

低应变反射波法在建筑工程桩基检测中的应用

张亚斌

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 漯河 462000

摘要：低应变反射波法在建筑工程桩基检测中至关重要。它利用弹性波在桩身传播和反射的特性，通过激振设备在桩顶施加瞬态脉冲，传感器接收反射波信号，经数据处理分析，评估桩身完整性、确定桩长及实时监测。本文就详述了该法的基本原理、所需设备及仪器、检测流程与操作要点，并探讨其在桩基完整性检测、桩长核对及实时监测等方面的应用。该方法操作简便、效率高，为建筑工程桩基质量检测提供了强有力的技术支持。

关键词：低应变反射波法；建筑工程；桩基检测

引言：低应变反射波法作为一种高效、准确的检测技术，在建筑工程桩基质量检测中发挥着至关重要的作用。随着建筑行业的发展，桩基质量的要求日益提高，低应变反射波法因其操作简便、检测效率高等优点，成为桩基检测领域不可或缺的重要手段。

1 低应变反射波法基本原理

1.1 弹性波传播理论基础

弹性波传播理论是研究声波、应力波等在各种介质中传播行为的基础。在弹性力学中，介质被视为能够恢复原状的物体，当外力作用于介质时，会产生形变，而一旦外力撤销，介质就会恢复原状，这一过程伴随着能量的传播，即弹性波的传播。弹性波的传播特性受到介质性质的影响，如介质的密度、弹性模量等。在均匀介质中，弹性波的传播是线性的，遵循波动方程。而在非均匀介质中，弹性波的传播会变得复杂，可能出现反射、折射等现象；反射是弹性波在遇到介质边界或内部缺陷时产生的一种现象。当波从一种介质传播到另一种介质时，如果两种介质的波阻抗（密度与波速的乘积）不同，波就会在边界处发生反射。反射波的幅度、相位等特性取决于入射波的特性以及两种介质的波阻抗关系。

1.2 低应变反射波法检测桩基的原理

低应变反射波法检测桩基的原理基于弹性波在桩身中的传播和反射特性。在桩顶施加一瞬态脉冲激励（通常用力锤敲击桩头），使桩身产生压缩应力波。应力波沿着桩身自上而下传播，当遇到桩身内部存在明显波阻抗界面（如桩底、断桩、裂缝、夹泥等缺陷）或桩身截面积变化（如缩径、扩径）部位时，应力波会产生反射。反射波通过桩头安装的传感器接收，并转换为电信号进行记录和分析。通过分析反射波的时域波形和频域特性，可以计算出桩身的波速、缺陷的位置以及桩身的完整性等信息。在实际检测中，需要注意激振脉冲波的

频率和能量要适中，以确保应力波能够有效传播并产生清晰的反射波。同时，传感器的选择和安装也至关重要，它直接影响到反射波的接收质量和检测结果的准确性^[1]。另外，桩头的处理也是检测前的重要准备工作，需要清除桩头表面的浮浆和破损部分，以确保传感器与桩头的紧密接触。

2 低应变反射波法检测设备与仪器

2.1 激振设备

激振设备是低应变反射波法检测中的关键组件，其主要功能是向桩身施加瞬态激励，产生应力波。这些设备通常包括自由落锤、手锤、力棒以及专门的激振器等。（1）自由落锤与手锤：这些设备操作简便，适用于现场快速检测。自由落锤通常具有一定重量，通过自由落体产生冲击力；而手锤则更加灵活，可以由检测人员直接控制敲击力度和频率。选择适当的激振设备对于获取清晰的反射波至关重要。例如，对于浅部缺陷的检测，可能需要使用重量较小但冲击力集中的铁锤；而对于深部缺陷的检测，则可能需要使用重量较大、能够产生宽脉冲的尼龙锤或橡皮锤。（2）力棒：力棒是一种介于手锤和激振器之间的激振设备，它通常更长、更重，能够产生更加稳定的激励信号。力棒的使用可以提高检测的准确性和重复性。（3）激振器：在一些高精度的检测任务中，可能会使用专门的激振器。这些激振器通常配备有可调节的频率和振幅，能够精确控制应力波的产生和传播，从而进一步提高检测的精确度和可靠性。

2.2 传感器

传感器是低应变反射波法检测中的另一个核心组件，其主要功能是接收并转换桩身中传播的应力波为电信号。（1）类型：传感器通常包括速度传感器、加速度传感器和位移传感器等。在桩基检测中，最常用的传感器是加速度传感器和速度传感器。加速度传感器能够

直接测量桩身的加速度变化，而速度传感器则通过测量桩身的微小振动来间接反映应力波的传播情况。(2) 安装：传感器的安装位置和方式对于确保检测结果的准确性至关重要。在安装时，需要确保传感器与桩顶面保持垂直，并使用耦合剂进行黏结。耦合剂的选择也很重要，它需要具有足够的粘结强度以确保传感器与桩身之间的紧密接触。同时，传感器的安装位置还需要避开钢筋笼的主筋等可能影响信号传输的障碍物^[2]。

2.3 数据采集与分析系统

数据采集与分析系统是低应变反射波法检测中的大脑，它负责接收传感器传输的电信号，并将其转换为可分析的数据。数据采集系统通常包括一个或多个模拟-数字转换器(A/D转换器)，它们能够将传感器传输的模拟信号转换为数字信号。这些数字信号随后被存储在计算机或其他数据存储设备中，供后续分析使用。数据采集系统的采样率、分辨率和动态范围等参数对于确保数据的准确性和完整性至关重要；数据分析软件是低应变反射波法检测中的关键工具。它能够处理和分析采集到的数据，提取出桩身的完整性信息。这些软件通常包括信号处理模块、波速计算模块、缺陷识别模块等。数据分析软件还可以生成检测报告和图表等可视化结果，方便检测人员和其他相关人员理解和评估检测结果。

3 低应变反射波法检测流程与操作要点

3.1 检测前准备工作

检测前准备工作对低应变反射波法的准确应用至关重要。首先，全面收集建筑工程桩基设计资料，包括桩型、桩径、桩长、混凝土强度等级等，这些信息是理解桩基设计意图与预期性能的基础。施工记录同样不可或缺，成桩工艺决定了桩身可能存在的潜在问题，如泥浆护壁灌注桩可能出现泥皮过厚影响桩身质量；灌注时间能帮助判断混凝土的凝固状态，若灌注时间过长可能导致混凝土离析；混凝土用量可辅助判断桩身是否存在缩径或扩径情况。通过对这些资料的综合分析，检测人员能提前预估桩基可能出现的问题，为制定针对性检测方案提供依据。同时，现场检测条件的准备直接影响检测信号的质量。桩顶作为激振与信号采集的关键部位，需确保平整、干净，浮浆与松散混凝土会阻碍激振力的有效传递以及传感器对信号的准确接收，因此必须彻底清除。检测现场环境也不容忽视，周围强干扰源，如大型施工机械的振动、高压电线的电磁干扰等，会严重干扰检测信号，导致检测结果失真。要选择干扰较小的时段进行检测，或采取屏蔽措施，如设置隔音屏障、使用电磁屏蔽设备等，为检测创造良好的环境条件。

3.2 现场检测操作流程

在激振与信号采集过程中，操作人员需熟练使用激振设备，在桩顶精准施加激振力。激振次数并非随意为之，需根据桩身特性与现场情况确定，一般对于常规桩基，3-5次激振较为合适，以确保获得稳定可靠的反射波信号。信号采集时长也需合理控制，过短可能无法完整采集到桩底及桩身缺陷处的反射信号，过长则会引入过多无用噪声。通常，采集时长设置在能完整捕捉到桩底反射信号且信号稳定的范围内，如0.1-0.5秒。在检测过程中，对采集到的原始数据进行初步筛选与验证至关重要。由于现场环境复杂，原始数据中可能混有因外界干扰产生的异常数据，如瞬间的强电磁干扰可能使采集到的反射波幅值出现突变^[3]。此时，检测人员需依据经验与数据特征，快速识别并剔除这些异常数据。多次重复检测是验证数据可靠性的有效手段，通过对比不同次检测得到的数据，若结果相近，则表明数据可靠；若差异较大，则需进一步排查原因，如检查激振设备是否正常工作、传感器安装是否松动等，直至获得可靠的数据。

3.3 检测数据处理与分析

数据预处理是提高数据质量的首要环节，滤波处理可有效去除噪声干扰，根据检测信号的频率特性，选择合适的滤波器，如低通滤波器可滤除高频噪声，高通滤波器可去除低频干扰。基线校正能消除零点漂移，使反射波曲线的基线保持平稳，便于后续准确分析反射波的相位、幅值等参数。反射波曲线分析与桩身完整性判定是数据处理的核心。运用时域分析，通过计算反射波到达时间，可精确确定桩身缺陷位置，依据公式 $L = ct/2$ (L 为缺陷位置深度， C 为桩身波速， t 为反射波到达时间)。频域分析则通过频谱分析，揭示反射波信号的频率组成，不同类型的桩身缺陷会在频谱图上呈现出特定的频率特征，如缩径缺陷可能导致某一频率段的幅值异常增大。结合桩身完整性判定依据，综合时域与频域分析结果，对桩身是否存在缺陷、缺陷位置与严重程度进行准确判断。在分析过程中，要注意排除因桩身材料不均匀、地质条件变化等因素导致的假缺陷信号，确保判断结果的准确性。

4 低应变反射波法在桩基检测中的应用

4.1 桩基完整性检测

当在桩顶施加瞬态激振力后，产生的应力波沿着桩身传播。在传播过程中，若桩身存在诸如缩径、扩径、断裂、离析等缺陷，应力波会在缺陷处因桩身阻抗的变化而发生反射。通过精确检测反射波的特性，如反射波的相位、幅值大小以及到达时间等，便能对桩基完整性做出准

确判断。对于缩径缺陷,反射波相位与入射波相同,且幅值会有一定程度的增大,这是因为桩身截面变小,阻抗降低,部分应力波被反射回来。而扩径缺陷则表现为反射波相位与入射波相反,幅值相对较小,这是由于桩身截面扩大,阻抗增大,反射波的特性随之改变。遇到断裂缺陷时,反射波信号会较为强烈,且根据反射波到达时间,结合桩身波速,能精确定断断裂位置。在检测离析缺陷时,反射波的特征会呈现出较为复杂的形态,可能出现多个反射峰,且幅值波动较大,这是因为混凝土离析导致桩身材料不均匀,阻抗变化无规律。通过对这些反射波特征的细致分析,检测人员能够全面了解桩身完整性状况,为桩基质量评估提供关键依据。

4.2 桩长确定与核对

当应力波传播至桩底时,会产生明显的反射信号。通过精确测量从激振开始到接收到桩底反射波的时间差(t),再结合已知的桩身混凝土波速(C),利用公式 $L = ct/2$ (L 为桩长),即可准确计算出桩长。在实际工程应用中,首先需要通过同批次混凝土试块进行波速测试,获取较为准确的桩身波速值。在检测过程中,检测人员要确保激振力足够强,以保证应力波能够有效传播至桩底并产生清晰的反射信号。同时,要仔细辨别桩底反射波信号,避免将其他干扰信号误判为桩底反射波。对于一些特殊地质条件下的桩基,如桩周土对桩身波速有较大影响时,还需对波速进行修正。通过低应变反射波法确定的桩长,可与设计桩长进行核对,若两者存在较大偏差,需进一步分析原因,可能是施工过程中桩身未达到设计深度,或者是在测量过程中存在误差。准确的桩长确定与核对,有助于及时发现桩基施工中的问题,保障桩基工程的安全与稳定。

4.3 实时监测与质量监控

在桩基施工过程中,如灌注桩的混凝土浇筑阶段,通过在桩顶实时安装传感器,持续采集激振产生的反射

波信号。随着混凝土的灌注,桩身长度不断增加,应力波的传播路径与反射特征也随之变化。通过对实时采集到的反射波信号进行分析,能够及时了解混凝土的灌注情况。例如,若在灌注过程中发现反射波信号出现异常,如反射波幅值突然增大且相位异常,可能意味着混凝土浇筑过程中出现了堵管、混凝土离析等问题,施工人员可立即停止施工,采取相应措施进行处理,避免质量问题进一步扩大^[4]。在预制桩的锤击或静压施工过程中,也可利用低应变反射波法实时监测桩身的完整性。每锤击或静压一次,采集一次反射波信号,通过分析反射波信号的变化,判断桩身是否因施工过程中的冲击力或挤压力而产生裂缝、断裂等缺陷。这种实时监测与质量监控方式,能够将桩基质量问题及时扼杀在萌芽状态,大大提高桩基工程的施工质量与安全性。

结束语

综上所述,低应变反射波法在建筑工程桩基检测中展现出了显著的优势和应用价值。通过精确检测和分析反射波信号,该方法能够有效评估桩身的完整性,确定桩长,并进行实时监测与质量监控。随着技术的不断进步和应用经验的积累,低应变反射波法在桩基检测领域的应用将更加广泛和深入。

参考文献

- [1]张建平,周佳豪.低应变反射波法在建筑工程桩基检测中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(34):129-131.
- [2]黄健锋.基于低应变反射波法的建筑工程桩基检测技术[J].广东土木与建筑,2023,30(02):108-111.
- [3]陈远鹏.桩基检测中低应变反射波法的实践应用探讨[J].四川建材,2020,46(09):30+34.
- [4]范建,伍李勇.桩基静载与低应变在桩基检测中的配合应用研究[J].中国航班,2022(10):88-91.