bridges constantly suffer from structural degradation during their service life, which is time-consuming and laborious in traditional damage detection and can cause certain structural losses. non-destructive testing methods have become an important way of bridge quality inspection due to their fast, non-destructive, and low-cost characteristics. This article provides a detailed introduction to the working mechanisms and characteristics of five commonly used non-destructive testing methods, including rebound method, ultrasonic method, ultrasonic rebound comprehensive method, radar detection, and infrared thermal imaging detection. The problems of instrument calibration inaccuracy and external factors in testing are discussed, and their applications in concrete strength testing, crack detection, steel corrosion detection, and structural safety assessment are elaborated based on practical application situations. Finally, a series of quality control strategies such as instrument management, standardization of testing processes, and data standardization are proposed to provide reference for non-destructive testing of highway bridges.

Keywords: highway bridges; non-destructive testing; quality assessment; rebound method; infrared thermography

引言

伴随着我国公路桥梁服役年限的增长以及混凝土碳化、钢筋锈蚀等一系列耐久性问题愈加明显，据调查，全国大约有 15% 的桥梁的技术状况属于“需重点关切”，传统检测方式主要是通过肉眼观察以及破坏性的钻芯取样来实现，其弊端在于耗时较长、缺乏针对性、会对结构造成破坏等；选择超声波无损检测技术、红外热成像技术和地质雷达技术建立一种涵盖结构完好度、耐久性和承载力的复合式质量评估指标系统及综合评分模型，混凝土抗压强度检测技术规程（DBJ50/T-195-2025）包括了回弹法、

超声回弹综合法、钻芯法和钻芯修正法等多种检测试验方法。无损检测技术无需对结构造成损伤就可以迅速得到混凝土强度以及内部质量问题、钢筋腐蚀程度等重要指标，已经成为桥梁质量评价的主要方法。《公路桥梁技术状况评定标准》2026 年版草案（JTG/T 52XX—2026）把评价重点由以往的“全面评判”转变为现在的“精确分析、分段处理”，并且加入了新的概念：“构件耐久性损伤鉴定”。这为无损检测结果应用于分级维修系统提供了更好的参考标准。无人机、智能化巡查等新设备的应用正在使无损检测向着远程化及智慧化的趋势不断发展着。

1 公路桥梁常用无损检测技术

1.1 回弹法检测技术

回弹法是现在常用的用于检测混凝土强度的一种无损检测的方法。它的基本思想是通过弹簧带动重锤撞击混凝土表面并从回弹数值计算出混凝土的抗压强度。回弹法简单方便灵活便于携带可以对大面积进行强度的测定速度快费用低。回弹法已经成为混凝土结构强度的主要依靠,对于加强混凝土的质量检测起到了很大的作用,但是当要检测 C50 以上高强度混凝土时需要采用的是标称能量为 5.5J 的重力回弹仪并且最好参照《高强混凝土强度检测技术规程》(JGJ/T 294-2013)。测试时应在洛氏硬度 60 ± 2 的钢砧上进行校准,校准值需要是 80 ± 2 ,还要测定碳化深度以调整回弹值,在每个测试区域碳化深度测量结果要准确到 0.5mm。

1.2 超声波检测技术

超声波检测技术利用超声波在混凝土中传播的时间长短来判定其内部状况;当声波在遇到裂缝或空隙等缺陷处会产生反射或衰减现象,在超声波探伤仪上显示不同的波速、波幅和波形从而可以确定出缺陷的位置以及大小情况。而地质雷达适合大面积空洞探测,超声波更擅长于裂缝深度的检测。用超声波探测裂缝深度的方法是:将探头接收和发射对称设置在裂缝两边,然后通过测量其声时差以确定裂缝的宽度,在裂缝大于 500MM 时需要使用低频探头。也可以用来做混凝土内部均匀性检查以及施工质量的过程控制,在布点的时候尽量远离钢筋位置以免造成声速受到金属的影响等。

1.3 超声回弹综合检测技术

超声回弹复合法是把超声波检测和回弹法结合起来,在同一时间测量声速和回弹值两种物理参数,通过二元回归方程计算强度。它克服了单独使用回弹法易受碳化影响较大,单独使用超声法易受含水率影响较大的问题,大幅度提升了检测精度。超声回弹综合法对混凝土强度进行检测的优点是:检测的技术水平要求高、应用面广,受到了

工程界的一致好评^[1]。这一规定从 2020 年 12 月 1 日起实施,被广泛运用到建筑、铁路、公路、桥梁、水电站、港口等工程中,使用该方法的时候要保证被测混凝土的表面没有缺陷,内部也没有孔洞,同时混凝土强度不能大于 70Mpa。在同一测试区域里首先要完成回弹检测之后再超声检测,防止超声耦合剂对回弹值产生干扰。

1.4 雷达检测技术

雷达检测方法采用高频率电磁波对混凝土进行照射,在遇到钢筋、空洞等地质界面之后会反射回设备中,通过测量反射波的传播距离以及振幅特性来判断内部的具体情况。全自动化雷达数据分析模型可以精确地达到 98% 的成功率找到钢筋的位置,对振幅的数据做了归一化并且进行了分类,产生出腐蚀分布图。雷达扫描可以同时识别出钢筋的位置,还有保护层厚度,内部的空洞等多个方面的目标,扫描效率高、图像清晰,适合大面积的调查。进行检测的时候天线中心的频率选择 900MHz~2GHz 左右,探测的距离一般在 20~50cm 之间。数据分析要结合现场取芯验证,解除多解性的可能。

1.5 红外热成像检测技术

红外热成像检测方法通过对混凝土表面温度进行无损测量,利用表面温度变化来推测混凝土内部存在的问题,如裂缝,脱空,漏水等问题会使混凝土导热率降低而引起表面温度异常,热像仪可以捕捉到这一细微的变化从而绘制成热谱图。红外热成像可以及时发现混凝土表面的问题。最新的方法是采用局部自适应阈值分割以及支持向量机的方式,可以准确识别出三种类型的缺陷,并且对于钢筋锈蚀探测可达 92.3%,红外热成像摄像设备安装在无人机上对桥梁进行远距离监测,大大提高检测的速度与安全性,在检测时最好选择晴朗的一天或者是夜晚的时候,这样可以使温差更大。为了使大家能够直观地看到比较出五类技术的特点,这里把各个技术进行总结整理如下,如表 1 所示:

表 1 公路桥梁常用无损检测技术综合对比

检测方法	检测原理	主要检测内容	优点	局限性	适用场景
回弹法	表面硬度推算强度	混凝土强度	快速、简便、成本低	受碳化影响大,仅反映表层	大面积强度普查
超声波法	声速评估内部质量	裂缝深度、内部缺陷	反映内部质量,精度较高	受钢筋、含水率干扰	内部缺陷定位
超声回弹综合法	声速+硬度综合推定	混凝土强度	精度优于单一回弹法	操作较复杂	中等精度强度检测
雷达法	电磁波反射成像	钢筋位置、保护层厚度、空洞	成像直观,定位准确	设备昂贵,潮湿环境干扰大	隐蔽病害快速普查
红外热成像法	表面温度差异成像	裂缝、脱空、锈蚀	非接触、大面积快速扫描	受环境温度影响	桥面铺装、支座检测

2 公路桥梁无损检测中的常见问题

在公路桥梁无损检测的应用中,有许多导致检测结果偏差的原因。一方面仪器设备管理和标定不够严谨,很多检测机构对回弹仪及超声仪等仪器设备未做定期校验,出现了回弹仪校准不合格、超声仪测试前声时校准滞后的情况。根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)要求,回弹仪需在使用之前在钢砧上进行率定,其校准值应在 80 ± 2 之间。另一方面现场检测环境把控不足,在现场进行超声波检测过程中探头与混凝土表面间有空隙会导致声速测定出现误差,在潮湿环境下用雷达法检测容易受到信号干扰,在阳光强烈和大风天气下用红外热成像法也会产生较大偏差。技术尚存不足之处:潮湿条件下会影响雷达信号,多层次钢筋容易造成特征重叠等。第三点检测人员的专业技能水平以及数据分析的能力层次不一,红外热像仪法、雷达法需要较高的专业知识,其结果判断具有一定的主观性,彼此之间没有进行相互校验的方法^[2]。将超声波、红外热成像以及地质雷达技术相集成的数据采集及处理系统能较好地解决多源信息的整合与分析问题。

3 无损检测技术在桥梁质量评定中的应用

3.1 混凝土强度评定

混凝土强度作为桥梁工程质量的主要指标,在施工阶段的质量检查以及桥梁竣工后的质量检查过程中一般采用回弹法或者超声回弹综合法对墩柱、盖梁、梁板等重要结构进行全面性的混凝土强度检测。检测前在各结构上设置不少于 10 个测区,每个测区读取 16 个回弹值,去掉三个最大值和最小值计算其平均值,最后根据碳化深度进行修正。采用钻孔取芯进行回弹法结果修正,可以有效提高检测精度。对于强度推定值接近设计规定的构件,增设钻孔取芯方法检测,芯样直径不应小于 70mm,高径比宜为 1:1。以无损检测原理为基础对混凝土结构路桥施工质量进行评价,通过对混凝土结构强度检测结果来了解其安全富余量的情况,在《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21-2011)里,混凝土结构强度检测结果与设计强度比值作为判别构件缺损程度的一项重要指标。

3.2 裂缝与缺陷检测

超声波法在对裂缝深度进行测量时有明显优点,在接收、发射探头相对设置在裂缝两侧,用声时差测出裂缝深度;如果裂缝中有水存在,则要对速度进行校正。对于桥面铺装脱空以及内部空洞,利用地质雷达的效果较好,雷达断面图上的反射异常现象可以显示出缺陷的位置及大小。无损检测技术用于道路桥梁检测方法的研究以 A 大

桥为例,对无损检测技术中的地质雷达,超声波及红外热成像技术使用情况做了介绍并提出结合使用的改进措施。红外热像仪通过温度变化迅速判断出脱空位置,在大范围桥面铺装层进行初步排查时适合使用热激励方法加大温差对比^[3],对于裂缝宽度测量可以使用裂缝显微镜,可以达到 0.01mm 的精度,而裂缝长度及分布情况使用卷尺以及观测记录的方式。

3.3 钢筋锈蚀检测

钢筋锈蚀也是影响桥梁耐久性的主要问题之一,直接影响到结构的安全可靠程度。雷达法利用的是通过分析雷达波对钢筋表面的反射特性从而识别出钢筋的位置以及腐蚀情况的基本判断方法,而钢筋锈蚀会使反射雷达波信号强度下降并且产生相反相位的现象。自动化探地雷达数据分析的方法拥有优秀的钢筋探测和腐蚀扫描能力,准确度、召回率都达到了 98% 以上。红外热成像技术是借助观察混凝土开裂处或者钢筋锈蚀处的温差来迅速形成图像进行评定,在检测时可以对高风险的桥梁结合两个技术进行每年一次的纵向比较观测,积累相应的锈蚀发展数据。半电池电位法可以作为一种参考方法,在电位小于等于 -350mV 的时候说明腐蚀可能性大于 90%。

3.4 桥梁结构安全评定

桥梁整个体系的安全评估是在各种无损检测的结果基础上做的重要评估过程。在这个过程中要把混凝土强度、钢筋锈蚀程度、裂缝严重指数等指标融入到结构计算理论中去,在通过一些具体实例进行分析研究以及现场观察还有对比实验的方法来探讨无损检测应用于公路桥梁工程质量鉴定的实际应用情况,对无损检测的影响因素、结果精确度的影响因素和技术有效性判断标准进行了相关的理论分析。回弹法测得的强度系数代表材料的真实状态,雷达与红外热图联合探测的钢筋位置和锈蚀程度为判断承重安全系数提供参考信息。依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)引入承载力检算系数和劣化系数对极限状态方程做调整。新研发出来的“智能化桥梁检测系统”,使用无人机、探地雷达、红外热成像三者相结合代替人工作业检测,采集桥梁外部与内部结构完整信息,极大地提高了对桥梁现状精准度判定的能力。

4 公路桥梁无损检测质量控制措施

提升高速公路桥梁无损检测水平需要做整体性的应对方案。一是强化仪器设备的管理和保养,严格按照回弹仪的钢砧率定以及超声检测仪的声时标定的要求实施,使仪器保持在检验周期内正常使用状态;雷达天线和红外热像仪应当制定检测年度计划,每次检测前后都要进行功能

性的检验并且进行记录；二是规范现场测试程序，统一混凝土表面处理方法，去除表面的浮浆以及油渍还有疏松部分，保证探头能够良好地贴合在混凝土上，达到良好地耦合效果，在潮湿或者温度变化较大的条件下检测时采用背景校正及温湿度补偿办法。选择超声波、红外热成像、地质雷达等无损检测方法，在此基础上建立了综合结构整体性、耐久性和力学性能的质量检测指标体系并研制出了多源数据收集及分析处理平台^[4]。三是提高检测数据分析的规范化程度，创建多种检测手段相互校验的方法，通过对回弹法测试结果和钻芯取样法进行对比，通过使用雷达探测结果对重要部位进行零点复检的方式来进行数据校正。四是加强对检测人员的操作技能培训，使其能够灵活运用多种无损检测手段相组合的技术检测方法，定期组织相互检测对比实验以及操作练习。最后，建立起桥梁质量评估的信息化管理系统，用动态数据库来保存监测信息，以数据汇总及数据分析，完成从监测到养护方案的一整套质量管理。

5 结语

公路桥梁无损检测技术是保证桥梁结构安全、进行质量检验评价的主要手段之一。文章详细讲述了回弹法、超声波法、超声回弹综合法、雷达检测法以及红外热成像检测法五种常用的无损检测方法的基本原理和技术特色，指出了检测过程中存在的仪器标定不当、环境因素影响、操作人员素质低等问题，在混凝土强度验证、裂纹及病害检测、

钢筋锈蚀程度检验、结构安全性检查四个方面分别提出了具体的检测方案，并对仪器管理、程序规定、结果指标、人才培养、信息化档案建立等方面提出相应的质量管理对策。研究指出，回弹法以及超声回弹综合法可用于大面积普查混凝土强度，超声波法和雷达法用于检查内部缺陷以及钢筋分布情况，红外热成像法用于快速查找表面缺陷和隐蔽性损伤，多种检测方式联用以及数据融合可以更好地保证检测结果的完整、准确。伴随着无人机巡检，雷达智能解析、人工智能分析等一系列新技术的应用，无损检测技术正在向着远程化、智能化、数据驱动化的趋势发展，未来必将在公路桥梁全寿命期管理领域扮演着越来越重要的角色。

[参考文献]

- [1]张瑞嘉,马建杰.公路桥梁检测中的无损探伤技术应用[J].智慧中国,2025(11):67-68.
- [2]刘孝奇.公路桥梁检测无损检测技术应用[J].中国水运,2025(6):121-131.
- [3]宋宏旭.无损检测技术在公路桥梁安全评估中的应用[J].汽车画刊,2025(5):188-190.
- [4]张永红.无损检测技术在公路桥梁检测中的应用[J].交通世界,2024(1):229-231.

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。