

桩基低应变发射波法数值模拟及影响因素分析

余 勇

(广东腾仁达建设有限公司,广东 东莞 523716)

摘要:为探究低应变反射波法在实际应用中的响应特征及各因素影响机制,本文采用 ABAQUS 有限元软件 Explicit 显式动力分析模块,对桩基低应变动测过程中的应力波传播进行仿真模拟,分析接收点布置位置与桩周土特性等因素对应力波传播规律的影响及反射特征的响应。结果表明:ABAQUS/Explicit 模块可有效再现桩基低应变反射曲线的特征波形;当接收点与激振点位于桩中心连线两侧且其连线夹角处于 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 时,反射波信号质量最优,利于缺陷识别和波形分析;桩周土弹性模量增大虽抑制反射波强度但对波速影响微弱,而阻尼系数升高不仅显著削弱反射信号,还会大幅降低脉冲波传播速度。本文成果可为低应变反射波法的测点布置、参数选择及桩-土耦合下信号检测提供借鉴与参考。

关键词:桩基;低应变发射波法;弹性模量;阻尼系数;数值模拟

中图分类号:TU473.16

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)02-0053-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.02.019

Numerical simulation of pile foundation with low strain reflection wave method and analysis of influencing factor

YU Yong

(Guangdong Tengrenda Construction Co., Ltd., Dongguan 523716, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the response characteristics and the influence mechanisms of various factors in the practical application of the low strain reflection wave method, the Explicit dynamic analysis module of the ABAQUS finite element software is adopted to simulate the stress wave propagation during low strain dynamic testing of pile foundations and to analyzes the influence of factors such as receiver placement location and characteristics of the surrounding soil on stress wave propagation patterns and the response of reflection features. The results indicate that the ABAQUS/Explicit module can effectively reproduce the characteristic waveform of the low strain reflection curve of pile foundations. When the receiver and excitation point are located on opposite sides of the line connecting the center of the pile and the angle between their connecting lines is between 90° and 180° , the quality of the reflected wave signal is optimal, which is conducive to defect identification and waveform analysis. Although an increase in the elastic modulus of the surrounding soil suppresses the strength of the reflected wave, it has a minimal impact on wave velocity, and an increase in the damping coefficient not only significantly weakens the reflected signal but also substantially reduces the propagation velocity of the pulse wave. The findings of this study can provide reference and guidance for monitoring point placement, parameter selection, and signal detection under pile-soil coupling conditions in low strain reflection wave method.

Key words: pile foundation; low strain reflection wave method; elastic modulus; damping coefficient; numerical simulation

桩基作为土木工程结构的重要承载构件,广泛应用于高层建筑、桥梁、地铁、港口等工程中,其

收稿日期:2025-06-18

作者简介:余 勇(1979—),男,工程师,从事建筑施工、建筑工程管理工作。

主要功能是将上部结构荷载有效传递至深层稳定地层,以保障工程结构整体稳定性与安全性^[1]。实际施工中,桩基易出现断桩、缩颈、扩颈、沉渣过厚、混凝土离析、钢筋笼上浮等多种缺陷,若施工完成后未能及时发现并处理,可能引发严重安全事故,故需通过科学有效的检测手段全面评估桩基完整性,确保其承载能力和结构安全性满足设计要求^[2-4]。桩基低应变检测技术因操作简便、效率高、成本低等优点,成为目前工程实践中应用最广泛的桩身完整性检测技术之一。然而,桩基为地下隐蔽工程,现场检测受桩周土特性、检测条件设置、传感器布置方式等多因素影响,采集的信号常受干扰,导致缺陷位置和程度判断存在不确定性。为提高检测结果准确性与可靠性,需借助数值模拟手段系统研究低应变检测全过程,深入分析各影响因素对检测信号特征的作用机制。

当前国内学者已运用数值模拟方法对桩基低应变动力响应特性开展大量研究。焦兴鹏等^[5]构建三维轴对称有限元数值模型,建立完整桩基和含不同类型缺陷的轴对称模型,模拟桩顶瞬态纵向激振力后的桩体动力响应,结果表明不同埋深、类型及程度的缺陷在反射波曲线上具有可识别的特征响应,且桩周土条件显著影响波形衰减与检测分辨率。吴兴邦^[6]采用有限元数值仿真技术分析关键物理参数影响,重点考察基桩长度、直径、弹性模量及材料密度对反射波到达时间的作用机制,表明基桩各物理参数对反射波时间特征影响程度各异。陈伟文^[7]建立不同桩长和测点布置方式的仿真模型,模拟不同测点间距下应力波传播,对比桩长计算结果,研究测点间距对桩长识别精度的影响规律,结果表明测点距激振点过近或过远均会降低桩底反射信号的识别准确性,存在最优测点间距范围以确保桩长反演精度。黄东炼^[8]通过有限元数值模拟技术模拟桩顶瞬态激励下应力波传播,提取相应速度时域曲线和频域响应特征,结果表明时域反射波能有效识别桩身主要缺陷位置,而频域分析可辅助判别缺陷类型与桩周土约束状态,二者结合有助于提升低应变检测的综合判识能力。郭宇菲等^[9]构建桩顶竖向瞬态激振力作用下非完整桩纵向振动力学模型,基于

MATLAB 平台用有限差分法离散控制方程,得到桩顶激振作用下竖向振动速度时程曲线。但现有研究多集中于完整桩动力响应或特定缺陷反射波曲线初步模拟,对实际工程中桩顶不同接收点布置及桩周土体特性尚未开展系统深入分析。

本文将低应变法桩基检测理论与工程实际结合,基于有限元分析软件 ABAQUS 建立锤-桩-土耦合动力响应模型,通过改进数值模拟方法并优化边界条件,对比模拟结果与现场低应变检测数据,深入探讨桩顶不同接收点布置对反射波形特征的影响,通过改变桩周土参数总结桩周土体弹性模量与阻尼系数对应力波传播的影响规律,以期低应变法在复杂环境下的测点优化、信号判读及检测可靠性提升提供参考。

1 检测原理

采用低应变法检测桩基时,以激振铁锤为激振源在桩顶施加瞬态纵向冲击力,使桩体振动并激发应力波沿桩身向下传播。当应力波遇到桩身缺陷、桩端或桩周土阻抗差异时,会在该位置反射并形成向上传播的反射波。通过安装在桩顶的高灵敏度传感器接收波动信号,记录桩顶速度随时间变化曲线,再采用数据分析仪对曲线进行分析,识别缺陷或桩端引起的反射波到达时间,结合已知波速即可推算缺陷位置或桩长信息^[10-12]。低应变法现场检测桩基的流程如图 1 所示。

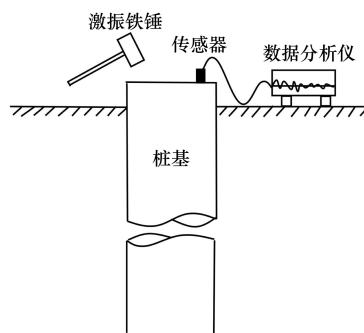


图 1 低应变法现场桩基检测

桩基低应变检测技术的理论基础是一维波动理论。通过在桩顶施加瞬时锤击激振,使桩体内部产生应力波并沿桩身向下传播。应力波的传播本质上是机械能量在桩体材料内部的动态传递过程,反映了桩身结构在受激状态下的动力响应特征。为便于理论分析,将桩体简化为连续、均质、

弹性的理想一维杆件。在此假设下, 忽略桩周土体对桩身运动的约束和阻力, 假定桩受激振后横截面在变形中保持平面, 且轴向应力在截面上均匀分布。桩基的一维力学计算模型如图 2 所示。其中: F 为外荷载, N ; x 为沿桩身轴线方向的位置坐标, m 。

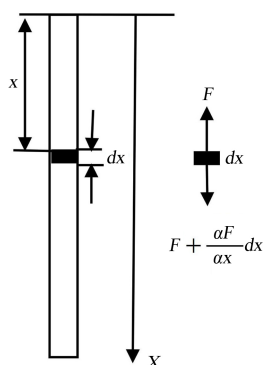


图 2 桩基一维力学计算模型

在某一时刻 t , 于桩身位置 x 处截取一个微小单元段 dx , 根据牛顿第二定律, 微元所受合力与其加速度满足动力平衡关系, 由此建立的运动微分方程可表示为

$$\left(F + \frac{\partial F}{\partial x} dx\right) - F = (\rho A dx) \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ 为桩体密度, kg/m^3 ; A 为桩体横截面积, m^2 ; v 为微元段运动速度, m/s 。

根据达朗贝尔原理, 由式(1)可推导出弹性杆的一维波动方程, 如式(2)所示。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (3)$$

式中: u 为微元段 x 方向的位移, m ; c 为应力波传播速度, m/s ; E 为桩体弹性模量, Pa 。

上述一维波动方程为二阶线性偏微分方程。根据行波理论, 其解可表示为两个沿相反方向传播的行波叠加, 即下行波和上行反射波的叠加, 因此通解可表示为

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (4)$$

式中: f 、 g 分别为 $(x - ct)$ 、 $(x + ct)$ 的函数。

目前, 低应变反射波法在工程检测中普遍采用“峰-峰法”分析实测信号, 通过速度或加速度时程曲线中相邻波峰间的时间差识别应力波传

播特征。典型检测结果为桩顶响应的速度时间曲线, 如图 3 所示。其中: t_1 为第一条波波峰时刻, s ; t_2 为桩端反射波时刻, s 。

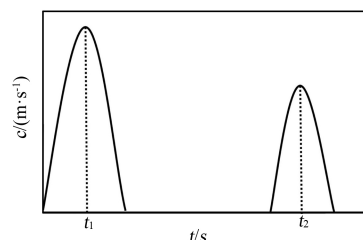


图 3 速度时程曲线

根据该曲线, 提取反射波到达的时间 t' , 结合应力波在桩身中的传播速度, 利用式(5)计算缺陷位置。

$$c = \frac{2L}{\Delta t} = \frac{2L}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

式中: L 为被测桩体长度, m ; Δt 为入射波与反射波之间的时间差, s 。

在锤-桩-土体系中, 桩顶反射波幅值受桩端桩土刚度比和桩侧土特性共同影响, 通过分析该体系下信号总体幅值比, 可求解由桩侧土自身引起的信号衰减量。基于应力波在桩身传播过程中因桩侧土阻力导致能量耗散的机理, 桩周土体的幅值衰减系数 α 可表示^[13]为

$$\alpha = -\frac{\ln(A_m/A_0)}{L} \quad (6)$$

式中: A_m 为反射波幅值; A_0 为入射波幅值。

2 完整桩的数值模拟

2.1 锤-桩-土体系有限元模型建立

利用 ABAQUS 数值模拟软件, 建立实际工程条件下的三维有限元锤-桩-土耦合模型, 以深入研究应力波在完整桩体中的传播特性。C30 混凝土管桩长度为 20 m, 内径为 300 mm, 外径为 500 mm, 壁厚为 100 mm。在实际检测或数值模拟中, 激振锤的几何尺寸与材质特性直接影响输入能量的大小及频率范围。激振锤采用铁质材料, 外形为圆柱形, 直径为 40 mm, 高度为 60 mm。锤头质量适中、刚度较高, 适用于低应变反射波法的瞬态冲击激励。

为在保证计算效率的同时提高模拟精度, 建立有限元模型时对桩周土的处理应合理设置其范

围。一方面,若桩周土区域设置过大,虽能更真实反映桩与周围土体的动力相互作用,但会显著增加模型规模和计算耗时;另一方面,若缩小该区域,虽能提升计算效率,却会因模型边界存在导致原本向外扩散的应力波在边界处反射,形成回传波并影响桩身波动响应,进而干扰检测信号准确性。因此,桩周土建模范围不宜过小,否则边界反射效应将明显干扰检测结果。基于上述分析,将桩周土半径设为桩身半径的 20 倍,轴向长度取桩长的 1.5 倍。为了简化计算,模型材料均设为弹性,物理特性参数如表 1 所示。

表 1 材料的物理特性参数

类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\times 10^8 \text{ Pa}$)	泊松比
土	2 000	1	0.3
混凝土	2 500	300	0.2
铁锤	7 800	2 100	0.3

在模型中,桩体、激振锤及桩周土均采用 C3D8R 单元离散建模。有限元模型中,桩与土间相互作用通过面-面接触关系模拟。以桩周土外表面为主控面,桩体外表面为从属面,实现两者间的力传递和协调变形。在桩体外围边界设置无反射边界条件,有效吸收传播至边界的应力波,避免边界反射导致的信号干扰;同时在桩底土底部边界对所有节点施加纵向位移约束,即限制竖向自由度。

为控制计算规模并提高模拟效率,三维有限元模型的分析区域尺寸及网格划分方案通过多次试算确定。反复试算表明:桩身附近区域采用细密网格是准确捕捉应力波传播特征的关键;远离桩体的桩周土区域,即使网格相对稀疏,对最终提取的速度响应曲线影响甚微。尤其在距桩体较远位置,不同网格密度下的速度时程曲线几乎完全重合,说明该区域网格细化对结果精度提升无

明显作用。因此,在保证计算精度前提下,远离桩体的边界区域适当增大单元尺寸。有限元模型网格划分如图 4 所示。

在低应变反射波法检测中,应力波的产生源于对受检桩顶施加人工锤击引发的瞬态冲击力。目前,多数研究采用时程荷载模拟瞬态动力激励,以更真实反映实际检测中锤击作用的应力波传播效应。针对竖向激振过程,通常以半正弦形式的荷载时程曲线作为输入激励,模拟手锤对桩顶的敲击作用。锤击作用点位于管桩顶部,鉴于锤头直径远小于桩体直径,建模中将其简化为集中力荷载。本文采用峰值荷载为 20 000 kPa 的正弦型压力脉冲作为激励函数,模拟锤击作用在桩顶产生的瞬态冲击荷载,其表达式如下。

$$P(t) = P_0 \sin(\pi t/T_0) \quad (7)$$

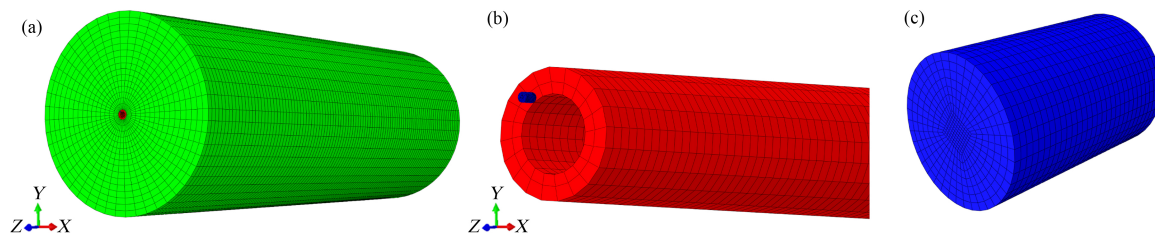
式中: $P(t)$ 为纵向瞬态激振力, kPa; T_0 为冲击荷载峰值作用时间,取 0.001 s; t 为冲击荷载作用时间, s。

2.2 完整桩有限元模型验证

基于 ABAQUS/Explicit 模块,对模型各组成部分进行装配与求解,并采用动力显式分析步模拟系统瞬态动力响应过程。建立长度为 20 m 的完整管桩有限元模型,于桩顶施加正弦压力脉冲荷载,以模拟低应变检测中锤击激励引发的应力波传播。基于上述设置进行数值仿真,最终提取完整桩桩顶横截面节点的速度时程曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知:根据实际测得的反射波到达时间,计算得出桩的峰-峰时差为 8.30 ms。由式 (5) 求得桩的计算长度为 19.60 m。将上述结果与实际桩长 (20 m) 进行对比分析,两者高度吻合,相对误差仅为 2.0% (在工程允许范围内),从而验证了模型的可靠性。

尽管模型验证表明计算桩长与实际桩长的误



(a) 锤-桩-土体系; (b) 锤-桩体系; (c) 锤

图 4 有限元模型及网格划分

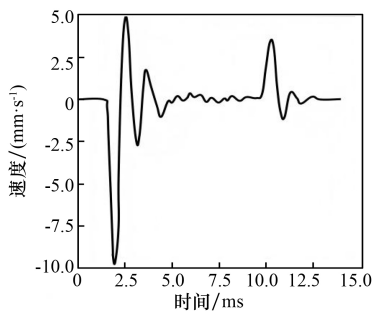


图 5 完整桩基应力波速度时程曲线

差较小且处于工程可接受范围，但该微小误差可能源于多方面因素：模型在激振点附近的网格划分密度、无反射边界条件对波的吸收效果、时间步长的选取，以及将混凝土和土体等实际材料简化为均质弹性体的理想化假设。这些因素均可能对应力波传播速度的精确捕捉及反射时间的准确识别带来一定影响，共同导致数值模拟结果与实际值之间产生微小偏差。

3 完整桩反射波影响因素分析

3.1 不同接收点对反射波形的影响

为深入分析不同接收点位置对应应力波反射特征的影响，采用有限元数值模拟方法，系统研究在桩顶布置多个传感器时捕捉的应力波反射信号变化规律。桩顶设置 3 个应力波信号接收点(图 6)，其中点 1 既是激振点又是接收点。因实际锤

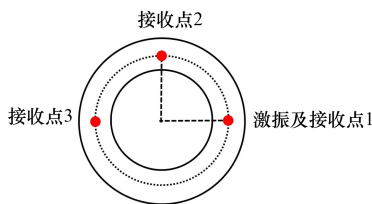
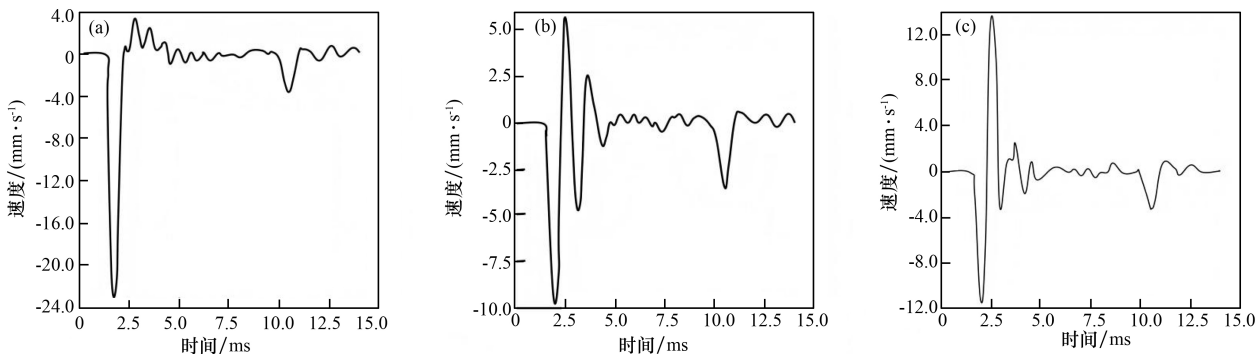


图 6 激振点及接收点布置



接收点编号：(a) 1；(b) 2；(c) 3

图 7 不同接收点对应的反射波形

击作用范围远小于桩的整体截面积，建模时将锤击作用的局部受力区域简化为集中施力点。

通过三维有限元数值模拟分析，得到桩顶不同测点的速度时程响应曲线，如图 7 所示。由图 7 可知：各测点波形规则，桩底反射信号清晰且与初始波相位一致。基于接收点 1 ~ 3 的数据分析，求得其峰 - 峰时差值分别为 8.78、8.50、8.45 ms。根据式 (1) 计算对应的桩身计算长度分别为 20.73、20.08、19.96 m。进一步对比分析发现，当接收点与桩顶激振点 - 桩中心连线的夹角位于 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 时，检测结果最准确稳定。

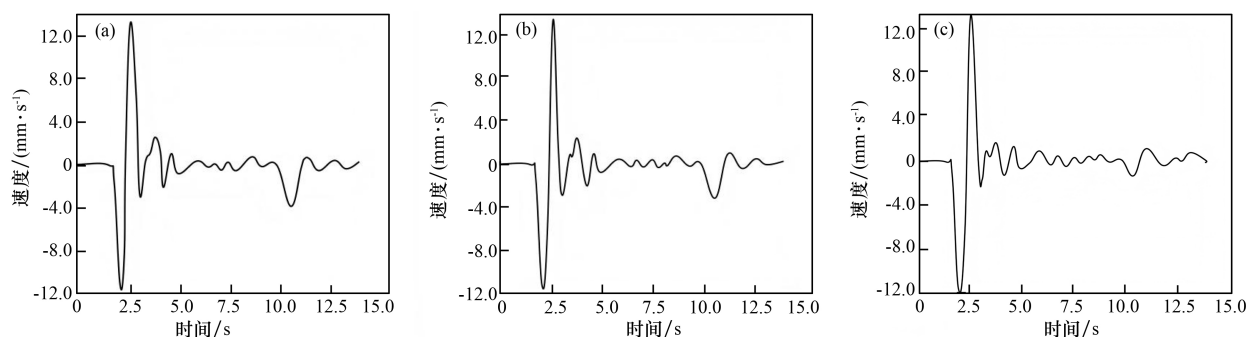
3.2 土弹性模量对桩中脉冲波幅值的影响

研究反射波在桩身中的传播特性时，桩周土体的力学性能至关重要。其中，土体弹性模量作为反映刚度和变形特性的关键参数，对桩 - 土相互作用机制有显著影响。土体弹性模量的高低直接决定其对桩身侧向及端部位移的约束能力，进而影响桩侧摩阻力与桩端阻力的发挥效果及分布特征。基于此，将桩周土弹性模量分别设置为 5、50、500 MPa，不同弹性模量条件下的应力波速度时程曲线如图 8 所示。数值模拟计算结果如表 2 所示。

表 2 土弹性模量对反射传播特性的影响

土弹性模量/MPa	反射波峰值 $A_m / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	入射波峰值 $A_0 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	A_m / A_0	幅值衰减系数
5	3.76	11.18	0.34	0.05
50	3.12	11.04	0.28	0.06
500	1.28	11.68	0.11	0.11

由图 8 可知：随桩周土体弹性模量增大，桩身反射波形的整体变化趋势差异不显著。然而，由表 2 可知：脉冲波在桩身中的幅值衰减系数随



土弹性模量/MPa: (a) 5; (b) 50; (c) 500

图 8 不同土弹性模量对应的反射波形

桩周土体弹性模量提高呈先小幅上升、后明显增加的变化趋势。当桩周土弹性模量从 5 MPa 增至 500 MPa (即增至原来的 100 倍) 时, 幅值衰减系数由 0.05 升至 0.11, 增幅达 120% (即变为原来的 2.2 倍)。由此可见, 当桩周土刚度超过一定阈值后, 其对脉冲波传播的能量耗散影响显著增强, 进而导致波幅迅速衰减。因此, 在桩基动力响应分析中, 需重点考察桩周土刚度对波形衰减特性的影响, 从而提升分析精度和工程判断的可靠性。

3.3 土阻尼系数对桩中脉冲波幅值的影响

为模拟并分析不同土体阻尼系数下脉冲波在桩身中的传播行为, 选定理想弹性模型作为土体基础模型, 保持其弹性模量恒定以排除其他变量干扰。先逐步调整桩周土阻尼系数, 再选取 3 个不同值 (0.001、0.002、0.003), 分别代表从较低到较高的土体阻尼水平。通过有限元数值方法模拟桩在瞬态冲击荷载下的动力响应过程, 随后提取桩顶速度时程曲线, 进而对比分析不同阻尼条件下速度波形的幅值变化。不同阻尼系数作用下桩身应力波速度随时间变化的时程曲线如图 9 所示, 不同土阻尼系数对脉冲波传播特性的影响如表 3 所示。

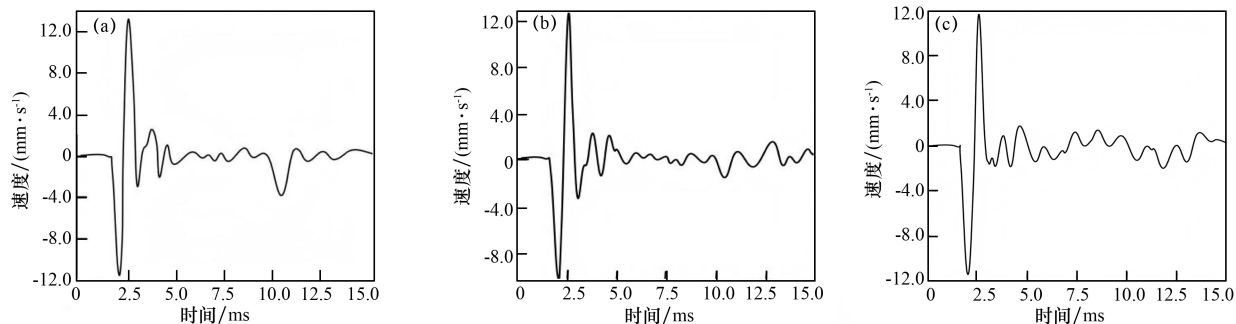
表 3 土阻尼系数对反射传播特性的影响

土阻尼系数	反射波峰值 A_m	入射波峰值 A_0	A_m/A_0	幅值衰减系数
0.001	2.23	11.77	0.19	0.08
0.002	1.67	10.04	0.17	0.09
0.003	1.19	11.19	0.11	0.11

由图 9 可知: 随桩周土体阻尼系数增加, 反射波波形特征显著变化, 表明土体阻尼对脉冲应力波在桩身中的传播具有显著影响。由表 3 可知: 应力波幅值衰减系数随土体阻尼系数增大同步增大。当土体阻尼系数从最小值提升至其 3 倍时, 幅值衰减系数增长约 1.35 倍, 说明增强的土体阻尼会显著加剧脉冲波传播中的能量耗散。因此, 在桩基动测分析或完整性检测中, 需充分考虑桩周土阻尼特性对脉冲波传播行为的影响。若忽略土体阻尼变化, 可能导致脉冲波传播规律误判, 进而影响桩身结构状态的准确评估。

4 结 论

(1) 当接收点与激振点夹角为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时, 计算桩长为 19.60 m, 与实际桩长 20 m 相比, 相



土阻尼系数: (a) 0.001; (b) 0.002; (c) 0.003

图 9 不同土阻尼系数对应的反射波形

对误差仅为 2.0% (在工程允许范围内)。这表明所建立有限元模型能有效反映实际检测的动力响应过程,具有良好的准确性与可靠性。

(2) 当接收点与激振点位于桩中心连线两侧,且二者相对于桩中心连线的夹角在 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 时,可获得最优波形识别效果和较高信号分辨率。此时,反射波信号受桩头直接干扰的影响较小,更有利于桩身缺陷或桩端反射信息的识别。

(3) 随着桩周土弹性模量从 5 MPa 增至 500 MPa,反射波幅值衰减系数由 0.05 升至 0.11,增幅达 120%,表明高刚度土层对波能量的耗散作用显著增强。在此弹性模量变化范围内,应力波传播速度基本稳定,尤其在高刚度条件下,桩周土对波形衰减的影响更为显著。

(4) 当土体阻尼系数从初始值(0.001)增至其 3 倍(0.003)时,幅值衰减系数增长约 1.35 倍,表明土体阻尼显著加剧波能量耗散,导致反射信号明显衰减。

(5) 本文以完整桩为主要对象进行数值模拟,未考虑桩身缺陷影响;桩周土采用线弹性模型,未纳入土体非线性、塑性及桩-土接触滑移等复杂行为,一定程度上简化了实际工况的复杂性。后续将拓展至含缺陷桩模拟,进一步系统分析缺陷特征与反射信号的关系,引入土体非线性模型及桩-土接触滑移分析,以增强工程适用性并提升预测精度。

参考文献:

[1] 柴红涛,文松霖. 组合荷载作用下桩基承载力屈服包

络线特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2025,46(5):1556-1562;1572.

[2] 张磊,杨炎华,刘建波. 在役桩基完整性检测技术研究进展[J]. 工程建设,2019,51(10):56-60.

[3] 蒋彦华. 桩身砼完整性声波透射法检测应用研究[J]. 湖南交通科技,2016,42(2):192-195.

[4] 徐莉,杨兴健. 广东省软土地区大直径灌注桩的设计、施工及检测[J]. 建筑结构,2022,52(增刊1):2681-2687.

[5] 焦兴鹏,高子杰. 低应变反射波法测桩的数值模拟与验证[J]. 中外公路,2015,35(5):58-62.

[6] 吴兴邦. 采用低应变反射波法的桥梁基桩检测数值仿真分析[J]. 公路工程,2015,40(6):189-193.

[7] 陈伟文. 低应变反射波法在桩基检测中的运用及模拟分析[J]. 江西建材,2022(6):81-82.

[8] 黄东炼. 桩基完整性低应变检测与数值模拟研究[J]. 广东建材,2024,40(11):78-81.

[9] 郭宇菲,任悦,孟泽,等. 大直径桩低应变测试纵波法数值模拟[J]. 安徽建筑,2019,26(5):125-126.

[10] 马晔,张理轻,杨宇. 在役桥梁桩基础低应变反射波法检测试验研究[J]. 世界地震工程,2010,26(增刊1):216-220.

[11] 方聪,卢博瑶,张浩. 低应变反射波法在建设工程桩基检测中的运用[J]. 建筑结构,2018,48(增刊2):868-870.

[12] 高红伟,姚勇,陈代果,等. 低应变反射波法在桩基检测中的应用[J]. 西南科技大学学报,2013,28(3):40-44.

[13] 邢心魁. 反射波法桩基动测技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.