

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201905047



采用复连续小波变换的桩基 损伤位置识别方法

余贤英^{1,2}, 林城旭¹, 吴金福², 刘景良¹, 吴心坦²

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002;
2. 福州市第三建筑工程公司, 福建 福州 350011)

摘要: 提出基于复连续小波变换(CCWT)的桩基损伤位置识别方法. 首先,对响应信号进行复连续小波变换,得到小波系数矩阵;然后,分析不同频段的相位角,确定桩身损伤位置;最后,通过桩基三维有限元模型数值算例和桥梁桩基实例,对基于复连续小波变换的桩基损伤位置识别方法进行验证. 结果表明:复连续小波变换不但能够准确估计桩长,而且能够捕捉相位图上的交叉点,实现桩身损伤位置识别;与传统损伤检测方法相比,复连续小波变换可凸显响应信号的相位信息,成功识别桩身微小损伤的位置;但该方法在识别过程中出现较多的干扰点,需要借助其他桩身损伤检测方法进行判定和排除.

关键词: 桩土效应; 相位角; 损伤识别; 复连续小波变换; 无损检测

中图分类号: TU 311.3; TU 473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)02-0177-09

Damage Localization Method of Piles Using Complex Continuous Wavelet Transform

YU Xianying^{1,2}, LIN Chengxu¹, WU Jinfu²,
LIU Jingliang¹, WU Xintan²

(1. School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2. Fuzhou Third Construction Engineering Company, Fuzhou 350011, China)

Abstract: The complex continuous wavelet transform (CCWT) was introduced to localize pile damage. CCWT was performed on the response signal to obtain wavelet coefficient matrix. The resultant coefficients were adopted to construct phase angles at different frequency bands, and to locate the pile damage. 3D finite element model of a pile and an example of a real bridge pile were used to investigate the CCWT based on damage localization method. The results show that CCWT is capable of estimating pile length accurately and localizing pile damage by capturing the crossing points in the phase diagram. Compared with the traditional damage detection method, the complex continuous wavelet transform highlights the phase information of the response signal and successfully identifies the location of the tiny damage of the pile body; however, this method also has a few interference points in the identification process, which needs to be judged and excluded by other pile damage detection methods.

Keywords: pile-soil interaction; phase angles; damage identification; complex continuous wavelet transform; non-destructive test

收稿日期: 2019-05-28

通信作者: 刘景良(1983-),男,副教授,博士,主要从事桥梁结构健康监测的研究. E-mail:liujingliang@fafu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51608122); 中国博士后科学基金面上资助项目(2018M632561); 可持续与创新桥梁福建省高校工程研究中心开放课题资助项目(SIBERC201801)

桩基作为支撑上部结构的受力构件,在各种复杂的工程地质条件下通常表现出良好的承载能力,因而被广泛地应用于高层建筑和大跨度桥梁结构中.然而,服役期间的桩基长期受到工作载荷及外部环境因素的影响,容易产生损伤并逐渐累积.因此,若不能及时发现并诊断桩身存在的损伤,将会给结构带来极大的安全隐患.对桩基进行完整性评估和损伤诊断是保障结构安全使用的必要措施之一,具有十分重要的工程应用价值.桩基的完整性评估通常通过静力或动力试验实现^[1-2].静力试验由于需要大型加载设备,往往测试不方便且十分费时^[3];而动力试验因设备携带便利且检测速度较快,在桩身质量评价中得到广泛的应用^[4].桩基动力试验方法包括低应变和高应变试验.其中,低应变试验方法对桩身破坏较小,特别适合桩身的完整性评估,如反射波(SE)法和脉冲响应(IR)法^[5-6].小波变换作为一种新型时频分析技术,已在桩身损伤检测中得到广泛的应用^[7-9].Park 等^[10-11]利用谐波小波分析(HWAW)和反射波法对不同模式的反射信号进行数值求解.Ni 等^[12-13]采用连续小波变换(CWT)对尚未埋入土中的桩身进行一系列低应变试验和损伤识别研究.

由于桩身损伤引起的反射波振幅变化常常被入射波掩盖,仅根据振幅的变化并不能很好地判定桩身的损伤位置.相比之下,相位信息对损伤位置更为敏感,而复连续小波变换(CCWT)能够更好地提取相位信息,故可用于识别桩身的损伤位置.基于此,本文引入 CCWT 提取反射波信号的相位交叉点信息,识别桩身的具体损伤位置,并通过数值算例和桩基实例对基于复连续小波变换的桩基损伤位置识别方法进行验证.

1 基本原理

1.1 低应变反射波法

低应变反射波法又称锤击法,是一种基于一维弹性杆应力波波动理论的无损检测方法.该方法在桩顶施加激振信号,产生应力波,应力波在沿桩身传播的过程中可能遭遇不连续界面,导致该截面的阻抗发生变化,从而产生反射波.通过分析反射波信号的幅值及相位特征,可评估桩身的完整性.

假定桩为一维弹性杆(图 1),其长度为 L ,横截面积为 S ,弹性模量为 E ,桩身质量密度为 ρ ,弹性波波速为 c .以单元 dx 为对象,建立 x 方向的平衡方程为

$$\sigma_x S - \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) S = -\rho S dx \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \tag{1}$$

式(1)中: u, t 和 σ_x 分别为位移、时间和截面应力.

由应力-应变关系可知, $\sigma_x = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = E \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$.将其代入式(1),并令 $c^2 = E/\rho$,可得一维波动方程为

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \tag{2}$$

当桩身的横截面面积 S 发生变化时,相应的广义波阻抗 Z 也将发生变化.根据应力波理论,当应力波到达波阻抗界面时,损伤处的应力波传递公式^[14]可表示为

$$v_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot v_i, \quad v_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot v_i. \tag{3}$$

式(3)中: v_i, v_r, v_t 分别为入射波、反射波和透射波; $Z_1 = \rho c S_1$ 为入射面的波阻抗, S_1 为桩身完整截面面积; $Z_2 = \rho c S_2$ 为反射面的波阻抗, S_2 为桩身损伤截面面积.

1.2 复连续小波变换

小波变换继承和发展短时傅里叶变换局部化的思想,克服窗口大小不随频率变化的缺点,是信号时频分析和处理的理想工具.其中,复高斯连续小波变换能够获得良好的时间和频率集中度,特别适合信号的相位分析.复高斯小波母函数的数学表达式为

$$\phi(t) = C_p \exp(t^2) \cdot \exp(-jt). \tag{4}$$

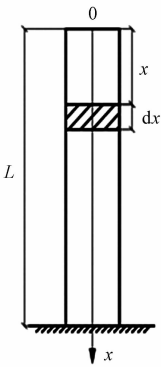


图 1 一维弹性杆
Fig. 1 One-dimensional elastic bar

式(4)中: C_p 是当 $|\psi(t)^p|^2=1$ 时的缩放参数, $\psi(t)^p$ 为 $\psi(t)$ 的 p 阶导数。

任意信号 $x(t)$ 的复高斯连续小波变换为

$$W_x(a,b)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\cdot\frac{1}{\sqrt{a}}\cdot\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}dt. \tag{5}$$

式(5)中: a 为伸缩因子; b 为尺度因子; $\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}$ 为 $\psi(\frac{t-b}{a})$ 的复数共轭, $\psi(\frac{t-b}{a})$ 为进行平移和缩放的小波母函数。

由式(5)可得 $W_x(a,b)$, 而其对应的相位角 $\phi(t)$ 可表示为

$$\phi(t)=\arctan\frac{W_I(a,b)}{W_R(a,b)}. \tag{6}$$

式(6)中: $W_R(a,b)$, $W_I(a,b)$ 分别为 $W_x(a,b)$ 的实部与虚部。

1.3 桩长估计

桩长判别流程图, 如图 2 所示. 在应力波传播过程中, 反射波通常产生在桩的损伤截面和底部截面上. 但是, 与桩底反射波的能量相比, 损伤截面的反射波能量很小, 可以忽略不计. 在对实测响应信号进行连续小波变换后, 桩顶入射波和桩底反射波(并非受损截面反射波)在小波量图上形成两个高亮显示的能量集中点。

因此, 可根据时频面上的亮点准确估计时间差, 再根据一维波动理论计算桩长 L , 即

$$L=\frac{1}{2}\times c\times\Delta t. \tag{7}$$

式(7)中: c 为弹性波波速; Δt 为应力波从桩顶传播到桩底, 再反射回桩顶的时间差。

1.4 损伤定位

损伤位置判别流程图, 如图 3 所示. 当桩身材质均匀且没有损伤时, 相位角映射图在时频面上表现为一组等间隔的直线; 而当桩身受损时, 映射图上会出现交叉点. 只有当与交叉点相关的能量存在时, 此处的交叉点才可判定为真正的损伤点. 由此, 再绘出交叉点处频率所对应的时间-相位角曲线, 并验证该点的正确性^[15]. 找出时间-相位角曲线中的相位变化点 n 后, 计算该点与桩头之间的时间差 Δt_n . 最后, 用 Δt_n 替换式(7)中的 Δt , 可得桩身损伤截面至桩顶的距离 L_n , 即

$$L_n=\frac{1}{2}\times c\times\Delta t_n. \tag{8}$$

2 数值算例验证

2.1 单点损伤

采用 ABAQUS 软件对混凝土桩身与周围土体进行三维有限元模拟, 其有限元模型(单点损伤)如图 4 所示. 设定桩长为 20 m, 直径为 1 m, 有 18 m 埋入土中, 预定损伤位置距离桩头 9 m. 由于混凝土桩的长细比远大于 5, 可满足一维波动理论的前提条件, 因此, 采用基于一维波动理论的低应变反射波法进行桩身的完整性分析。

设定周围土体的直径是桩径的 5 倍, 土体范围可视为足够大, 避免应力波从远处边界传回预设的传感器. 混凝土桩的弹性模量为 37.5 GPa, 泊松比为 0.167, 密度为 2 400 kg · m⁻³. 土体采用黏土, 弹性模量为 6.0 MPa, 泊松比为 0.400, 密度为 1 750 kg · m⁻³. 土体的不排水强度通过库伦模型进行模拟,

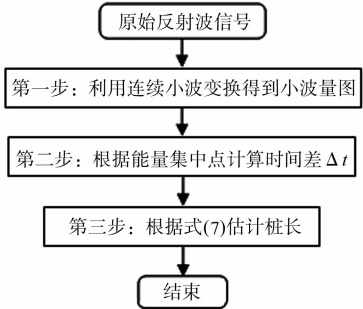


图 2 桩长判别流程图

Fig. 2 Flowchart of pile length evaluation

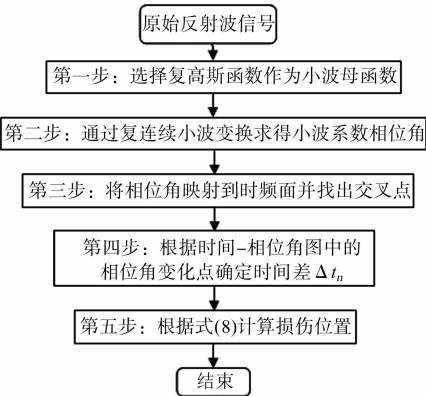


图 3 损伤位置判别流程图

Fig. 3 Flowchart of pile damage localization

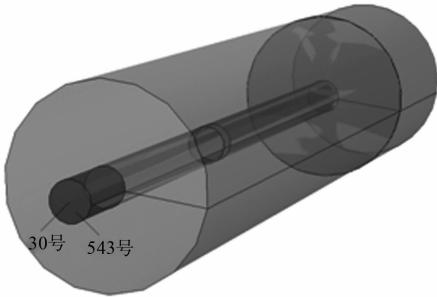


图 4 考虑桩土相互作用的桩身有限元模型(单点损伤)

Fig. 4 Finite element model of pile considering pile-soil interaction (single point damage)

其中,黏聚力为 25 kPa,内摩擦角为 20° ^[16]. 桩土之间采用面对面接触,接触行为有切向行为和法向行为,将切向行为的摩擦系数设为 0.3,法向行为设为硬接触.

在初始分析步中,首先,约束土体左右两侧的位移,将土体底部完全固结. 然后,约束桩身左右两侧的位移,并保留桩身上下方向的位移. 桩身损伤类型定义为颈缩,颈缩后的直径为 0.95 m,即桩身截面损伤程度为 10%. 定义的桩身损伤沿截面法向的长度为 0.5 m,损伤位置距离桩顶 9 m. 在静力分析步中,对桩土模型施加 1 个重力荷载;在动力分析步中,采用脉冲荷载作为外加激励,对桩顶圆心处(30 号点)施加一个冲击荷载,大小为 5 kN,持续时间 0.1 ms. 设定时间间隔为 0.2 ms,时间总长为 20 ms,通过隐式动力分析获取桩顶圆心附近处(543 号点)的反射波速度响应信号,如图 5 所示.

首先,进行桩长估计. 对速度响应信号(图 5)进行连续小波变换,得到小波能量图(图 6). 从频率(f)轴上看,小波量图在 200~800 和 400~2 000 Hz 均存在能量集中区域. 因此,将主要的频率分析区间定为 200~2 000 Hz. 从时间(t)轴上看,小波量图不仅在 0.6 ms 附近存在明显的能量集中,同时,在 11.1 ms 附近也出现能量集中. 其中,在 0.6 ms 处出现的能量集中是由入射波引起的,而桩底反射波引起的能量则集中在 11.1 ms 附近. 因此,入射波与反射波能量最大点间的时间差 $\Delta t=11.1-0.6=10.5$ ms,应力波传播速度 $c=\sqrt{E/\rho}=\sqrt{3.75\times 10^{10}/2\,400}=3\,953\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 将 Δt 和 c 代入式(7)可以估算出桩长 $L=20.75$ m. 与桩长理论值相比,估算结果的相对误差为 3.75%,在可接受的工程误差范围内.

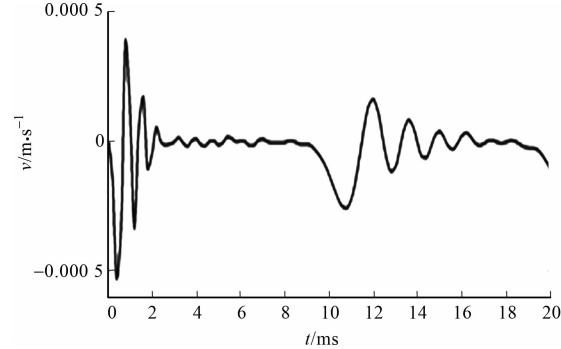


图 5 反射波速度响应图(单点损伤)

Fig. 5 Velocity response of reflected waves (single point damage)

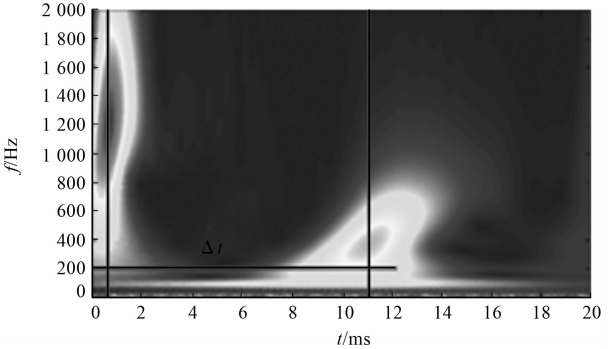


图 6 反射波信号的小波能量图(单点损伤)

Fig. 6 Wavelet energy of reflected wave signals (single point damage)

其次,进行损伤定位. 对反射波速度响应信号(图 5)进行复高斯连续小波变换,并根据式(6)计算得到相位角. 将相位角映射到时频面上,并进行灰度处理,结果如图 7 所示. 图 7 中:白色表示相位角是 $180^{\circ}(\pi)$;黑色表示相位角为 $-180^{\circ}(-\pi)$. 根据前面所确定的能量集中区域,可将频率范围限制于 200~2 000 Hz,而时间范围限制于 0.6~11.1 ms. 因此,在 A~D 等 4 点(图 7)围成的区间范围内进行交叉点的搜索,可得到交叉点(相位变化点)1~3,其对应的频率分别为 810,1 174,600 Hz. 3 个交叉点不同频率下的时间-相位角曲线,如图 8 所示.

由图 8 可知:各交叉点对应的相位角发生了变化,且相位变化点 1~3 对应的时间差 $\Delta t_1\sim\Delta t_3$ 分别为 4.25,7.18,7.62 ms. 由式(8)可计算出相位角变化点分别在 8.40,14.19 和 15.06 m 处出现,其中,相位角变化点 1 在离桩头 8.40 m 处,与损伤的预设位置十分吻合,且相对误差仅为 6.67%.

2.2 多点损伤

考虑多点损伤工况,模拟的两个损伤位置距离桩顶分别为 8,15 m. 采用 ABAQUS 软件对混凝土桩身与周围土体进行模拟,模型的属性、接触、约束、加载及桩身损伤类型的定义均与节 2.1 相同,建立的三维有限元模型(多点损伤),如图 9 所示.

通过隐式动力分析获取桩顶圆心附近处(543 号点)的反射波速度响应信号,如图 10 所示. 首先,进行桩长估计. 对反射波速度响应信号进行连续小波变换,得到其小波能量图,如图 11 所示. 从频率轴上看,小波能量图在 200~600,600~2 000 Hz 两个频率区间内均存在能量集中区域. 因此,将主要的频率分析区间定为 200~2 000 Hz. 从时间轴上看,小波量图不仅在 0.7 ms 左右存在明显的能量集中,在 11.0 ms 左右也出现了能量集中. 其中,0.7 ms 处出现的能量集中是由入射波引起的,而 11.0 ms 左右

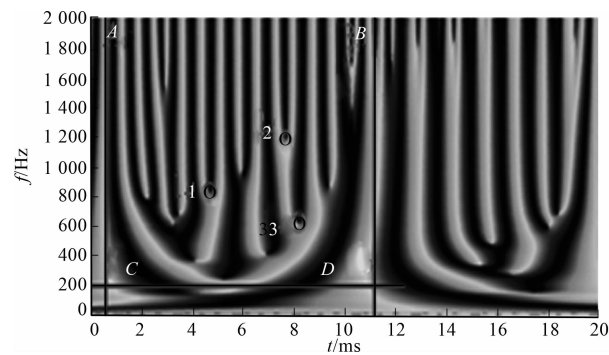
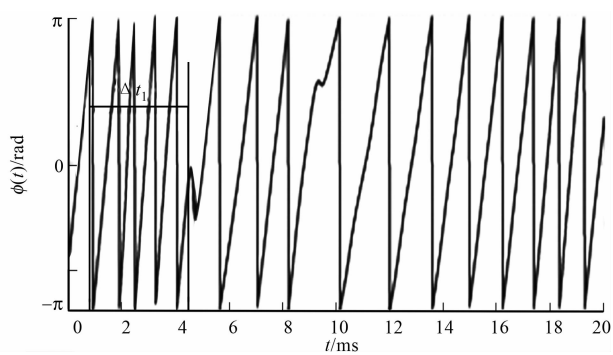
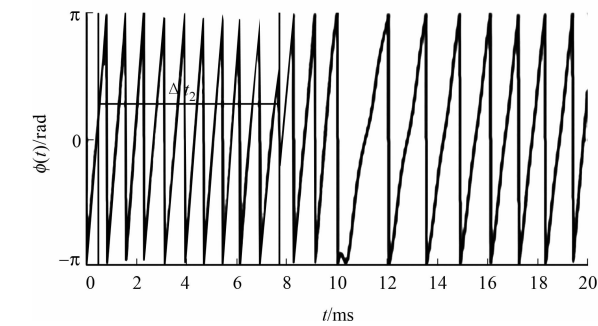


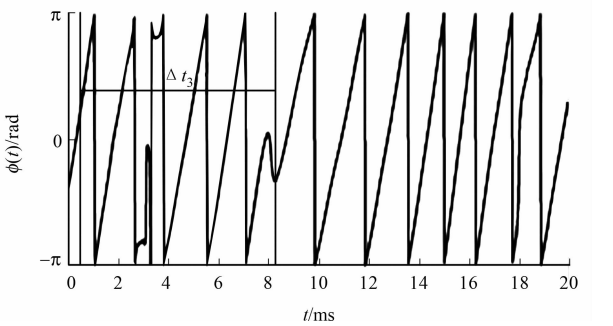
图 7 相位角映射灰度图(单点损伤)
Fig. 7 Grayscale images of phase angles
(single point damage)



(a) 810 Hz



(b) 1 174 Hz



(c) 600 Hz

图 8 不同频率下的时间-相位角曲线(单点损伤)
Fig. 8 Time-phase angle curve with different frequencies (single point damage)

出现的能量集中则是由桩底反射波引起的. 因此, 入射波能量最大点与反射波能量最大点之间的时间差 $\Delta t = 11.0 - 0.7 = 10.3$ ms, 上文已经求得应力波传播速度 c . 将两个数值代入式(7), 可估算出桩长 $L = 20.36$ m. 与桩长理论值相比, 估算结果的相对误差为 1.8%, 在可接受的工程误差范围内.

其次, 进行损伤定位. 对反射波速度响应信号进行复高斯连续小波变换, 计算得到相位角. 将相位角映射到时频面上并进行灰度处理, 结果如图 12 所示. 根据确定的能量集中区域, 可将频率范围限制于 200~2 000 Hz, 时间范围限制于 0.7~11.0 ms. 因此, 在 A~D 等 4 点(图 12)围成的区间范围内进行交叉点的搜索, 可得到 4 个交叉点. 其中, 交叉点 1, 2 对应的频率为 600 Hz, 交叉点 3, 4 对应的频率分别为 740, 360 Hz.

4 个相位变化点在不同频率下的时间-相位角曲线, 如图 13 所示. 由图 13 可知: 各交叉点在时间相位角图中对应的相位角发生了变化, 且相位变化点 1~4 所对应的时间差 $\Delta t_1 \sim \Delta t_4$ 分别为 3.72, 7.15, 5.30, 6.20 ms. 根据式(8)可计算出相位角变化点分别在 7.35, 14.13, 10.48, 12.25 m 处出现, 其中, 相位角变化点 1, 2 分别在离桩头 7.35, 14.13 m 处, 与损伤的预设位置(离桩头 8.15 m 处)十分吻合, 相对误差分别为 8.13%, 5.80%.

2.3 参数分析

上文仅考虑桩身损伤位置距桩顶 9 m 处的单点损伤, 以及桩身损伤位置距桩顶 8.15 m 处的多点损伤两种工况. 为比较不同损伤位置下该方法的识别效果, 定义 13 种桩基损伤工况(DC1~DC13), 其损伤类型均为颈缩, 颈缩截面直径均为 0.95 m, 激励类型均为脉冲荷载. 不同损伤工况下的损伤识别结果, 如表 1 所示. 表 1 中: η 为相对误差; k 为干扰点个数.

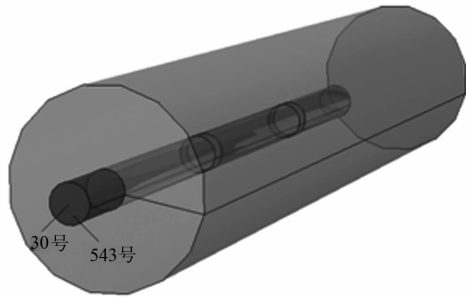


图 9 考虑桩土相互作用的桩身有限元模型(多点损伤)
Fig. 9 Finite element model of pile considering
pile-soil interaction (multi point damage)

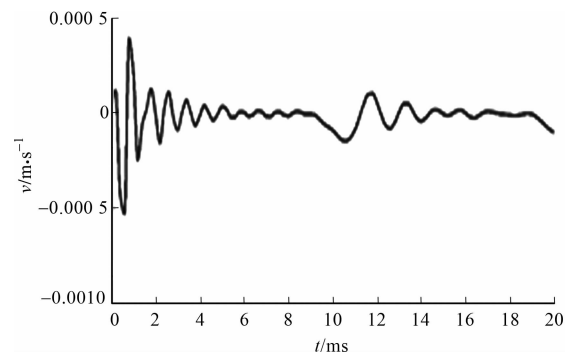


图 10 反射波速度响应图(多点损伤)
Fig. 10 Velocity response of reflected waves
(multi point damage)

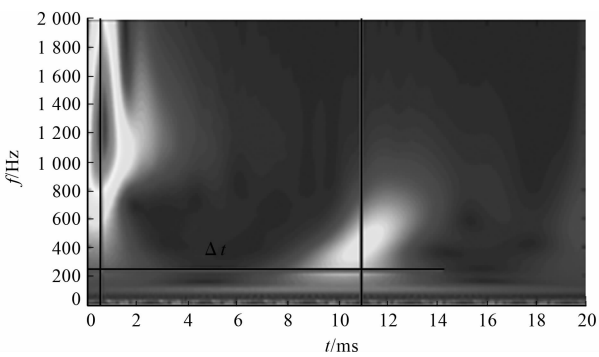


图 11 反射波信号的小波能量图(多点损伤)
Fig. 11 Wavelet energy of reflected wave signals
(multi point damage)

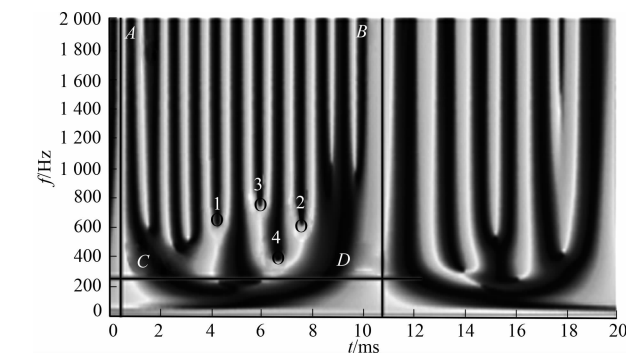
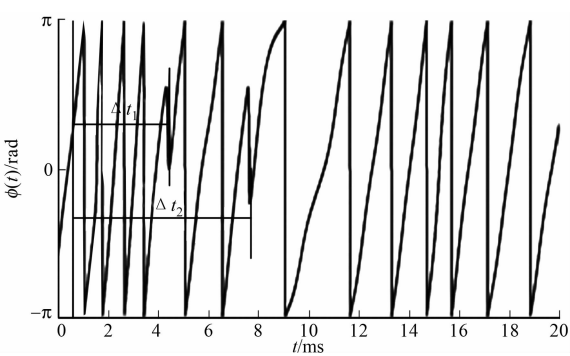
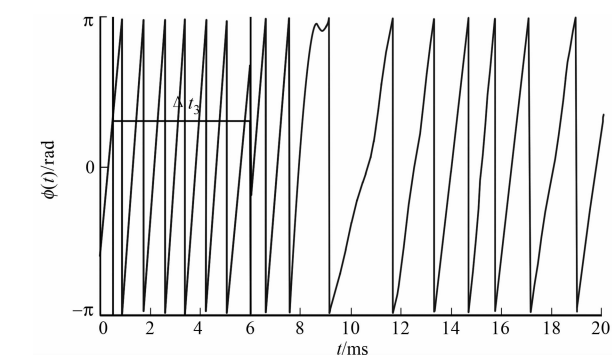


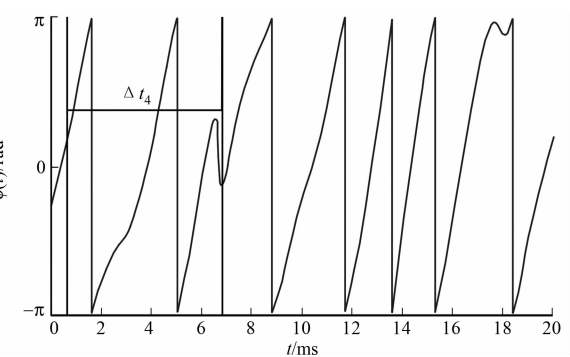
图 12 相位角映射灰度图(多点损伤)
Fig. 12 Grayscale images of phase angles
(multi point damage)



(a) 600 Hz



(b) 740 Hz



(c) 360 Hz

图 13 不同频率下的时间-相位角曲线(多点损伤)
Fig. 13 Time-phase angle curve with different frequencies (multi point damage)

表 1 不同损伤工况下的损伤识别结果

Tab. 1 Damage identification results of different damage conditions

损伤 工况	理论损伤 位置	损伤识别 位置	$\eta/\%$	k	损伤 工况	理论损伤 位置	损伤识别 位置	$\eta/\%$	k
DC1	距桩顶 3 m	距桩顶 2.57 m	14.33	4	DC8	距桩顶 12 m	距桩顶 11.07 m	7.75	2
DC2	距桩顶 4 m	距桩顶 3.44 m	14.00	4	DC9	距桩顶 15 m	距桩顶 13.83 m	7.80	3
DC3	距桩顶 5 m	距桩顶 4.35 m	13.00	3	DC10	距桩顶 16 m	距桩顶 14.63 m	8.60	3
DC4	距桩顶 6 m	距桩顶 5.53 m	7.83	3	DC11	距桩顶 17 m	距桩顶 15.42 m	9.30	3
DC5	距桩顶 7 m	距桩顶 6.51 m	7.00	2	DC12	距桩顶 18 m	距桩顶 16.31 m	9.39	3
DC6	距桩顶 8 m	距桩顶 7.45 m	6.88	2	DC13	距桩顶 8 m	距桩顶 7.35 m	8.13	2
DC7	距桩顶 9 m	距桩顶 8.40 m	6.67	2		距桩顶 15 m	距桩顶 14.13 m	5.80	2

由表 1 可知:在 DC1~DC13 损伤工况下,所提方法均能成功定位桩身的损伤位置,且识别结果的相对误差为 5.80%~14.33%,属于工程误差可接受范围.特别地,当桩身损伤程度为 10%,激励类型均为脉冲荷载时,损伤位置越靠近桩身 1/2 处(DC6~DC8)时,相对误差越小;损伤位置越靠近桩顶或桩底(DC1~DC3 或 DC12)时,相对误差越大.此外,相位角映射灰度图中还存在其他交叉点.由于它们与理论损伤结果相差较大,暂时判定为干扰点.由表 1 还可知:在损伤程度和激励类型固定的情况下,损伤位置越靠近桩身 1/2 处时,干扰点相对较少;当损伤位置越靠近桩顶或桩底时,干扰点相对较多.

3 实例验证

3.1 测试数据

通过福建省南平市的某实际桥梁桩基的测试数据,验证基于复连续小波变换的桩身损伤识别方法的有效性.待分析桩为圆形钢筋混凝土钻孔桩,直径为 2 m,长度为 19.8 m;桩的长细比为 9.4,满足一维波动理论的应用前提.在此之前,通过超声波透射法^[17]测得损伤位置距桩顶 8 m 处,并以此作为理论结果.低应变试验采用冲击锤对桩顶施加瞬时冲击力,然后,通过安装在桩顶的加速度传感器(灵敏度为 198 mV·g⁻¹)和桩身完整性检测(PIT)动测仪(美国 PDI 公司)采集加速度响应数据.现场测试装置,如图 14 所示.在测试中,采样间隔设为 22.2 μs,即采样频率为 45 kHz,采集的加速度数据经积分处理后的反射波速度响应图(实际桩),如图 15 所示.



图 14 现场测试装置

Fig. 14 Setup of pile test

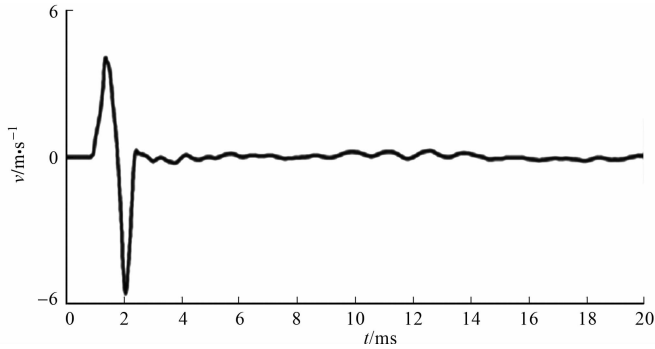


图 15 反射波速度响应图(实际桩)

Fig. 15 Velocity response of reflected waves (actual pile)

3.2 实际桩长评估

对速度信号(图 15)进行复高斯连续小波变换,得到其小波能量图,如图 16 所示.由图 16 可知:时频平面上有两个能量集中点.从频率轴上看,小波能量图在 20~1 600 Hz 频率区间内的能量密度远大于其他频段,因此,将主要的频率分析区间定于 200~1 600 Hz.从时间轴上看,小波能量图不仅在 2 ms 左右存在明显的能量集中,同时也在 12 ms 左右出现能量集中.其中,2 ms 时出现的能量集中是由入射波引起的,12 ms 时出现的能量集中则是由桩底反射波引起的.

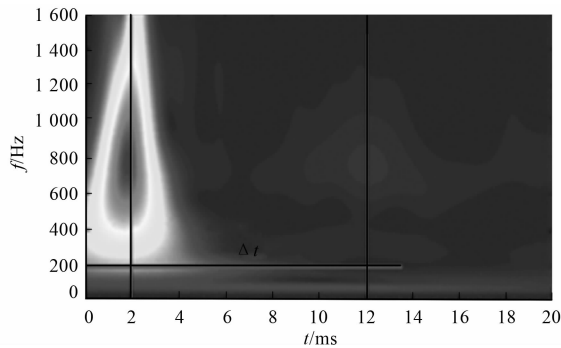


图 16 反射波信号的小波能量图(实际桩)

Fig. 16 Wavelet energy of reflected wave signals (actual pile)

由图 16 可知:入射波能量最大点与反射波能量最大点之间的时间差 $\Delta t = 12 - 2 = 10$ ms,而根据混凝土强度和弹性模量求解的波速 c 为 3 900 m·s⁻¹.将 Δt 和 c 代入式(7),可估算桩长 $L = 19.5$ m.与桩长理论值相比,误差仅为 1.52%.

3.3 实际损伤定位

对反射波速度信号(图 15)进行复高斯连续小波变换,并由式(6)计算得到相位角.将相位角映射到时频面上进行灰度处理,如图 17 所示.图 17 中:白色表示相位角为 180°(π),黑色表示相位角为 -180°(-π).根据节 3.2 中确定的频率范围(200~1 600 Hz)和时间范围(2~12 ms),在 A~D 等 4 点(图 17)

围成的区间内进行交叉点搜索,得到 3 个交叉点,其对应的频率分别为 440,968,418 Hz. 分别绘出 3 个交叉点在不同频率下的时间-相位角曲线,如图 18 所示.

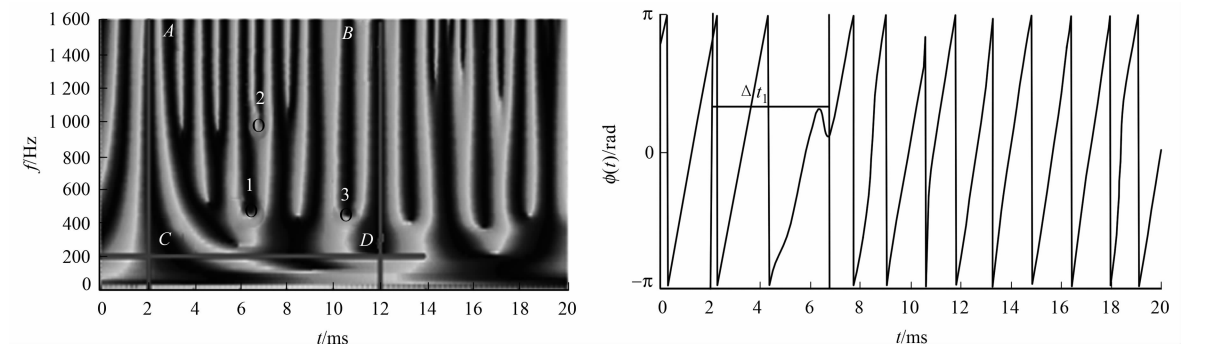


图 17 相位角映射灰度图(实际桩)

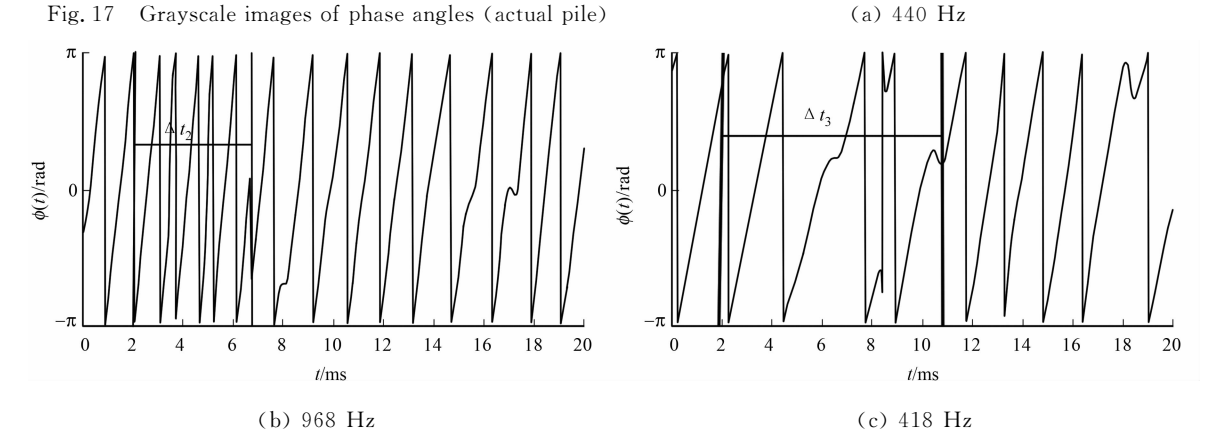


图 18 不同频率下的时间-相位角曲线(实际桩)

由图 18 可知:各交叉点在时间-相位角曲线中对应的相位角确实发生了变化,且相位角变化点 1~3 对应的时间差 $\Delta t_1 \sim \Delta t_3$ 分别为 4.5,4.8,8.8 ms. 根据式(8)计算出相位角变化点分别在 8.78,9.36,17.16 m 处出现. 相位角变化点 1 在离桩头 8.78 m 处,与超声波透射法识别结果(离桩头 8 m 处)较为吻合,其相对误差为 9.75%;相位角变化点 2,3 则可判定为干扰点,干扰点的排除需结合其他桩身损伤检测方法 & 工程经验综合确定.

4 结 论

引入复连续小波变换对桩身进行损伤定位,并通过 1 个数值算例和 1 个实桥桩基实例验证所提方法的有效性和准确性. 与传统损伤检测方法相比,复连续小波变换凸显响应信号的相位信息,可成功识别桩身微小损伤的位置.

需要注意的是,该方法在识别过程中出现较多干扰点. 这些干扰点是由于复杂地质条件下的桩土相互作用,以及周边环境、外部激励等因素影响而产生的,这为精确定位桩身损伤带来一定的困难. 干扰点的判定和排除需要结合其他桩身损伤检测方法(如超声波透射法等)及其他工程信息(如桩的设置过程、地质情况等)进行综合考虑.

参考文献:

[1] WANG Jingtao. Wavelet analyses for stress wave detection of piles[J]. Science in China,2003,46(2):113-119. DOI: 10.1360/03ye9011.

[2] NI S H,YANG Y Z,LYU C. Application of wavelet transform for the impulse response of pile[J]. Smart Structures and Systems,2017,19(5):513-521. DOI:10.12989/sss.2017.19.5.513.

[3] DING Xuanming,LIU Hong,LIU Jinyuan,*et al.* Wave propagation in a pipe pile for low-strain integrity testing[J].

- Journal of Engineering Mechanics,2011,137(9):598-609. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000263.
- [4] MASSOUDI N,TEFERRA W. Non-destructive testing of piles using the low strain integrity method[C]//Proceedings of 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Rolla: University of Missouri, 2014:13-17.
- [5] NI S H,YANG Y Z,TSAP H,et al. Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis[J]. NDT and E International,2017,87:50-59. DOI:10.1016/j.ndteint.2017.01.007.
- [6] OLSON L D,WRIGHT C C. Nondestructive testing of deep foundations with sonic methods[C]//Proceedings of Foundation Engineering Congress. Reston:[s. n.],1989:1173-1183.
- [7] MESSINA A. Refinements of damage detection methods based on wavelet analysis of dynamical shapes[J]. International Journal of Solids and Structures,2008,45(14/15):4068-4097. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2008.02.015.
- [8] CAO Maosen,XU Wei,OSTACHOWICZ W,et al. Damage identification for beams in noisy conditions based on Teager energy operator-wavelet transform modal curvature[J]. Journal of Sound and Vibration,2014,333(6):1543-1553. DOI:10.1016/j.jsv.2013.11.003.
- [9] 刘景良,郑锦仰,林上顺,等. 基于相位角变化的桩基缺陷位置识别方法[J]. 振动、测试与诊断,2019,39(3):638-644. DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2019.03.027.
- [10] PARK H C,KIM D S. Non-destructive pile integrity test using HWAW method[J]. Key Engineering Materials, 2006,321/322/323:363-366. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.321-323.363.
- [11] PARK H C,KIM D S. Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform [J]. NDT and E International,2001,34(7):457-467. DOI:10.1016/S0963-8695(00)00076-1.
- [12] NI S H,LO K,LEHMANN L,et al. Timefrequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform[J]. Computers and Geotechnics,2008,35(4):600-607.
- [13] NI S H,ISENHOWER W M,HUANG Yanghong. Continuous wavelet transform technique for low strain integrity testing of deep drilled shafts[J]. Journal of Geoengineering,2012,7(3):97-105. DOI:10.6310/jog.2012.7(3).3.
- [14] XU Juncai,REN Qingwen,SHEN Zhenzhong. Low strain pile testing based on synchrosqueezing wavelet transformation analysis[J]. Journal of Vibroengineering,2016,18(2):813-825.
- [15] BOULAHBAL D,GOLNARAGHI M F,ISMAIL F. Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,1999,13(3):423-436. DOI:10.1006/mssp.1998.1206.
- [16] 杨同,徐川,王宝学,等. 岩土三轴试验中的粘聚力与内摩擦角[J]. 中国矿业,2007,16(12):104-107. DOI:10.3969/j.issn.1004-4051.2007.12.032.
- [17] 李廷,徐振华,罗俊. 基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J]. 岩土力学,2010,31(10):3165-3172. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2010.10.022.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)