

混凝土耐久性的无损检测方法 with 评估

施文红*

(南通市通佳工程质量检测有限公司, 南通 226001)

摘要: 本文综述了混凝土结构的无损检测技术及其在评估混凝土耐久性方面的重要性。随着基础设施的老化, 快速、精准地评估和维护混凝土结构的需求日益增长, 无损检测技术因其不破坏结构且能提供准确评估而备受重视。文章介绍了主要的无损检测方法, 包括超声波检测、电磁波检测和放射性检测, 并详细讨论了这些技术在实际工程中的应用效果。各技术的优缺点也进行了比较分析。未来, 随着智能化、集成化和便携性的发展, 无损检测技术将进一步提升检测效率和准确性, 广泛应用于基础设施的长期监测中, 为延长结构使用寿命、降低维护成本提供技术支持。
关键词: 混凝土; 无损检测技术; 超声波检测; 电磁波检测

Nondestructive testing method and evaluation of concrete durability

SHI Wen-Hong*

(Nantong Tongjia Engineering Quality Testing Co., Ltd., Nantong 226001, China)

ABSTRACT: This article summarizes the non-destructive testing techniques for concrete structures and their importance in evaluating the durability of concrete. With the aging of infrastructure, the demand for rapid and accurate evaluation and maintenance of concrete structures is increasing. Non destructive testing technology is highly valued for its ability to provide accurate evaluations without damaging the structure. The article introduces the main non-destructive testing methods, including ultrasonic testing, electromagnetic wave testing, and radiometric testing, and discusses in detail the application effects of these technologies in practical engineering. The advantages and disadvantages of each technology were also compared and analyzed. In the future, with the development of intelligence, integration, and portability, non-destructive testing technology will further improve detection efficiency and accuracy, and be widely used in long-term monitoring of infrastructure, providing technical support for extending the service life of structures and reducing maintenance costs.

KEY WORDS: concrete; non-destructive testing technology; ultrasonic detection; electromagnetic wave detection

0 引言

混凝土作为现代建筑和基础设施的主要建筑材料, 其耐久性直接关系到结构的安全性和使用寿命。混凝土由水泥、细骨料、粗骨料和水组成, 通常添加掺和材料, 设计抗压强度在 20~50 MPa, 孔隙率为 12%~18%^[1]。适量的孔隙可提高延性和抗断裂能力, 但过高的孔隙率会降低抗压强度。在固化过程中, 温湿度变化会导致体积变化, 需控制施工和养护以减少裂缝^[2]。混凝土耐久性受环境和结构设计影响, 如碳化会降低 pH 值并腐蚀钢筋, 冻融循环会引发微裂缝, 逐步损害结构完整性^[3]。近年来, 随着技术的进步, 无损检测技术在评估和维护混凝土结构中显示出其独特的优势。这些技术能够在不破坏或影响结构服务状态的前提下, 准确地评估结构的内在状况, 识别潜在的损伤和退化问题。因此, 深入探讨和优化这些无损检测技术, 对于提高结构评估的效率和准确性, 延长结构的服务寿命具有

重要意义。本文的研究目的是探讨混凝土耐久性的无损检测方法, 旨在提升对混凝土结构内部状态的评估准确性和效率。通过研究不同无损检测技术的应用, 优化现有检测手段, 能够在不破坏结构的前提下, 及时发现潜在的损伤和劣化问题, 确保结构的长期安全性与稳定性。本文的研究具有重要意义, 不仅能够为混凝土结构的维护和修复提供可靠依据, 还能延长其使用寿命, 减少维护成本, 提升基础设施的整体使用效益。

1 无损检测技术的概述

1.1 超声波检测

超声波检测 (ultrasonic testing, UT) 技术通过使用高频声波来探测混凝土和其他复合材料中的内部缺陷。该技术涉及发射超声波脉冲到材料中, 然后测量从缺陷如裂缝或空洞处反射回来的波的强度和时延^[4]。通过分析这些超声波的传播和反射特性, 可以确定缺陷的位置、大小及性质。超声波的频率选择

* 通信作者: 施文红, 高级工程师, 研究方向为市政检测、建筑工程及检测。E-mail: 2357817946@qq.com

* Corresponding author: SHI Wen-Hong, Senior Engineer, Nantong Tongjia Engineering Quality Testing Co., Ltd., Nantong 226001, China. E-mail: 2357817946@qq.com

通常基于混凝土的类型和检测深度,常用的频率范围是 50 kHz 到 500 kHz,这使得该技术在不同的混凝土条件下均能有效工作^[5]。在应用方面,超声波检测已经成为评估大型混凝土结构如桥梁、隧道以及建筑物的完整性和安全性的重要工具。

1.2 电磁波检测

电磁波检测 (electromagnetic testing, ET) 技术基于电磁感应原理,通过向混凝土结构中发送电磁波并分析其传播特性来探测内部的钢筋腐蚀和其他金属异物。这种技术依赖于电磁场与金属对象之间的相互作用,金属对象会改变周围电磁场的分布,从而通过检测设备的感应线圈被探测到。电磁波的典型频率范围从几千赫兹到几百兆赫兹,使得这种技术可以适用于从表面到深层的不同检测需求^[6]。在实际应用中,电磁波检测技术常用于评估混凝土中的钢筋分布和腐蚀状态,特别是在海洋和盐碱环境中的基础设施。

1.3 放射性检测

放射性检测 (radiographic testing, RT) 技术通过使用高穿透力的 γ 射线或 X 射线探测混凝土结构内部的缺陷。射线在穿过混凝土结构时,不同密度和厚度的材料会造成不同程度的射线衰减。通过检测射线穿透后的强度^[7],可以构建出材料内部的密度分布图像,从而识别裂缝、孔洞、异物等内部结构的异常。放射性检测在混凝土结构中的应用非常广泛,尤其是在评估复杂或重要结构的内部完整性时^[2]。

2 无损检测各种方法的应用及效果评估

2.1 超声波检测

超声波检测 (UT) 作为一种评估混凝土结构内部完整性的先进技术,广泛应用于检测混凝土中的裂缝、空洞及其他结构缺陷^[8]。该技术利用高频声波在材料中的传播特性,通过分析声波的反射和衰减,来定位和量化内部缺陷。超声波检测特别适用于深层结构分析,能够提供比传统检测更深入、更精确的信息^[9]。

在典型应用案例中,某检测团队对一座拥有百年历史的桥梁进行了超声波检测,这座桥梁位于一个多雨的沿海地区,长期受到潮湿气候和盐雾的影响,导致其混凝土结构和内部钢筋持续经历化学和物理腐蚀。为了全面评估桥梁的当前状态并预测其未来的维护需求,团队采用了一种特别设计的超声波设备,该设备配置了 100 kHz 的探头,能够深入探测混凝土结构内部,捕捉到细小裂缝和腐蚀的早期迹象。

通过超声波检测,技术人员发现了多个裂缝,其中最严重的裂缝宽度达到 4 mm,长度超过 30 cm。这种裂缝的大小在结构安全评估中被认为是严重的,可能会影响桥梁的整体稳定性和安全性。这些裂缝主要集中在水平和垂直接合部,通常是水分和化学物质最容易聚集和渗透的区域。长期的水分渗透导致了内部钢筋的腐蚀和混凝土结构的逐渐劣化。超声波检测结果见表 1。

表 1 超声波检测结果
Table 1 Ultrasonic testing results

检测区域	裂缝位置	裂缝宽度 (mm)	裂缝长度 (cm)	超声波传播速度 (m/s)
支撑结构	接近底部	4.0	30	3200
接合部	中部	2.5	15	3100
桥面	边缘	1.0	10	3300

2.2 电磁波检测

电磁波检测 (ET) 作为一种有效的无损检测技术,广泛应用于评估混凝土中钢筋的布置和腐蚀状况^[10]。这项技术利用电磁场变化来探测钢筋内部的电导率和磁导率变化,从而判断腐蚀程

度和钢筋的完整性。ET 尤其适合于快速检测大面积的混凝土结构,如桥梁和隧道,能够有效地定位钢筋的腐蚀部位和程度^[11]。

在具体的案例研究中,电磁波检测技术被精心选用来评估一座历史悠久的公路桥在沿海高盐雾环境下的钢筋腐蚀状况。这座桥梁因其独特的地理位置和恶劣的环境条件,面临着严重的腐蚀威胁^[12]。为了确保桥梁的结构安全和延长其使用寿命,进行了这次详尽的电磁波检测。检测团队配置了先进的电磁波扫描装置,这种装置能够在 100 MHz 的高频率下工作,提供足够的穿透力和分辨率,以详细映射和定位钢筋中的腐蚀区域。

结果表明,电磁波检测能够精确地识别出桥梁中钢筋的腐蚀区域,并详细描绘腐蚀分布的地理图谱。电磁波检测在桥梁的接缝和支座附近发现了特别严重的腐蚀情况,这些区域由于受到结构应力集中和环境侵蚀的双重影响,成为腐蚀加速的高风险区域^[3]。在桥梁的不同部位,电磁波检测揭示了腐蚀的不均匀分布,这对于制定维护策略和优先级排序至关重要,电磁波检测 (ET) 结果见表 2。

表 2 电磁波检测结果
Table 2 Electromagnetic testing results

检测区域	腐蚀程度	备注
接缝区	高	接缝区由于结构设计容易积水,腐蚀情况比较严重
支座区	中到高	支座受力较大,腐蚀加速
桥面中部	低	桥面长期暴露,但由于排水良好,腐蚀较轻
桥头	中	桥头接触地面,受地面水影响发生腐蚀

2.3 放射性检测

放射性检测 (RT),利用 X 射线或 γ 射线的高穿透能力,已成为混凝土结构中检测密实性、裂缝、孔洞及异物位置的关键技术。RT 的能力在于提供详细的内部图像,这对于评估大体积或结构复杂的混凝土构件尤为重要。此技术特别适合于深度和精度要求高的检测任务,因为其不受混凝土组成的限制,能够清晰地显示内部结构的细节。

在案例应用中,放射性检测技术被用于评估一座具有百年历史的大型水坝的结构安全性。这座水坝不仅因其年久失修而面临潜在的安全隐患,更重要的是,它位于一个地质活动频繁的区域,频繁的地震和地质运动对水坝的稳定性构成了持续威胁。因此,对该水坝进行定期和详细的结构监测,尤其是内部结构的完整性评估,成了确保其长期安全运营的关键。为此,检测团队选择了伽马射线技术进行检测。

案例的结果揭示了一些重大且关键的结构问题,这些问题对水坝的整体安全性构成了潜在威胁。通过放射性检测,检测团队不仅成功地识别了水坝深层的裂缝和空洞,还精确定位了因地质活动引起的新的结构薄弱点。这些薄弱点通常出现在应力集中区域,尤其是在水坝的承重结构和地基接触部分,可能会在未来的地震或其他地质事件中发展成更严重的结构损伤。放射性检测 (RT) 结果见表 3。

表 3 放射性检测结果
Table 3 Radiographic testing results

检测区域	缺陷类型	缺陷大小 (cm)	位置深度 (m)	备注
中心承载墙	深层裂缝	长度 150, 宽度 5	4.5	可能引发进步的裂缝扩展
侧翼墙	空洞	直径 70	3.0	需要填充以防止水渗透
基础	结构薄弱点	区域性	2.5	地质活动影响较显著

2.4 三种无损检测效果对比与综合评估

结合多种无损检测 (NDT) 方法进行综合评估,可以有效

弥补单一检测技术的局限性,实现更全面的结构健康监测^[12]。在讨论三种常见的无损检测技术——超声波检测(UT)、电磁波检测(ET)和放射性检测(RT)时,可以看到它们各自具备独特的优势和局限性,因此将它们结合起来进行综合评估,能够更精确地识别并定位混凝土结构中的缺陷^[13]。

2.4.1 超声波检测的局限性和弥补

超声波检测在识别混凝土中的裂缝和空洞方面表现出色,特别适用于需要深入探测的情况。然而,UT在钢筋密集的区域可能受到干扰,且混凝土表面的状态会影响检测结果。因此,为了弥补UT在这些场景中的不足,可以结合电磁波检测(ET)^[14]。ET擅长检测钢筋腐蚀状态,因此能够对钢筋密集区域进行评估,补充UT在这些场景下的限制。

2.4.2 电磁波检测与非金属缺陷识别

虽然电磁波检测在评估钢筋腐蚀方面有显著优势,但其在识别非金属缺陷时存在局限性。这时,可以通过结合超声波检测(UT)或放射性检测(RT)来弥补这一不足。UT在非金属材料缺陷的识别方面更为擅长,而RT则能够提供精确的内部成像,特别适用于检测大型混凝土结构中的深层裂缝和空洞^[15]。

2.4.3 放射性检测与快速检测

放射性检测能够提供最为精确的内部成像,适用于需要高精度的结构安全评估,如水坝或核电站的检测。然而,其高成

本、操作复杂性及安全防护要求,限制了其在快速检测中的应用^[16]。在需要进行大面积快速筛查时,可以先采用电磁波检测(ET)进行初步检测,识别出可能的腐蚀区域或关键问题点,再使用RT对这些区域进行精确检测,从而降低RT的应用成本并提高检测效率。

2.4.4 综合检测策略

在实际工程中,为了弥补单一检测技术的局限性,常常采用多种无损检测技术的综合策略^[17]。首先,在大面积结构的初步筛查中,电磁波检测(ET)因其操作简便、覆盖范围广,常用于快速扫描以识别潜在的钢筋腐蚀区域和结构问题。这种方法能够高效地定位可能存在隐患的区域,适合作为大规模筛查的第一步^[18]。

当ET检测出重点区域后,进一步的深度检测则依赖于超声波检测(UT)的应用。UT可以深入混凝土内部,识别出裂缝和空洞等缺陷,尤其是在钢筋不密集的区域表现更为优异^[19]。然而,在钢筋密集的情况下,超声波可能会受到干扰,导致结果不够准确。这时,放射性检测(RT)便可以发挥其优势,通过高穿透力提供更为精确的内部成像,补充UT在复杂结构中的不足^[20]。以下为三种检测方法的效果对比及评估,包括深度穿透能力、缺陷检测精度、操作速度、成本、适用场景等,见表4。

表4 三种检测方法的效果对比及评估

Table 4 Comparison and evaluation of the effectiveness of the three testing methods

检测方法	深度穿透能力	缺陷检测精度	操作速度	成本	适用场景
超声波检测(UT)	高(可达几米)	高(毫米级)	中等	中等	深层裂缝、空洞检测
电磁波检测(ET)	中等(数十厘米)	中等(厘米级)	快速	低	钢筋腐蚀、浅表缺陷检测
放射性检测(RT)	非常高(数米以上)	极高(亚毫米级)	较慢	高	大型复杂结构、深层次缺陷检测

3 总结与展望

未来,无损检测技术将朝着智能化、集成化和便携化方向发展。通过融合人工智能、大数据和物联网等先进技术,检测过程将更加自动化和精准化,特别是在数据分析和缺陷识别方面会取得显著突破。同时,便携式设备的研发和实时数据传输技术的进步将提高现场检测的速度和便捷性。随着环保和安全标准的提升,技术创新也将侧重于降低辐射风险和减少环境影响。在基础设施管理方面,无损检测技术将在长期监测和评估中发挥更重要的作用,为保障结构安全、延长使用寿命提供坚实的技术支持。整体来看,未来的技术发展将促使无损检测成为工程质量控制的核心工具,并显著提升基础设施的维护效率和安全性。

参考文献

[1] 胡杰,唐坤,纪鹏远.既有混凝土结构耐久性检测方法综述[J].工程质量,2023,41(05):11-15.
 [2] 邢志强.现场无损检测技术下海洋水工混凝土耐久性技术探析[J].黑龙江水利科技,2022,50(06):134-136.
 [3] 向娟.混凝土箱梁抗冻耐久性的无损检测研究[J].广东水利电力职业技术学院学报,2024,22(01):22-25.
 [4] 杨怡文,薛山,王睿,等.高寒地区混凝土箱梁抗冻耐久性无损检测[J].西安工业大学学报,2022,42(01):42-47.
 [5] 石绵靖.关于结构混凝土耐久性无损检测技术研究[J].建筑与预算,2021,(10):95-97.
 [6] 梁冠亭,谢德擎,石亮,等.TORRENT法混凝土空气渗透系数与其他耐久性指标的量化关系[J].混凝土,2019,(12):49-52.
 [7] 陈平.高速公路高性能混凝土力学性能及耐久性试验检测研究[J].交通科技与管理,2024,5(12):100-102.
 [8] 秦彩秋.高速公路隧道高性能混凝土耐久性试验检测研

究[J].运输经理世界,2024,(15):156-158.
 [9] 李忠,李涛,崔凤坤,等.寒冷地区冰冻海域混凝土桥梁耐久性现场检测及评估[J].公路,2024,69(05):414-418.
 [10] 李益文.桥梁混凝土力学性能及耐久性能现场检测研究[J].江西建材,2024,(01):98-100.
 [11] 张霆.建筑结构耐久性检测及加固技术应用分析[J].工程技术研究,2024,9(02):109-111.
 [12] 向娟.混凝土箱梁抗冻耐久性的无损检测研究[J].广东水利电力职业技术学院学报,2024,22(01):22-25.
 [13] 罗大明,李凡,牛荻涛.人工智能时代混凝土结构耐久性诊断研究进展[J].建筑结构学报,2024,45(02):1-13.
 [14] 刘伟斌,高未未,杨晓鑫,等.某热电厂混凝土烟囱检测鉴定与耐久性评估[J].建筑结构,2023,53(S2):1753-1756.
 [15] 王鹏,徐时贤,李国红,等.跨海大桥混凝土服役挑战及检测方法综述[J].材料导报,2023,37(S1):212-219.
 [16] 胡杰,唐坤,纪鹏远.既有混凝土结构耐久性检测方法综述[J].工程质量,2023,41(05):11-15.
 [17] 宋娟,刘飞.闲置建筑再利用的安全、耐久性检测鉴定及处理措施[J].价值工程,2023,42(06):49-51.
 [18] 肖建东.建筑混凝土材料检测存在的问题及质控措施[J].江西建材,2023,(01):82-83,86.
 [19] 陈鹏.高性能混凝土耐久性分析[J].房地产世界,2022,(24):140-142,157.
 [20] 丁伟锐,黄维莉.桥梁混凝土结构耐久性现场检测探讨[J].交通世界,2022,(36):99-101.

作者简介

施文红,高级工程师,研究方向为市政检测、建筑工程及检测。