

# 声波检测技术在桩基完整性检测中的运用

许涛<sup>1</sup> 杨忠<sup>2</sup>

1. 温州市交通工程试验检测有限公司 浙江 温州 325000

2. 浙江致欣检测技术有限公司 浙江 嘉兴 314000

**摘要:** 声波检测技术凭借其独特优势在桩基完整性检测中应用广泛。该技术基于声波传播特性及与材料缺陷的相互作用机制,通过声波透射、反射等多种方法,利用专用设备采集分析信号。它能精准判断桩身混凝土强度均匀性、识别缺陷位置与类型。在工程应用中,可有效检测不同类型桩基,结合其他技术提升检测精度。同时,针对现有局限提出改进方向,推动该技术不断优化,为桩基质量提供可靠保障。

**关键词:** 声波检测技术; 桩基完整性检测; 运用

引言: 在建筑工程领域,桩基作为建筑物的基础支撑,其完整性直接关乎整个工程的安全与稳定。传统的桩基检测方法,如钻芯法、静载试验等,虽有一定效果,但存在成本高、周期长、对桩身有损伤等弊端。随着科技发展,声波检测技术凭借其无损、快速、高效等显著优势,逐渐在桩基完整性检测中崭露头角。它能在不破坏桩基结构的前提下,精准识别桩身缺陷,为工程质量把控提供关键依据,应用前景十分广阔。

## 1 声波检测技术理论基础

### 1.1 声波检测技术原理

(1) 声波传播特性: 声波在介质中传播存在纵波、横波和表面波三种形式。纵波通过介质质点疏密振动传播,可在固、液、气三态介质中传播,波速最快;横波依靠质点剪切振动传播,仅能在固态介质中传播,波速约为纵波的1/2;表面波沿介质表面传播,能量集中于表面浅层,衰减较快,适用于表面缺陷检测。(2) 声波与材料缺陷的相互作用机制: 当声波遇到材料内部的裂纹、孔洞等缺陷时,会发生反射、折射、散射及衰减等现象,导致声波传播路径改变、波速降低、振幅衰减。通过捕捉这些信号变化,可反推缺陷的位置、大小及形态。(3) 检测参数选择: 核心参数包括频率、波速和衰减系数。高频声波分辨率高,但衰减快,适用于浅层缺陷检测;低频声波穿透力强,适用于深层检测。波速和衰减系数直接反映介质特性,需结合材料类型和检测需求合理设定<sup>[1]</sup>。

### 1.2 检测方法分类

(1) 声波透射法(CSL): 在被测构件对称布置的声测管中分别放入发射和接收换能器,声波穿过构件传播,通过分析透射信号判断构件完整性,适用于混凝土桩等深部构件的质量检测。(2) 声波反射法: 分为单孔

和跨孔反射成像两类。单孔法通过同一钻孔内的换能器发射并接收反射波;跨孔法利用不同钻孔间的声波反射信号,经成像算法重构缺陷分布,适用于复杂地质或构件内部缺陷定位。(3) 冲击回波法: 通过冲击器对构件表面施加瞬时冲击产生应力波,应力波在构件内部传播并被缺陷或底面反射,接收反射波信号并分析频率特性,实现缺陷检测,适用于板状构件及表面下浅层缺陷检测。

### 1.3 设备与系统组成

(1) 换能器: 分为发射和接收探头,核心功能是实现电信号与声波信号的相互转换,根据检测需求可选用压电式、电磁式等类型,需匹配对应检测频率和声波类型。(2) 数据采集与处理系统: 由数据采集卡、主机及专用软件组成,负责控制信号发射、接收,将模拟信号转换为数字信号,并通过滤波、放大、频谱分析等算法处理数据,输出检测结果。(3) 辅助设备: 包括耦合剂、定位装置等。耦合剂用于填充换能器与构件表面的空隙,减少声波反射损失;定位装置保证换能器位置精准,确保检测信号稳定可靠。

## 2 声波检测技术在桩基完整性检测中的关键技术

### 2.1 检测流程设计

(1) 检测前准备: 核心包括桩头处理与测管布置。桩头需清除浮浆、松散混凝土,保证顶面平整干燥,露出主筋以避免干扰声波传播;测管选用高强度金属或PVC管,按对称布置原则安装,数量根据桩径确定(桩径 $\leq 1.5\text{m}$ 设2根,1.5-2.5m设3根, $\geq 2.5\text{m}$ 设4根),测管底部密封、顶部加盖,管内灌满清水作为耦合介质,同时核对桩身参数与施工记录。(2) 现场检测操作规范: 换能器需匀速升降,升降速度控制在0.5-1m/s,确保发射与接收换能器同步移动;检测点间距宜为20-50mm,

在缺陷可疑区域加密至10-20mm；保持换能器轴线与测管轴线平行，避免倾斜导致声程偏差，同时避免检测过程中触碰测管内壁。（3）数据采集与存储要求：采集系统需提前校准，确保信号采样频率不低于声波最高频率的5倍；记录每测点的声时、波幅、频率等参数，同步标注测点深度；数据存储采用通用格式，保留原始波形数据，禁止擅自删减，同时建立检测台账，关联桩号、检测时间、操作人员等信息<sup>[2]</sup>。

## 2.2 数据分析与缺陷识别

（1）波速-波幅-频率联合分析法：以波速判断桩身混凝土强度均匀性，波幅反映声波能量衰减程度，频率变化体现缺陷类型，三者协同分析可排除单一参数误判，如波速正常但波幅骤降，大概率为局部夹泥缺陷。（2）波形时程曲线分析：正常桩身波形规则、峰值清晰，无杂波干扰；缺陷桩会出现波形畸变、峰值滞后、多反射波叠加等现象，通过对比标准波形与实测波形的差异，初步判定缺陷存在与否。（3）三维成像与缺陷定位技术：基于跨孔声波数据，利用层析成像算法重构桩身内部声波参数分布，生成三维可视化图像，精准定位缺陷的空间位置、尺寸及延伸范围，提升缺陷判定的直观性与准确性。（4）典型缺陷模式库建立：收集缩颈、离析、夹泥、断桩等典型缺陷的声波信号特征，建立标准化模式库，检测时通过实测数据与模式库比对，快速判定缺陷类型，提高检测效率。

## 2.3 检测精度影响因素

（1）地质条件：土层不均匀会导致声波折射散射，地下水水位变化影响测管内耦合介质特性，进而干扰声速测量；岩溶、裂隙发育区域易产生虚假缺陷信号，需结合地质勘察资料修正分析。（2）桩身材料不均匀性：混凝土配合比波动、骨料分布不均、存在气泡或蜂窝等，会导致桩身声学参数离散性增大，影响缺陷判断阈值的设定，需通过同批次标准试块校准基准参数<sup>[3]</sup>。

（3）检测设备性能与操作误差：换能器频率偏差、灵敏度下降会影响信号质量；操作中换能器倾斜、升降不同步、测点定位偏差等，会导致声程计算误差，需定期校准设备并规范操作流程。

## 3 声波检测技术在桩基检测中的工程应用案例分析

### 3.1 案例一：某高层建筑混凝土灌注桩检测

（1）工程概况与检测需求：该项目为32层高层建筑，采用直径1.2m混凝土灌注桩基础，共68根桩，桩长28-35m。因施工区域存在粉质黏土层，需检测桩身完整性，排查缩颈、夹泥等缺陷，确保桩基承载能力满足设计要求。（2）检测方案设计与实施：采用声波透射法，

每根桩对称布置3根声测管，选用50kHz压电式换能器，检测点间距30mm，缺陷可疑区域加密至15mm。严格规范完成桩头处理与测管注水，匀速升降换能器采集声时、波幅等参数。（3）检测结果与开挖验证对比：检测发现8根桩存在局部缺陷，其中3根桩15-18m深度波幅骤降、波形畸变，判定为夹泥缺陷。开挖验证显示缺陷位置、范围与检测结果一致，准确率达100%。（4）缺陷处理措施与效果评估：对缺陷桩采用压力注浆补强处理，复检显示声波参数恢复正常，桩基承载力满足设计要求，后续主体施工无沉降异常，处理效果良好。

### 3.2 案例二：大直径钢管桩完整性检测

（1）特殊工况下的检测难点：该项目为跨海大桥引桥工程，采用直径2.5m大直径钢管桩，桩长45m，处于海水浸泡环境，钢管桩壁薄且存在焊缝，传统检测方法易受干扰，难以精准识别内部填充混凝土缺陷。（2）声波透射法与超声波衍射时差法（TOFD）联合应用：采用声波透射法排查大范围缺陷，TOFD法聚焦焊缝及局部疑似缺陷区域。通过双方法数据互补，规避海水耦合干扰与钢管壁反射影响，提升缺陷识别精度。（3）检测结果与静载试验数据关联分析：检测发现4根桩存在混凝土与钢管壁脱空缺陷，关联静载试验数据，缺陷桩竖向承载力较合格桩降低12%-18%，验证了检测结果的可靠性，为后续加固提供数据支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.3 案例三：复杂地质条件下桩基检测

（1）溶洞、断层等地质异常体识别：该项目位于岩溶发育区域，桩基穿越溶洞、断层破碎带，地质条件复杂。采用多通道声波检测系统，结合地质勘察资料，通过分析声波传播路径偏移、波速突变等特征，精准识别3处溶洞和2条断层的位置与规模。（2）多参数综合判据优化：针对复杂地质干扰，优化波速、波幅、衰减系数及波形特征多参数综合判据，引入地质权重系数，排除地质异常对桩基缺陷判定的干扰，使缺陷识别准确率较传统单参数判据提升23%，确保检测结果贴合工程实际。

## 4 声波检测技术在桩基检测中的优化与改进方向

### 4.1 现有技术局限性分析

（1）浅部缺陷检测盲区问题：当前声波检测技术在桩基顶部0.5-1.0m范围易形成检测盲区，核心原因是桩头处理后仍存在浮浆残留、主筋干扰等问题，导致声波传播路径紊乱，信号反射叠加严重。同时，换能器起始检测位置难以贴近桩顶浅部区域，高频声波在浅部传播时能量衰减过快，无法有效捕捉缺陷信号，使得桩顶浅部的裂缝、松散等缺陷易被遗漏，给桩基承载稳定性留下安全隐患。（2）小直径桩检测精度不足：对于直径  $\leq$

800mm的小直径桩基,受桩身截面空间限制,声测管布置难度大,易出现管距过小或偏移情况,导致声波传播声程偏差较大。此外,小直径桩桩身混凝土体积小,材料不均匀性对声波参数的影响更显著,传统检测参数判断难以适配,易将材料局部波动误判为缺陷,或因信号分辨率不足遗漏微小缺陷,无法满足小直径桩高精度检测的工程需求。(3)复杂耦合条件下的信号干扰:在地下水丰富、桩身表面潮湿、存在油污或杂物等复杂耦合环境中,声波传播的耦合介质特性不稳定,易产生界面反射、散射等现象,导致检测信号出现杂波叠加、波幅衰减异常等问题。同时,施工现场的机械振动、电磁干扰等外部因素,会进一步扰乱声波信号,降低信号信噪比,增加缺陷识别的难度,甚至导致检测结果误判。

#### 4.2 技术改进策略

(1)新型换能器研发:聚焦浅部缺陷检测和小直径桩检测需求,研发高频(100-500kHz)、宽频带压电换能器,提升声波信号的分辨率和穿透力,突破浅部检测盲区限制。优化换能器结构设计,开发小型化、轻量化换能器,适配小直径桩声测管安装空间,同时增强换能器的抗干扰能力和环境适应性,确保复杂耦合条件下信号采集的稳定性。(2)智能算法应用:构建基于深度学习的声波信号处理模型,通过大量实测数据和模拟数据训练,实现缺陷信号的自动识别、分类与定位,规避人工分析的主观性误差。引入模糊聚类算法,对复杂环境下的干扰信号进行筛选和过滤,提升信号信噪比;结合三维成像技术,通过智能算法重构桩身内部缺陷形态,进一步提升检测精度<sup>[5]</sup>。(3)多技术融合检测体系构建:构建声波检测与地质雷达、光纤传感的多技术融合体系。利用地质雷达对桩身浅部缺陷的检测优势,弥补声波检测浅部盲区不足;通过光纤传感技术实现桩基施工过程的实时监测,结合声波检测的事后抽检数据,形成“实时监测+精准抽检”的全流程检测模式。多技术数据互补融合,提升复杂工况下桩基检测的全面性和可靠性。

#### 4.3 标准化与规范化建议

(1)检测规程修订建议:结合新型技术应用和工程实践需求,修订现有桩基声波检测规程。明确浅部缺陷检测、小直径桩检测的技术要求,补充新型换能器、智能算法的应用规范;细化复杂耦合条件、复杂地质环境下的检测操作流程,增加干扰信号处理的技术标准;完善检测设备校准、检测数据溯源的相关规定,提升检测全过程的规范性。(2)缺陷等级划分标准完善:基于大量工程案例数据,优化桩基缺陷等级划分指标,将波速、波幅、缺陷尺寸、空间分布等多参数纳入等级判定体系,细化不同缺陷等级对应的工程危害程度和处理要求。针对小直径桩、复杂地质条件下的桩基缺陷,制定专项等级划分标准,避免通用标准适配性不足的问题;建立缺陷等级与桩基承载力的关联模型,为缺陷处理方案制定提供科学依据,提升工程决策的合理性。

#### 结束语

声波检测技术为桩基完整性检测带来了革新,其凭借无损、高效、精准等特性,在众多工程实践中成功识别桩基缺陷,保障了建筑基础的安全稳定。然而,该技术仍存在浅部检测盲区、小直径桩检测精度不足等局限。未来,随着新型换能器研发、智能算法应用以及多技术融合检测体系的构建,声波检测技术将不断完善。同时,标准化与规范化建设也将助力其更科学、可靠地应用于桩基检测,为工程建设质量筑牢根基。

#### 参考文献

- [1]林进强.声波透射检测技术在桥梁桩基础结构检测中的应用[J].河南建材,2020,34(10):21-22.
- [2]李尧.浅析声波透射法在基桩完整性检测工作中的应用[J].建材发展导向,2020,22(05):11-12.
- [3]马驰.声波透射法结合钻芯法检测灌注桩桩身完整性的应用[J].建材与装饰,2020,17(06):29-30.
- [4]吕世雄.超声波技术在桩基完整性检测中的应用[J].中国高新科技,2021,12(16):58-59.
- [5]李景拓.超声波透射法在桩基检测中的应用分析[J].中国住宅设施,2021,41(08):85-86.