

工程质量检验中的无损检测技术应用与可靠性分析

贾友禄 齐珩 刘佳兴

永州市产商品质量监督检验所,湖南永州425000

摘要: 无损检测技术作为现代工程质量检验中极为重要的手段,能够在不破坏结构整体或材料性能的前提下,获取构件内部或表面缺陷的详细信息,从而为工程质量评定及安全隐患排查提供科学依据。本文结合土木工程实际需求,围绕混凝土结构、钢结构以及砌体结构的无损检测技术进行了系统的阐述与分析。同时,为进一步提升无损检测结论的可信度,本文对无损检测技术的可靠性影响因素和提升策略进行了深入探讨,并结合实际工程案例,对相关技术应用要点、检测流程及结果分析进行演示和总结。

关键词: 土木工程; 无损检测技术; 应用; 可靠性

Application and Reliability Analysis of Nondestructive Testing Technology in Engineering Quality Inspection

Jia, Youlu Qi,Heng Liu,Jiaxing

Yongzhou City Product Commodity Quality Supervision and Inspection Institute, Yongzhou, Hunan, 425000, China

Abstract: As an extremely important means in modern engineering quality inspection, nondestructive testing technology can obtain detailed information of internal or surface defects of components without damaging the overall structure or material performance, thus providing scientific basis for engineering quality evaluation and safety hazard investigation. Combined with the actual needs of civil engineering, this paper systematically expounds and analyzes the nondestructive testing technology of concrete structure, steel structure and masonry structure. At the same time, in order to further enhance the credibility of the conclusion of nondestructive testing, this paper deeply discusses the influencing factors and promotion strategies of nondestructive testing technology, and demonstrates and summarizes the application points, testing process and result analysis of related technologies combined with actual engineering cases.

Keywords: Civil engineering; Nondestructive testing technology; Application; Reliability

DOI: 10.62639/sspis12.20250203

引言

工程质量直接关系到人民生命财产安全。随着工程材料和结构形式的多样化,传统破损性检测方式可能对构件产生损伤,影响后续使用并造成经济与时间浪费。因此,无损检测(Non-destructive Testing, NDT)技术应运而生,并逐步在土木工程中广泛应用。无损检测是在不破坏材料或构件性能和结构完整性的前提下,利用设备和方法检测构件表面及内部缺陷,提供科学依据以助维修与加固。近年来,NDT技术在桥梁、隧道、房屋建筑等领域得到广泛推广,对工程稳定和可持续发展起到重要作用。然而,土木工程中结构形式、材料特性及施工环境各异,导致无损检测技术的选择、操作及评估差异较大^[1]。本文聚焦混凝土、钢结构和砌体结构三大类,探讨常用无损检测方法及优缺点,分析影响检测准确性的因素,并结合案例探讨实际应用,为相关研究与实践提供参考。

(稿件编号: IS-25-3-1014)

作者简介: 贾友禄(1979-),男,民族,汉族,籍贯:湖南省永州市,学历,本科,职称,高级工程师,研究方向:产品质量检验检测及实验室管理。

齐珩(1973-),男,民族,汉族,籍贯:湖南省永州市,学历,本科,职称,高级工程师,研究方向:产品质量检验检测及实验室管理。

刘佳兴(1988-),男,民族,汉族,籍贯:湖南省永州市,学历,本科,职称,高级工程师,研究方向:产品质量检验检测及实验室管理。

一、无损检测技术在土木工程中应用的基本要求

(一) 不破坏结构完整性和使用性能

无损检测技术在土木工程质量检验中最大的特点,就在于不会对结构本身造成二次损伤。这意味着:

1. 检测过程中不会削弱构件的承载力,也不会显著改变构件的使用功能;
2. 不影响后续结构运营或服役的正常进度;
3. 在对新建结构进行质量验收或对既有结构进行安全评估时,能够最大限度地保留原有材料与构造的完整性。

(二) 检测效率与准确性并重

由于土木工程体量通常较为庞大,检测效率是决定无损检测技术能否在实际大规模应用中的关键因素之一。无损检测不仅要保证对结构存在的潜在缺陷精准识别,还要兼顾检测速度和经济性要求^[2]。对于批量检测时,还应尽可能采用自动化、半自动化或数字化检测设备,以提高工作效率,并确保数据采集和处理的客观性、准确性。

(三) 结果可追溯与可量化

土木工程质量检验往往需要出具法定或行业认可的检测报告,检测结果需要为质量事故调查、安全鉴定、改造加固设计等提供依据。因此,无损检测过程中取得的影像、测试曲线、参数数据等,应当符合相应技术规程或标准的要求,并具有可追溯性。同时,在许多情况下,检测结论需要可量化呈现,如混凝土强度指标估算、缺陷尺寸或深度的量化值等,方能为后续决策提供更具针对性的支撑。

二、土木工程常见的无损检测技术分析

(一) 混凝土结构的无损检测

1. 回弹法无损检测技术

回弹法是混凝土强度无损检测中最为常见的一种方法。其原理基于混凝土表面硬度与抗压强度之间存在一定相关关系,通过回弹仪敲击混凝土表面并测得回弹值,从而估测其表面硬度进而推算混凝土强度。该方法具有以下特点:

(1) 优点:设备简单、操作简便、检测效率高、成本低;

(2) 局限:结果易受构件表面粗糙度、含水率、碳化程度、骨料种类及分布等影响;需要根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23)等标准建立区域或批次修正曲线,以提高测强精度。

随着信息技术的发展,如今已有数字化数显回弹仪可实时记录测试数据,并结合现场情况自动进行修正,提高了数据准确度和效率^[3]。在具体应用中,为确保测点分布合理,需要避开过密钢筋区域、蜂窝麻面等缺陷区域,保证测点数量与位置具有足够的代表性,以准确反映混凝土整体质量状况。

2. 超声脉冲法无损检测技术

超声脉冲法基于超声波在混凝土中的传播速度与材料密实度、缺陷分布等参数之间存在一定的对应关系,通过发射探头和接收探头在构件表面或相对表面布置,使超声波穿透构件内部,获取传播时间、波幅衰减等指标来判断构件内可能存在的裂缝、空洞、夹杂物等缺陷。若检测对象属于同种类型、同龄期、同配合比批量浇筑的混凝土构件,则可采用建立回归曲线的方式来估算混凝土强度。

该方法具有相对较高的灵敏度,对内部缺陷的检测较为有效,尤其是对结构裂缝深度的推断较为精准。但由于混凝土内骨料级配差异、含水率、钢筋分布等多重因素共同作用,声波传播速度易产生随机波动^[4]。因此,常需与回弹法、钻芯取样法等配合使用,或事先标定声速与强度关系,以保证推定结果的合理性和精度。

(二) 钢结构的无损检测

1. 超声探伤检测技术

对于钢结构而言,超声探伤技术是应用最为广泛的无损检测手段之一。其核心原理同样基于超声波在金属材料内部传播过程中会因缺陷而产生波形、波幅等的畸变或反射特征。通过观察显示器上相应波形的变化规律,可判断焊缝内部是否存在裂纹、气孔、未焊透等缺陷。

2. 射线探伤检测技术

射线探伤一般采用X射线或γ射线,通过射线穿透金属材料时的衰减规律来识别其内部缺陷,并在胶片或数字成像设备上形成缺陷投影。其优点是检测结果直观,可准确识别并记录焊缝缺陷的形状、大小和位置。缺点则在于射线对人体具有一定危害性,需严格的防护及安全管理措施;设备投资大,现场操作不够灵活,检测效率也相对较低。因此,射线探伤更适合焊缝关键部位或需高精度检测的场合,一般与超声探伤结合使用,以相互校核、取长补短。

(三) 砌体结构的无损检测

1. 原位轴压法

对于砌体结构安全性评定,常用的无损检测手段包括原位轴压法与扁顶法等。原位轴压法是在墙体上选择具有代表性的检测区域,通过轴向施加逐级增加的压力,观测墙体的变形与破坏荷载,然后根据构造与材料特征推定墙体的抗压强度及变形特性。该方法优点在于试验结果更能反映砌体材料与灰缝等共同作用下的实际承载能力;而缺点在于试验工作量较大,只能在较少的检测位置上进行^[5];若操作不当,也可能对墙体造成一定程度的损伤,因此应严格选择检测部位,避免对结构整体稳定性产生影响。

2. 扁顶法

扁顶法是利用在墙体水平切槽处安装扁顶器进行加压,测定墙体响应来判断砌体的强度及变形参数的一种方法。一般需要在开槽前后分别监测墙体位移和应力变化,以此分析墙体在受压状态下的应力分布和变形特征。此方法可近似评估砌体墙体在实际荷载作用下的工作状况,测点需选择具有代表性的墙段,并控制开槽数量与切槽深度,避免对结构功能造成影响。

三、无损检测技术的可靠性与影响因素

(一) 检测设备与仪器精度

无损检测的可靠性首先取决于检测设备本身的质量和精度。回弹仪、超声探头、射线源、数字成像设备等若存在校准不当、灵敏度不足或故障隐患,均可能直接导致检测结论的失真。因此,在正式检测开始之前,应对所有检测仪器进行必要的标定和预检,确保设备处于良好工作状态,并对检测环境、耦合介质等进行配套处理。

(二) 检测人员经验与专业能力

无损检测过程往往需要操作者在现场进行探头扫描、图像辨识或数值修正,其主观判断难以完全避免。技术人员是否持有相应资质证书、是否具备丰富的检测经验以及能否严格遵守行业标准,都将显著影响检测结论的可靠性。同时,不同人员对缺陷的判定准则与阈值可能存在微小差异,易造成结果偏差。为降低人为因素的影响,应加强对检测人员的系统培训与考核,并尽量推广数字化、自动化检测技术。

(三) 材料与结构自身的异质性

土木工程材料通常存在较强的非均质性,例如混凝土内部骨料分布不均、砌体结构因砂浆强度和

施工工艺不同而表现出离散性等，这些都为无损检测结果的精度带来了挑战。混凝土碳化深度、含水率，或钢结构表面粗糙程度、氧化锈蚀情况等，也会不同程度地干扰检测信号。为减小材料和结构异质性的影响，需在充分调查现场实际情况和材料配比的基础上，通过建立区段修正或参数校正模型，提高检测数据对真实情况的反映程度。

(四) 现场环境条件

无损检测通常在施工现场或服役现场进行，可能受到气候（高温、低温、潮湿）、振动干扰、电磁环境、空间受限等多重因素的影响。例如，在高空、大体积混凝土或水下结构中进行检测，其操作和仪器布置的难度将会显著增加，可靠性也相应降低。因此，需要结合项目特点制定符合现场条件的检测方案，并采取必要的防护、补偿及措施（如固定探头位置、降低干扰信号、对检测部位表面进行平整处理等），以确保数据采集的质量与稳定性。

四、无损检测技术应用案例与分析

(一) 案例概况

某老旧厂房建筑采用单层排架结构，主要构件为钢筋混凝土梁柱和圈梁，局部构造中还使用了砌体墙分隔。因年久失修且有局部裂缝、渗漏痕迹，为评估整体安全状况，业主委托专业检测单位对该厂房进行质量检测与安全鉴定。考虑到测试效率和对结构影响的最小化，本次鉴定重点针对混凝土梁柱强度及裂缝深度采用超声波无损检测技术进行检测；同时对关键性钢梁、钢柱的焊缝状况进行超声及射线综合探伤。

(二) 检测过程及方法

1. 混凝土梁柱检测：检测人员首先使用超声脉冲仪器（配备适宜的发射和接收探头），在现场选择了多处存在可疑裂缝或蜂窝麻面的位置布置测点。通过斜测和平测两种方式结合，测定声时、波幅衰减等信息。在裂缝部位两侧进行对称布置的情况下，利用跨缝与不跨缝测试差值，可推算裂缝深度；若检测到声音严重衰减或反射异常，且测区声时分布不连贯，则说明内部存在空洞或不密实区，需要进一步采取钻芯或局部凿除验证。

2. 钢结构焊缝检测：对于关键焊缝部位，先采用超声探伤在表面清洁、耦合充分条件下进行初步扫描。一旦发现可疑缺陷信号，再使用射线探伤进行二次确认及记录。由于该厂房在建成之初焊接质量未知，现场检测人员将焊缝缺陷的形状、大小及性质通过数字成像系统记录存档。若发现较大裂纹或不连续性缺陷，需立即提出修复建议。

(三) 检测结果与讨论

根据现场数据与后续试验分析结果，综合得到以下结论：

1. 混凝土梁柱的整体强度尚可，局部区域存在轻微的砂浆离析与蜂窝现象，暂不影响整体承载力，但需及时修补；

2. 裂缝主要分布在梁柱节点及高应力区域，经超声检测推算其深度大多小于 50 mm，属于混凝土表面裂缝或保护层开裂范畴，尚未威胁钢筋锚固及主筋安全；

3. 焊缝检测显示，大多数焊缝质量满足设计要求，仅有个别焊缝发现夹渣或气孔缺陷，尚未出现明显裂纹，但后续仍需进行打磨与修补。

通过本次无损检测工作的顺利实施，项目组对老旧厂房整体的安全状况有了更全面的了解，也为后续维修与改造方案的设计提供了可行依据。如若后续需进行更大规模的加固或扩建，则可在无损检测结论的基础上，有针对性地开展钻芯实验或局部开裂面剖检，以进一步验证并精细化评价结构安全度。

五、提升无损检测可靠性的措施

1) 加强仪器设备管理：建立周期性标定和维护制度，保证设备处于正常工作状态，减少因设备故障或调校失准导致的数据误差；

2) 完善操作规程和人员培训：制定统一的现场操作流程和数据采集格式，并对检测人员进行严格的岗前培训与考核，不断提升其专业水平；

3) 多种检测技术综合应用：在条件允许的情况下，联合使用回弹法、超声波、射线探伤或电磁检测等，多源信息互为印证，可以大大提高判断的准确度；

4) 考虑结构本身与环境因素修正：对混凝土碳化深度、钢结构锈蚀程度、砌体砂浆强度离散等影响因素进行统计和修正模型研究，提高检测数据与结构实际状态之间的关联度；

5) 信息化与智能化检测：利用数字图像处理、人工智能算法等手段，实时分析检测数据并自动识别缺陷特征，减少人工主观判断偏差。

六、结语

无损检测技术以其高效、经济和安全的优势，已成为保障土木工程质量与安全的重要手段。在混凝土、钢结构和砌体结构中，采用回弹、超声、射线等方法，能够精准定位和表征缺陷，有助于提高新建工程质量控制水平，并科学评估既有结构的安全状况与隐患。然而，检测可靠性需依赖设备与方法的更新进步，以及专业人员操作、合理流程设计和环境因素校正的综合保障。通过完善技术标准、加强人员培训和推动多种技术的结合应用，可进一步提升检测结果的准确性、重复性和可追溯性。展望未来，数字化与信息化技术的融合将推动无损检测在工程质量检验与安全管理中的广泛应用。高精度传感器、人工智能算法和大数据分析将使检测更加灵敏与智能，助力土木工程朝着更高质量、更安全可靠的方向发展。

参考文献：

- [1] 刘焕喜, 刘杰, 池泉智. 分析建筑工程质量检测中无损检测技术的应用 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (01): 112-114.
- [2] 王超. 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6 (11): 97-98.
- [3] 许桥伟. 建筑结构工程质量检测中无损检测技术的应用分析 [J]. 江苏建筑, 2022, (S2): 11-14+27.
- [4] 陈兵. 无损检测技术在桥梁工程质量检测中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2021, (34): 97-99.
- [5] 李钊, 李琪, 陈希伟. 无损检测技术在建设工程质量检测中的应用 [J]. 中华建设, 2023, (06): 155-157.