DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260134

基于低应变法的桩基完整性检测数值模拟与反射波特征研究

司　宇
(安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司,安徽 合肥 230088)

摘　要: 为探究低应变法在桩基完整性检测中的反射波响应及缺陷识别能力,基于一维波动理论与桩-土动力相互作用机制,建立二维轴对称数值模型,对完整桩及不同缺陷桩进行模拟分析。结果表明:完整桩反射波主要表现为桩端回波,缩颈和断桩工况均会产生提前反射,且反射峰幅值随截面缩减率增大而明显提高;缺陷反射时间与埋深呈良好线性关系,数值结果与理论值偏差小于0.20 ms,表明低应变法具有较好的缺陷定位可靠性;波速扰动±10%可引起约±0.30 m的深度反演误差,提高冲击能量可增强反射信号稳定性。研究结果可为低应变检测参数优化和桩身缺陷定量判识提供参考。

关键词: 低应变法;桩基完整性;反射波分析;数值模拟;参数敏感性
中图分类号: TU473.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0063-05

Numerical Simulation of Pile Foundation Integrity Testing Based on Low-strain Method and Research on Reflected Wave Characteristics

SI Yu
(Anhui Province Expressway Test and Inspection Research Center Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: To investigate the reflected-wave response and defect identification capability of the low-strain method in pile foundation integrity testing and based on one-dimensional wave theory and the pile-soil dynamic interaction mechanism, a two-dimensional axisymmetric numerical model is established to simulate and analyze the intact piles and piles with different defects. The results show that the reflected wave of an intact pile is mainly characterized by the pile-end echo, whereas necking and pile breakage defects produce clear early reflections. The amplitude of the reflection peak increases markedly with the increase in the cross-sectional reduction ratio. The defect reflection time exhibits a good linear relationship with the defect depth, and the deviation between the numerical results and theoretical values is less than 0. 20 ms, indicating that the low-strain method has good reliability in defect location. A wave velocity disturbance of ±10% can cause a depth inversion error of approximately ±0. 30m, while increasing the impact energy can improve the stability of the reflected signal. The findings provide a reference for parameter optimization in low-strain testing and quantitative identification of pile defects.

Keywords: low-strain method; pile foundation integrity; reflected wave analysis; numerical simulation; parameter sensitivity

0　引　言

桩基础作为工程结构的重要承载构件,其完整性直接关系到上部结构安全与长期服役性能。受成孔质量、混凝土灌注连续性、地层扰动及施工控制等因素影响,桩身易产生缩颈、夹泥、离析及断桩等缺陷,从而削弱桩-土协同受力能力并引发潜在工程风险。近年来,桩基检测技术在检测方法体系与工程应用层面不断发展,相关研究在检测手段优化与评价体系构建方面也取得了一定进展[1-2]。

低应变反射波法具有检测效率高、操作便捷、对桩体扰动小等优点,在桩基完整性检测中得到了广泛应用。已有研究表明:该方法可通过反射波形识别桩身波阻抗变化,并用于既有桥梁基桩、加固桩及高承台桩等不同对象的完整性评价[3-5]。近年来,ABAQUS、ANSYS/LS-DYNA、FLAC等数值模拟平台逐渐应用于低应变检测研究,可通过建立桩-土动力相互作用模型,分析缩颈、夹泥、扩径及断桩等缺陷条件下的应力波传播与反射特征[6];同时,卷积神经

收稿日期:2026-02-06
作者简介:司宇(1995—),男,本科,工程师,从事公路水运工程检测研究工作。

网络、时频分析等方法也被用于复杂反射波信号处理，提高了缺陷波形识别能力[7-8]，低应变法与声波透射法等综合检测手段的结合则进一步提升了工程判识可靠性[9]。但从现有研究和工程应用来看，低应变检测仍存在波形解释主观性较强、桩周土约束与桩端边界影响难以分离、振源特性和波速取值易引起定位误差等问题[10-11]。此外，部分研究偏重工程案例解释或单一缺陷识别，对不同缺陷程度、埋深变化及检测参数扰动下的反射时间、幅值响应和定位误差缺少系统量化分析，限制了低应变法由经验判读向精细化评价发展[12-13]。

总体而言，当前研究在多缺陷工况对比、关键检测参数敏感性评价以及缺陷定位误差量化方面仍显不足，尚需进一步建立缺陷参数与反射波特征之间的定量关系。

基于此，本文在低应变法波动理论框架下构建桩-土耦合数值模型，设置典型缺陷工况并开展反射波响应对比分析，进一步从波速与激振能量角度进行敏感性研究，为桩基完整性检测的定量解释与参数优化提供参考。

1　工程背景

本研究依托某沿江地区高桩码头工程。该码头岸线长度约254 m，平台尺度约254 m×30 m，并通过2座引桥与后方陆域相连，具备重载装卸与物流集散等功能。码头主体采用高桩梁板式与高桩墩式结构体系，基础以φ1 000 mm PHC管桩为主，排架间距约7 m，单榀排架由直桩与斜桩组合受力。由于结构体系整体柔性较大、传力路径复杂，其承载与变形性能对桩基础完整性及受力状态具有显著依赖性。

场地浅部主要为填土、砂质粉土及淤泥质粉质黏土等软弱土层，地基承载力与侧向约束能力相对不足，桩基础需将上部荷载有效传递至下伏较稳定土层。在施工质量控制、复杂地层条件及长期服役作用的共同影响下，桩身可能出现缩颈、夹泥、离析或局部缺陷等风险，从而削弱桩基承载能力与整体协同受力性能，进而对高桩结构的安全性与耐久性造成不利影响。因此，有必要结合工程实际，研究桩基础在低应变激励条件下的动力响应特征与波形判读规律，评估低应变法对桩身缺陷的识别能力与适用边界，为高桩码头桩基质量检测、完整性评价及运营期安全管理提供技术支撑。

2　低应变法理论基础与数值模型建立

2.1　低应变法基本理论与控制方程

低应变法通过瞬态冲击在桩顶激发纵向应力波，并基于反射信号来判定桩身完整性。对于均质直桩，波动传播可近似为一维纵向弹性波，其基本控制方程为：

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

式中：$u(z,t)$为轴向位移；z为桩深坐标；t为时间；c为纵波传播速度。

c的表达式为：

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

式中：E为桩体弹性模量；ρ为材料密度。

应力波传播过程中，当遇到截面或材料刚度突变界面时，将产生反射与透射效应，其反射系数R为：

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{3}$$

式中：$Z = \rho c A$，为波阻抗，其中A为桩截面面积；下标1、2分别表示界面上下介质参数。若截面突变或材料刚度发生变化，将引起反射信号幅值与相位特征改变。

缺陷反射信号到达时间t_d与缺陷埋深h的关系为：

$$t_d = \frac{2h}{c} \tag{4}$$

该关系为后续数值模拟缺陷定位与信号验证提供了理论依据。

2.2　桩-土动力相互作用与边界条件设定

为合理模拟低应变冲击过程，桩-土体系被视为轴对称弹性介质系统。桩体采用线弹性本构模型，土体考虑等效弹性或黏弹性模型，以反映波能衰减特征。

2.2.1　桩体本构模型

桩体采用线弹性模型，其应力-应变($\sigma-\varepsilon$)关系为：

$$\sigma = E\varepsilon \tag{5}$$

2.2.2　土体等效阻尼模型

为考虑波传播衰减效应，引入等效阻尼系数μ，动力平衡方程为：

$$M\ddot{\mu} + C\dot{\mu} + K\mu = F(t) \tag{6}$$

式中：M为质量矩阵；C为阻尼矩阵，K为刚度矩阵，

$F(t)$为冲击荷载时程。

2.2.3　边界与荷载条件

边界与荷载条件的设置旨在尽量还原低应变检测的波动传播环境。桩底采用固定或弹性支承以表征桩端约束与反射特性；桩侧与土体采用黏结接触以体现桩–土共同作用及能量耗散；计算域外边界设置吸收边界以削弱边界反射干扰；冲击荷载采用半正弦脉冲输入，以模拟现场锤击激励的短时特征并保证信号频带合理。

2.3　数值模型构建与参数选取

2.3.1　模型几何与网格划分

采用FLAC二维有限差分数值模型对桩–土动力响应体系进行模拟，以提高计算效率并保证波动传播精度。模型包含桩体、周围土体及外部吸收边界层，以有效削弱计算边界反射对波形响应的干扰。桩体几何参数依据工程常用取值设定，桩长L = 12 m，桩径D = 0.8 m。土体计算域沿径向延伸不小于5D，以确保桩侧波能衰减充分、边界效应可控。

数值模型示意图见图1。

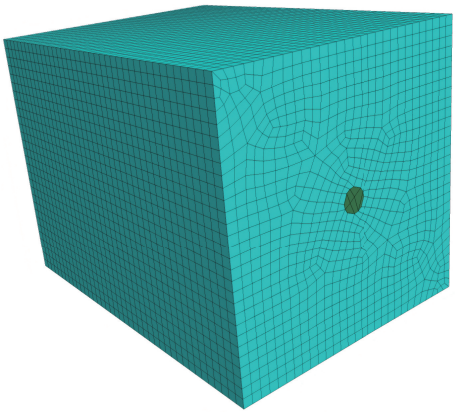


图1　数值模型示意图

为兼顾计算精度与计算效率，模型采用结构化网格进行离散，桩体及缺陷敏感区域进行局部加密处理，单元尺寸控制在0.05~0.10 m内，以满足低应变应力波传播的时间与空间分辨率要求。

2.3.2　材料参数输入

桩体采用线弹性本构模型，以反映低应变检测过程中混凝土桩在小扰动条件下的弹性动力响应；土体采用等效弹性模型，用于表征桩周介质对应力波传播的约束作用及能量耗散效应。相关材料参数结合工程经验值及既有研究成果确定，能够满足低应变检测频率范围内波动传播分析的精度要求。采用等效弹性土体模型可在保证计算效率的同时，减少复杂土层分布和参数离散性对不同缺陷工况对比结果的干扰，有利于突出缩颈、断桩等桩身结构突变对反射波时间、幅值及波形特征的影响，使各工况之间具有较好的可比性。需要说明的是，实际场地土体具有一定非均质性，局部刚度和阻尼差异可能使现场反射波出现轻微衰减、展宽或局部波动。

由于本文研究重点在于揭示不同缺陷参数下反射波响应的相对变化规律，等效弹性模型能够满足本文缺陷识别机理分析与参数敏感性研究需要。

数值模型材料参数见表1。

表1　数值模型材料参数

材料类型	密度ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量E/GPa	波速c/(m·s^{-1})
混凝土桩	2 500	30	3 460
中密砂土	2 000	0.20	316

2.3.3　缺陷工况设定

为系统研究桩身缺陷对低应变反射信号特征的影响规律，在数值模型中引入多种典型缺陷工况，包括轻微缩颈、中等缩颈、严重缩颈及断桩等形式。缺陷通过局部截面缩减方式进行等效模拟，并设置不同缺陷深度与截面削弱比例，以反映工程中常见施工质量问题。

缺陷参数设定方案见表2。

表2　缺陷参数设定方案

工况编号	缺陷类型	缺陷深度/m	截面缩减率/%
C0	完整桩		0
C1	轻微缩颈	4.0	10
C2	中等缩颈	6.0	30
C3	严重缩颈	6.0	50
C4	断桩	5.0	>80

2.3.4　冲击荷载与信号采集参数

冲击荷载$F(t)$采用半正弦脉冲函数：

$$F(t)=F_0\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right),0\leqslant t\leqslant T \tag{6}$$

式中：F_0为冲击峰值力；T为脉冲持续时间。

加载参数依据低应变现场检测经验选取，以保证激励频率覆盖主要反射特征频段，同时避免引入高应变非线性效应。

冲击信号参数设定见表3。

表3　冲击信号参数设定

参数	数值	说明
峰值力F_0/kN	3~5	符合低应变加载范围
脉冲宽度T/ms	2~4	模拟锤击持续时间
采样频率/kHz	≥ 10	保证波形时间分辨率

2.3.5　数值模型验证

为验证桩–土动力模型的适用性，选取与数值模

型参数一致的完整桩进行现场检测波形对比。为减小锤击能量、传感器耦合及采集幅值差异影响，现场实测与数值模拟结果均采用归一化反射波幅值表示，如图 2 所示。

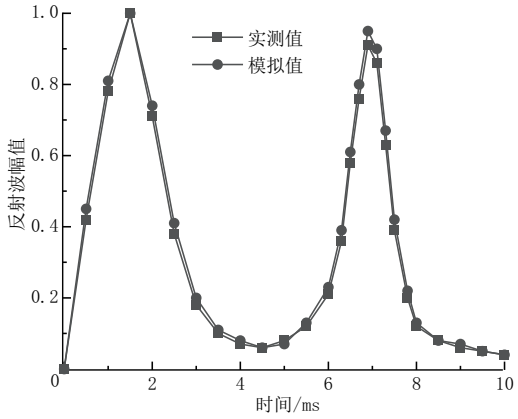


图 2　现场实测与数值模拟反射波幅值对比

由图 2 可见，现场实测与数值模拟 2 组曲线整体趋势一致，均呈现“初始激振响应—波形衰减—桩端反射增强”的完整桩典型波形特征。0 ~ 2.5 ms 内初始激振峰明显；3.0 ~ 5.5 ms 内幅值较低且未出现提前反射峰，表明验证桩桩身连续性较好。在桩端反射阶段，现场实测曲线于 6.7 ~ 7.1 ms 附近出现反射峰，峰值约 0.91；数值模拟曲线在 6.9 ms 附近达到峰值，幅值约 0.95。两者反射峰到达时间和幅值均较为接近，说明模型能够较好反映应力波传播、桩端反射及桩周土阻尼衰减特征。现场实测曲线的局部波动主要与土层非均质性、锤击离散性及环境噪声有关。总体来看，数值模拟结果与实测结果吻合较好，可为后续缺陷工况分析提供模型基础。

3　数值模拟结果与反射波响应特征分析

3.1　完整桩与缺陷桩反射波时程对比

完整桩与不同缺陷桩反射波时程对比见图 3。

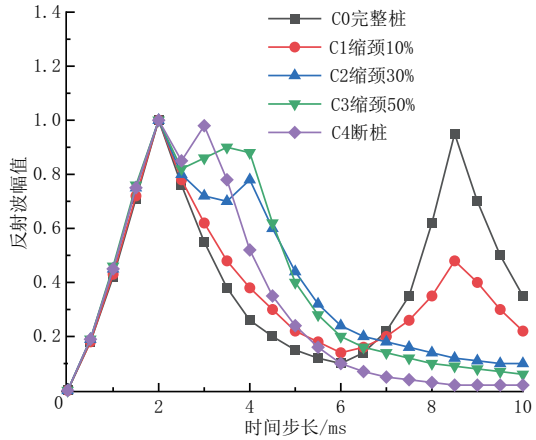


图 3　完整桩与缺陷桩反射波时程对比图

由图 3 可知，各工况初始激振阶段均出现明显主峰，归一化幅值接近 1.0，说明输入荷载具有较好一致性。完整桩 C0 未出现明显提前反射峰，仅在 6.8 ~ 7.0 ms 附近形成桩端反射峰，峰值约 0.95，表明桩身连续性较好。缺陷桩均出现不同程度的提前反射，其中 C1 缺陷埋深 4.0 m，反射峰约出现在 2.40 ms，峰值约 0.48；C2、C3 缺陷埋深均为 6.0 m，反射时间分别约 3.60、3.65 ms，峰值分别增至 0.78、0.88；C4 断桩埋深 5.0 m，反射峰约出现在 3.05 ms，峰值约 0.98，后续波形衰减较快。总体来看，反射峰出现时间主要受缺陷埋深控制，而反射峰幅值对缺陷程度更敏感，截面削弱越明显，波阻抗突变越强，提前反射峰越突出。

3.2　缺陷深度对反射时间的影响规律

不同缺陷深度工况下理论反射时间与数值反射时间对比见图 4。

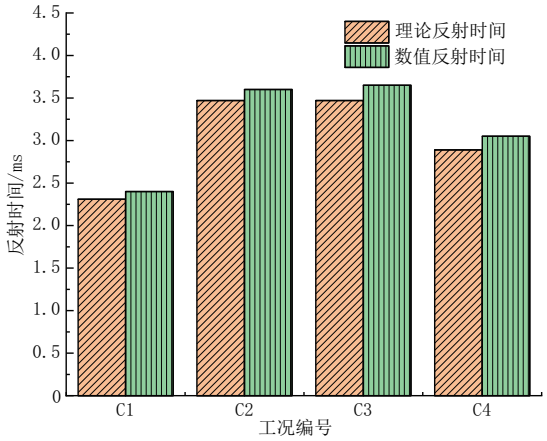


图 4　不同缺陷工况下反射时间响应特征对比图

由图 4 可知，缺陷反射时间随埋深增加呈近似线性增长，说明反射波到达时间能够较好表征缺陷位置。C1 工况埋深为 4.0 m，反射时间约 2.40 ms；C4 工况埋深为 5.0 m，反射时间约 3.05 ms；C2、C3 工况埋深均为 6.0 m，反射时间分别约 3.60、3.65 ms。缺陷埋深由 4.0 m 增至 6.0 m 时，反射时间由 2.40 ms 增至约 3.60 ms，增幅约 50.0%。对比 C2 与 C3 工况可知，两者埋深相同但截面缩减率不同，反射时间仅相差约 0.05 ms，说明在波速一定条件下，反射时间主要受缺陷位置控制，缺陷程度对到达时间影响较小。C4 虽为断桩工况，但因埋深为 5.0 m，其反射时间位于 C1 与 C2/C3 工况之间。总体来看，反射时间可用于缺陷定位，而缺陷严重程度仍需结合反射幅值和波形衰减特征进行综合判断。

3.3　缺陷程度对反射幅值的影响特征

缺陷程度对反射幅值的影响特征见图 5。

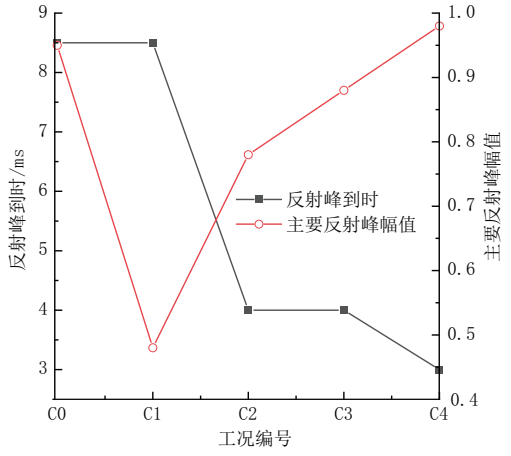


图 5　缺陷程度对反射幅值的影响特征

由图 5 可见，反射峰幅值随截面缩减率增大呈显著上升趋势。完整桩（C0）桩端回波峰值为 0.95，作为基准状态；轻微缩颈（C1，10%）反射峰幅值为 0.48，反射特征相对较弱。随着缺陷程度加重，中等缩颈（C2，30%）与严重缩颈（C3，50%）反射峰幅值分别提高至 0.78 与 0.88，幅值增幅明显，表明波阻抗突变效应逐步增强。断桩工况（C4，>80%）反射峰幅值达到 0.98，接近初始冲击主峰，且后续信号快速衰减，显示出显著结构不连续特征。整体结果表明，反射幅值对缺陷程度具有良好敏感性，可作为低应变完整性评价的重要定量指标。

4　敏感性研究

4.1　波速不确定性对缺陷定位精度的影响

基于已建立的低应变数值模型，进一步引入不同波速条件（±10%）对缺陷反射时间的影响进行参数扩展分析，以评估材料参数不确定性对缺陷深度反演精度的影响。选取 C2 工况（h=6.0 m）作为基准，对比不同波速下的反射延迟时间变化。

不同波速条件下的反射时间变化见表 4。

表 4　不同波速条件下的反射时间变化

波速 c/(m·s^{-1})	反射时间 t/ms	推算缺陷深度 h'/m	定位误差/m
3 110	3.95	5.69	−0.31
3 460	3.60	6.00	0
3 810	3.30	6.33	+0.33

由表 4 可知，当波速降低 10% 时，缺陷反射时间延长至 3.95 ms，反演深度低估约 0.31 m；当波速提高 10% 时，反射时间缩短至 3.30 ms，反演深度高估约 0.33 m。整体来看，波速变化±10% 将导致缺陷定位误差控制在±0.35 m 以内，且误差与波速呈近似线性响应关系。该结果表明，在波速不确定性较高的地层条件下，应结合现场实测波速或区域修正系数对检测结果进行校正，以提升缺陷深度反演精度。

4.2　不同冲击能量条件下的反射幅值统计

在保持缺陷几何参数与材料条件不变的前提下，对冲击峰值力 $\boldsymbol{F}_0$ 进行参数扩展（3、4、5 kN），以分析冲击能量变化对缺陷反射信号幅值稳定性与识别可靠性的影响。反射幅值稳定性采用幅值波动系数 C_V 进行量化表征，其表达式为：

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{\mu}$ 为反射峰均值；$\boldsymbol{\sigma}$ 为幅值标准差。

不同冲击能量条件下的反射幅值见表 5。

表 5　不同冲击能量条件下的反射幅值

峰值力 F_0/kN	初始主峰幅值 A_0	缺陷反射峰幅值 A_r	幅值波动系数 C_V/%
3.0	1.00	0.84	6.5
4.0	1.00	0.87	4.2
5.0	1.00	0.89	3.1

由表 5 可见，随着冲击峰值力由 3 kN 提升至 5 kN，缺陷反射峰幅值由 0.84 增至 0.89，增幅约 6.0%，表明提高冲击能量有助于增强反射信号强度。同时，幅值波动系数由 6.5% 降低至 3.1%，降幅超过 50%，反映出信号稳定性显著提升，有利于弱缺陷工况下的可靠识别。然而，当冲击能量过大时可能引入局部非线性响应，因此在工程应用中建议采用中等冲击能级（约 4 kN），以兼顾信号清晰度与测试安全性。

5　结　语

（1）低应变反射波时程对桩身缺陷具有显著敏感性。完整桩桩端回波主峰出现在 8.5~9.0 ms，而缺陷桩反射峰提前至 3.0~5.0 ms；当缺陷程度由 10% 增至超过 80% 后，反射峰幅值由 0.48 提升至 0.98，表明反射时间与幅值可作为缺陷定位与严重性评估的关键定量指标。

（2）缺陷深度与反射延迟时间呈良好线性关系。C1~C4 工况反射时间范围为 2.40~3.65 ms，与理论传播时间偏差控制在 0.09~0.18 ms 以内，验证了低应变法在缺陷深度反演中的可靠性。波速扰动±10% 将引起缺陷定位误差约±0.30~0.33 m，表明波速参数是影响定位精度的重要敏感因素。

（3）冲击能量对反射信号稳定性具有显著影响。随着冲击峰值力由 3 kN 提升至 5 kN，缺陷反射峰幅值提高约 6.0%，幅值波动系数由 6.5% 降低至 3.1%，信号稳定性显著增强。综合信号强度与非线性风

（下转第 103 页）