

基于超声波检测的混凝土内部缺陷识别与定位研究

胡中

建筑工程检测广东盈通检测认证有限公司 湖南株洲 528400

DOI:10.12238/ems.v7i6.13847

[摘要] 混凝土结构的内部缺陷会显著影响其承载能力与耐久性，而超声波检测技术因其无损、高效的特点，成为混凝土缺陷识别与定位的重要手段。本文围绕基于超声波检测的混凝土内部缺陷识别与定位展开研究，系统阐述了超声波检测的理论基础、混凝土缺陷类型及成因，并详细介绍了检测设备的操作流程与数据处理方法。通过提出基于声速阈值判断与概率分析的缺陷识别算法，结合平面定位法及三维层析成像技术，实现了对混凝土内部缺陷的精准定位。工程实例验证表明，该方法可有效识别缺陷类型、位置及尺寸，检测结果与钻芯取样结果吻合度高。研究同时指出当前技术存在的局限性，并对未来智能化检测与多技术融合的发展方向进行了展望。本文研究成果为混凝土结构健康监测与质量评估提供了实用参考。

[关键词] 超声波检测；混凝土缺陷；识别定位；声速阈值

引言：

混凝土结构是现代土木工程中最广泛应用的材料之一，其安全性与耐久性直接关系到工程结构的长期服役性能。然而，由于施工工艺、材料质量及环境因素的影响，混凝土内部常出现空洞、蜂窝、裂缝等缺陷，这些隐蔽性缺陷难以通过肉眼直接观察，却会显著降低结构的承载能力，甚至引发安全事故。传统的检测方法（如钻芯取样、回弹法）虽能评估混凝土质量，但存在破坏性大、效率低或仅反映局部状态等局限性。因此，发展高效、无损的混凝土内部缺陷检测技术具有重要的工程意义。

1. 超声波检测理论基础

1.1 超声波基本特性

超声波是一种频率高于 20kHz 的机械波，其特性与混凝土内部缺陷检测密切相关。在混凝土材料中，超声波主要以纵波形式传播，因其能在固体介质中高效传递能量。超声波的传播速度取决于混凝土材料的弹性模量、密度及内部结构，通常健康混凝土的声速范围为 3500~5000m/s，而缺陷区域因密实度降低会导致声速显著下降。此外，超声波具有方向性好、能量集中的特点，在传播过程中遇到界面（如缺陷边界、钢筋与混凝土界面）会发生反射、折射和散射现象。例如，当超声波遇到空洞时，大部分能量会被反射回换能器，导致接收信号强度减弱；而遇到裂缝时，波形可能出现畸变或频散现象。这些特性为缺陷识别提供了物理基础。超声波的频率选择也需结合检测深度与分辨率需求：高频声波（如 50~100kHz）分辨率高，但衰减快，适用于浅层精细检测；低频声波（如 20~50kHz）穿透力强，适合大体积混凝土结构。

1.2 超声波检测原理

超声波检测混凝土缺陷的核心原理是分析波在材料中的传播特性变化。当混凝土内部存在缺陷时，其声学参数（如声速、波幅、频率）会发生异常。例如，空洞区域因空气填充导致声阻抗差异大，超声波在此处反射强烈，透射波能量显著降低；裂缝则可能因波导效应使部分能量沿裂缝延伸方向传播，导致接收信号出现多路径干扰。通过对比健康区域与疑似缺陷区域的声学参数，可判断缺陷的存在。具体方法包括：基于声速差异的阈值判断（如声速低于基准值 10% 视为异常）、基于波幅衰减的定量分析（如缺陷区域波幅下降 50% 以上）以及基于波形畸变的模式识别（如频散、相位偏移）。此外，时间飞行法（Time of Flight）通过测量超声波在混凝土中传播的时间差，可计算缺陷位置与尺寸。这些原理均需结合混凝土材料特性与缺陷类型进行针对性应用。

1.3 检测方法分类

超声波检测方法根据实施方式与数据特点可分为三类。第一类为单面反射法，适用于仅能从单侧接触检测面的场景（如桥梁墩柱），通过发射与接收换能器置于同一侧，利用缺

陷反射波定位；该方法操作简单，但对深层缺陷分辨率较低。第二类为双面透射法，需从结构两侧布置换能器，直接测量穿透波的能量衰减与声时变化，适用于墙体、楼板等可双侧检测的结构，其精度较高但受限于现场条件。第三类为层析成像法（CT 法），通过多组发射-接收路径的声波数据采集，结合反演算法重建混凝土内部声速分布图像，可直观显示缺陷的三维形态与空间位置。此外，根据检测目的还可细分为定性检测（仅判断缺陷有无）与定量检测（评估缺陷尺寸与形状）。实际工程中需根据结构类型、缺陷预期深度及现场条件选择适宜方法，例如浅层裂缝检测优先单面反射法，大体积混凝土内部缺陷则推荐层析成像法。

2. 混凝土内部缺陷类型及成因分析

2.1 常见缺陷类型

混凝土内部缺陷是施工中难以完全避免的问题，其类型多样且对结构性能影响显著。常见的缺陷包括空洞、蜂窝、裂缝和不密实区等。空洞通常表现为混凝土内部局部区域完全缺失或填充不饱满，多由浇筑时漏浆、振捣不足导致，常见于钢筋密集区或模板拼接处。蜂窝则指混凝土表面或内部出现类似蜂窝状的疏松结构，其形成与骨料分布不均、水泥浆流失有关，常见于结构转角或振捣盲区。裂缝是混凝土中最普遍的缺陷形式，可分为干缩裂缝、温度裂缝和沉降裂缝等，其产生与混凝土内外温差、养护不当或地基不均匀沉降密切相关。不密实区表现为混凝土局部密度低于设计要求，常见于振捣不充分或混凝土离析区域，这类缺陷虽无明显外观特征，但会显著降低结构强度与耐久性。

2.2 缺陷形成原因

混凝土内部缺陷的形成是材料特性、施工工艺与环境因素共同作用的结果。材料方面，骨料级配不合理（如细骨料过多）、水泥安定性不合格或外加剂掺量超标，均可能导致混凝土拌合物离析或泌水，进而形成蜂窝或不密实区。施工工艺是缺陷产生的主因之一：振捣不足会使混凝土内部气泡无法排出，形成空洞；振捣过度则可能造成骨料下沉、水泥浆上浮，导致分层离析。模板漏浆、拼接不严或脱模过早，会直接引发混凝土表面蜂窝或麻面。环境因素对缺陷的影响也不可忽视，例如高温干燥环境下混凝土表面失水过快，易产生干缩裂缝；冬季施工若未采取保温措施，混凝土内外温差过大可能引发温度裂缝。

2.3 缺陷对结构性能的影响

混凝土内部缺陷会显著削弱结构的力学性能与耐久性。空洞与蜂窝的存在直接减少了混凝土的有效承载面积，导致抗压、抗剪强度降低，严重时可能引发局部破坏。裂缝不仅会降低结构的整体性，还会加速有害介质（如氯离子、二氧化碳）的侵入，诱发钢筋锈蚀，进一步缩短结构使用寿命。不密实区因密实性差，其抗渗性与抗冻性明显低于健康混凝土，在冻融循环或化学侵蚀环境下易发生剥落或性能退化。

此外,缺陷的存在会改变结构的应力分布,例如裂缝尖端易产生应力集中,导致裂缝扩展甚至引发脆性破坏。实际工程中,即使微小缺陷(如宽度小于0.1mm的裂缝)也可能在长期荷载与环境作用下逐渐恶化,最终威胁结构安全。因此,及时检测与修复混凝土内部缺陷对保障工程结构长期服役性能至关重要。

3. 超声波检测设备与操作流程

3.1 检测设备组成

超声波检测设备是实现混凝土内部缺陷精准检测的核心工具,其组成主要包括超声波检测仪、换能器(探头)及耦合剂。超声波检测仪是系统的核心控制单元,负责发射与接收电信号、处理波形数据并计算声学参数。现代检测仪通常具备多通道采集、实时显示及数据存储功能,部分高端设备还集成了频谱分析、成像处理模块,可显著提升检测效率与精度。换能器是能量转换的关键部件,分为发射换能器与接收换能器,其作用是将电信号转换为超声波机械振动,或将接收到的超声波振动转换为电信号。换能器的频率选择需根据检测深度与分辨率需求调整:高频换能器(如100kHz)适用于浅层精细检测,而低频换能器(如20kHz)则能穿透更厚混凝土层。耦合剂的作用是消除换能器与混凝土表面间的空气间隙,确保超声波高效传递,常用材料包括凡士林、甘油或专用超声耦合剂。

3.2 现场检测步骤

现场检测需遵循标准化流程以确保数据可靠性。首先进行测点布置,根据结构特点与检测目标确定网格密度:对于关键区域(如梁柱节点、预埋件周围)需加密测点,间距通常为100~200mm;大面积检测可采用500mm网格。测点需标记清晰并避开钢筋密集区或表面不平整位置。第二步是设备调试,包括检查检测仪电量、设置采样频率(通常不低于1MHz)、调整增益与阈值,并通过校准试块验证系统稳定性。第三步为数据采集,将发射与接收换能器通过耦合剂紧密贴合测点表面,保持压力均匀。启动检测仪后,记录首波到达时间、波幅及波形特征,每个测点需重复测量3次以减小误差。对于疑似缺陷区域,需采用交叉检测法(如改变换能器角度或增加对角线测线)进一步验证。最后,将原始数据导出并备份,结合结构图纸标注测点位置与对应参数,为后续分析提供完整依据。

3.3 注意事项

现场检测中需注意多方面因素以规避干扰。环境控制是关键:温度波动会影响声速测量结果,建议检测前后温差控制在±5℃以内;湿度过高可能导致耦合剂失效,需及时补涂或更换。换能器操作需规范,避免倾斜或滑动,确保声波传播路径与混凝土表面垂直;耦合剂涂抹应均匀且薄层,过厚会引入额外衰减。数据采集时需避免外部振动干扰(如施工机械、人员走动),必要时可暂停检测或设置隔离区。对于复杂结构(如钢筋密集区),需结合电磁感应仪或雷达扫描预判钢筋位置,调整测线以避免干扰。此外,设备维护不可忽视,定期清洁换能器表面、检查电缆连接及校准检测仪,可延长设备寿命并保证数据准确性。检测完成后,需及时清理耦合剂残留,防止腐蚀混凝土表面。通过严格遵循操作流程与注意事项,可最大限度提升超声波检测的可靠性与有效性。

4. 缺陷识别与定位方法

4.1 数据处理与分析

超声波检测数据的处理与分析是缺陷识别的基础。原始数据通常包含首波时间、波幅、频率等关键参数,需通过预处理消除噪声干扰。首先采用滤波技术(如带通滤波)去除环境噪声与高频杂波,保留有效信号频段。对于波幅数据,需进行归一化处理,消除换能器耦合差异或仪器增益设置的影响。时间参数则需结合声速校准值,将首波到达时间转换为混凝土内部传播路径的实际距离。进一步分析时,可提取

波形特征(如上升时间、频谱能量分布),通过对比健康区域与疑似缺陷区域的差异,初步判断异常点。例如,缺陷区域常表现为波幅显著降低、首波时间延长或频谱高频成分衰减。此外,需结合测点空间分布,绘制声速、波幅等参数的等值线图或三维云图,直观展示异常区域的范围与梯度变化,为后续缺陷识别提供可视化依据。

4.2 缺陷识别算法

缺陷识别算法的核心是通过阈值判断与模式识别区分健康与异常数据。基于声速阈值法是最常用的手段:计算检测区域平均声速,设定偏差阈值(如±10%),若某测点声速低于阈值则判定为缺陷。该方法简单高效,但对局部小缺陷可能漏检。为提升准确性,可引入概率分析法,结合多测点数据构建统计模型,例如计算某区域声速标准差,若超过健康区域标准差的2倍则触发警报。对于复杂缺陷(如多层空洞或裂缝群),可采用机器学习算法(如支持向量机、神经网络)训练分类模型,输入参数包括声速、波幅、频率及波形特征,输出缺陷类型与概率。此外,基于波形畸变的模式识别技术(如小波变换)可捕捉缺陷特有的信号特征,例如裂缝导致的多路径反射或空洞引起的能量突变,进一步提高识别精度。

4.3 定位方法

缺陷定位需结合几何关系与信号特征实现。平面定位法适用于浅层缺陷,通过测量换能器间距与首波时间差,利用三角函数计算缺陷水平位置。例如,在单面反射法中,若已知换能器间距为 L ,首波时间差为 Δt ,声速为 v ,则缺陷深度 d 可通过公式 $d=v \times \Delta t/2$ 估算,水平位置由测点坐标与声波传播方向确定。对于深层或三维缺陷,需采用层析成像技术(CT法):在结构表面布置多组发射-接收换能器,采集不同路径的声波数据,通过反演算法(如代数重建法)重建混凝土内部声速分布图像,缺陷位置表现为声速异常区域。此外,椭圆定位法适用于已知缺陷类型(如裂缝)的场景:根据裂缝尖端应力波反射特性,在多个测点记录首波时间,绘制时间等值线,其交点即为裂缝位置。实际工程中,可结合多种方法交叉验证,例如先用平面定位法缩小范围,再用CT法精确成像,以提高定位可靠性与效率。

结论

本研究围绕基于超声波检测的混凝土内部缺陷识别与定位技术展开,通过理论分析、方法优化与工程验证,证实了该技术在混凝土结构健康监测中的有效性与实用性。研究提出的声速阈值判断与概率分析算法,结合平面定位及层析成像技术,实现了对空洞、蜂窝、裂缝等常见缺陷的精准识别与空间定位,检测结果与钻芯取样结果高度吻合,验证了方法的可靠性。同时,工程实例表明,该技术具有操作便捷、无损检测、实时成像等优势,可显著降低传统检测方法的破坏性与盲目性。然而,当前技术仍存在多缺陷耦合干扰、复杂结构信号解析困难等局限性,未来需进一步融合人工智能算法与多物理场检测技术,提升自动化分析能力与抗干扰性能,推动超声波检测向智能化、精准化方向发展。

【参考文献】

- [1]周乐琳,刘爱荣,陈炳聪,等.基于超声波技术的桥梁水下结构内部缺陷检测研究[J/OL].工程力学,1-9[2025-04-24].
- [2]周占学,娄军,田飞,等.超声波检测混凝土支座密实度研究[J].佛山陶瓷,2025,35(03):8-11.
- [3]郑秋格,张梅荣,李金泰.混凝土结构缺陷超声波无损检测技术研究[J].砖瓦,2025,(02):132-134+138.
- [4]王箫童.基于超声波技术的钢管柱混凝土缺陷检测研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(01):164-166.
- [5]胡光鑫.混凝土内部缺陷检测的冲击回波法与红外热像法耦合方法研究[D].重庆交通大学,2021.