

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1073-07

基于反射波特征小波分析的工程基础无损检测

曹茂森^{1,2}, 任青文¹, 刘福胜², 张健³

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 3. 枣庄市台儿庄水利局, 山东 枣庄, 277400)

摘要: 针对现有工程基础无损检测中反射波分析的不足, 对 Morlet 和 Marr 小波及其小波变换进行了深入分析, 指出它们在反射波分析上具有优势互补性。结合两个小波的优势, 提出了 Morlet 小波域能量密度谱辨识动力学特征和 Marr 小波域模谱提取奇异特征的反射波分析方法, 并构建了基于小波域香农熵的 Morlet 最优基小波确定技术。由反射波的动力学特征可以识别损伤模式, 由反射波的奇异特征可以实施损伤定位, 两者相结合构成了一条有机的基于反射波特征小波分析的工程基础精细无损检测技术路线。模型实验分析中概括归纳了工程基础的基本损伤模式, 并验证了技术路线的可行、有效性。

关键词: 反射波; 小波分析; 小波域香农熵; 工程基础; 无损检测

中图分类号: TU 459

文献标识码: A

Nondestructive detection for engineering foundations using wavelet-based reflection wave analysis

CAO Mao-sen^{1,2}, REN Qing-wen¹, LIU Fu-sheng², Zhang Jian³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

3. Tai'er Zhuang Bureau of Water Conservancy, Zaozhuang 277400, China)

Abstract: Aiming at improving the analysis precision of reflection waves in nondestructive detection for civil engineering foundations, the characters of Morlet and Marr wavelets and the properties of their transforms are thoroughly investigated and the complementary advantages of these two wavelets in reflection wave analysis are discussed in detail. By combining the advantages of these two wavelets, a novel method for reflection wave analysis is proposed, which utilizes power density spectrum of Morlet wavelet to extract the dynamic characteristics of reflection waves and employs modulus spectrum of Marr wavelet to capture the singular features of reflection waves, in addition involves the key technique of using Shannon entropy of wavelet transform to determine the optimal mother wavelet of Morlet wavelet. Damage patterns may be identified in terms of the dynamic characteristics of reflection waves and damage positions may be located in terms of the singular features of reflection waves. Thus a promising technology is constituted for nondestructive detection of civil engineering foundations. The basic damage patterns of civil engineering foundations are demonstrated in the physical model experiment, and the feasibility and effectiveness of the technology are validated by both numerical and physical experiments.

key words: reflection wave; wavelet analysis; Shannon entropy of wavelet transform; engineering foundation; nondestructive detection

1 引言

在工程基础无损检测中, “由定性向定量, 由粗略向精细” 的转变已成为新时期的迫切要求。依据反射波特征分析进行工程基础的损伤识别与定位属于介质反问题^[1]。一般是在单一时域或频域对反射波异常特征进行辨识而实现的, 但该做法不能将时

域或频域信息有机地结合起来, 面对强非平稳性的反射波表现出明显的缺陷。进而提出了基于 Hilbert 变换的复信号分析、短时傅立叶变换、二次时频表示等多参数方法。这些方法虽然具有一些优点, 但也分别存在诸如只适应窄频带且对噪声敏感、强烈依赖分析窗且分析窗平移不变、干扰项使有效信息模糊化等不足^[2]。近期出现的小波理论为高精度的

收稿日期: 2004-02-05

修改稿收到日期: 2004-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50379005); 水利部科技创新基金资助项目 (No. SCX2000-56)

作者简介: 曹茂森, 男, 1971 年生, 副教授, 博士, 主要从事土木工程健康诊断与损伤机理研究。E-mail: cmszhy@sohu.com

反射波特征分析提供了契机。自 1984 年 A. Grossmann 和 J. Morlet 提出小波理论后, I. Daubechies, S. Mallat 和 Meyer 等人的研究成果使小波理论得到了进一步发展^[3~5]。在土木工程领域, 小波理论已应用于包括工程基础无损检测在内的多个方面^[6~9]。小波理论在工程基础无损检测中的基本应用, 一般是在信号分析范畴内, 基于离散小波变换对反射波分频而提取奇异特征^[7]。突出表现为材料相对均一、且具有一个或几个孤立缺陷的桩基完整性检测^[10]。但对于大体积的地下工程基础, 材料均匀性差, 且缺陷表现为介质层状分布或不连续的组合物, 这时只依靠反射波分频提取奇异特征来实施损伤检测是不可行的。针对上述问题, 本文对 Morlet 和 Marr 小波及其变换特性进行深入分析, 超越信号分析范畴, 提出二者优势结合的反射波特征小波分析工程基础无损检测新思路, 并在数值和物理模型实验分析中验证了其可行、有效性。

2 Morlet 与 Marr 小波特性分析

在小波的工程应用中, 如何提高小波与工程应用目的的匹配性是小波成功应用的关键^[6]。这里根据工程基础精细无损检测的应用目的, 对 Morlet 与 Marr 小波及其小波变换的特性进行深入分析。

2.1 解析小波: Morlet

Morlet 小波的基小波定义为

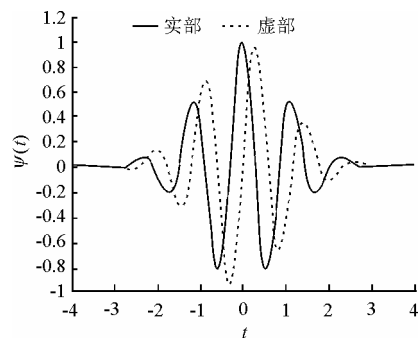
$$\varphi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (\omega \geq 5) \quad (1)$$

其子小波频域形式为

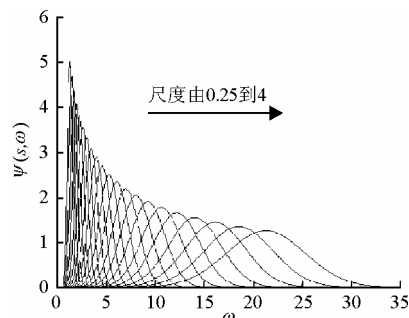
$$\psi(s\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(s\omega - \omega_0)^2}{2}} \quad (2)$$

式中 ω_0 为中心频率。该小波的基本形状见图 1。

在有关 Morlet 小波应用的文献中, 一般会根据应用目的, 对其特性进行不同程度的介绍, 但缺乏关于该小波特性的系统论述。这里根据实验分析并参考大量文献, 针对工程基础无损检测要求, 将 Morlet 小波特性概括归纳为: (1) 由 Gaussian 函数频率调制而成, Gaussian 函数的傅立叶变换(FT)仍然是 Gaussian 函数, 使用 FT 的调制性质, 很多分析和计算可在频域进行; (2) 具有最优时频分析能力, 时频分析精度达到 Heisenberg 测不准定理条件下的最优值; (3) 具有较强的频域正则性(见图 1(b)), 其频域分析能力优于时域分析能力; (4) 具有复分析能力, 可以对应力波进行动力学特性分析; (5) 严格来说, 不满足小波允许条件, 即其 FT 存在直流(DC)成分, 但当 $\omega_0 = 5.4285$, $DC = 10^{-6}$, 也就是说当 $\omega_0 \geq 5$ 时, DC 几乎为零, 近似认为该小波



(a) 基小波时域波形



(b) 子小波频域形状

图 1 Morlet 小波($\omega_0 = 5.4285$)
Fig.1 Morlet wavelet ($\omega_0 = 5.4285$)

满足小波允许条件; (6) 其实部构成实小波, 由小波变换的线性性, Morlet 小波变换中可分离出实小波变换成分; (7) 该小波家族是由 Morlet 的微分函数构成的小波函数族, 由 Morlet 一阶以上微分构成的小波精确满足小波允许条件。

2.2 实小波: Marr

Marr 小波的基小波定义为

$$\varphi(t) = (1 - t^2) e^{-t^2/2} \quad (3)$$

其子小波频域形式

$$\psi(s\omega) = \sqrt{2\pi} (s\omega)^2 e^{-\frac{(s\omega)^2}{2}} \quad (4)$$

该小波的基本形状见图 2。

根据实验分析并参考大量文献, 针对工程基础无损检测要求, 将 Marr 小波特性概括归纳为: (1) 由 Gaussian 函数的二阶导数构成, 精确满足小波允许条件; (2) 时域正则性强, 时域分析能力优于频域分析能力; (3) 是连续可导低通平滑函数的导数, 在应力波奇异性检测方面具有专长; (4) 具有二阶消失矩和对称性, 适合于检测应力波的脉冲状突变。

2.3 小波变换: FFT-CWT

2.3.1 算法描述

基于快速傅立叶变换(FFT)产生的连续小波变换(CWT)记为 FFT-CWT, 其实质上是在频域内实施信号与小波的卷积运算, 基本公式如下:

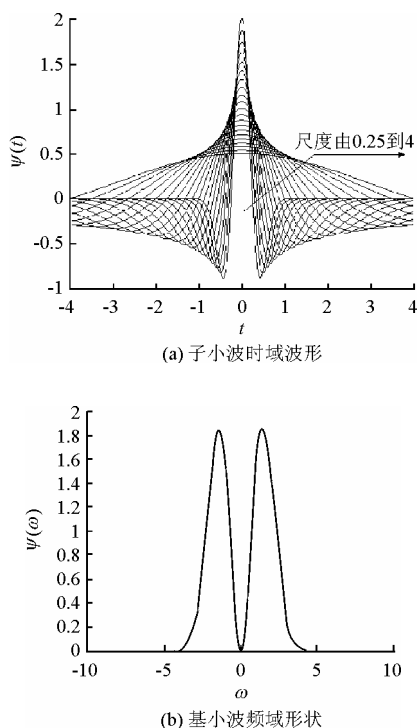


图2 Marr 小波
Fig.2 Marr wavelet

$$W(a,b) = |a|^{1/2} \frac{1}{2\pi} \int X(\omega) \varphi^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega \quad (5)$$

式中 $X(\omega)$, $\varphi(a\omega)$ 分别为信号和子小波的FFT变换; * 表示复共轭。

FFT-CWT的计算量仅是时域CWT的 $1/M$ (M 为信号采样点数), 且容易实现尺度密植。在计算CWT的常规程序中, 尺度参数均按二进离散, 即 $a = 2^j$, $j = 1, 2, \dots, N$, 而FFT-CWT中, 可在 $[j, j+1]_{j=1,2,\dots,N}$ 之间均匀内插 K 个点, 即

$$[j, j + \frac{1}{K+1}, j + \frac{2}{K+1}, \dots, j + \frac{K}{K+1}, j+1]_{j=1,2,\dots,N}$$

区间 $[2^j, 2^{j+1}]$ 内尺度得到密植, 分析精度提高。这一功能适应了工程基础精细无损检测的工程要求。FFT-CWT算法示意于图3。

2.3.2 小波域谱

采用Morlet小波作为基小波对反射波进行分析, 式(5)产生的 $|W(a,b)|^2$ 称为反射波的Morlet小波域能量密度谱: Scalogram。由Scalogram可以提取反射波的瞬态频率、瞬态振幅和瞬态相位等动力学特征。

采用Marr小波作为基小波对反射波进行分析, 式(5)产生的 $|W(a,b)|$ 称为反射波的Marr小波域模谱。由 $|W(a,b)|$ 可以提取反射波的奇异特征。 $|W(a,b)|$ 中相关的WTMM (Wavelet transform

modulus maximum) 跨尺度连接构成WTMML (Wavelet transform modulus maximum line), 文献[5]证明, 沿WTMML从大尺度向细尺度追踪可以实现突变点时域定位。所有WTMML构成基干图Skeleton, Skeleton反映了 $|W(a,b)|$ 的奇异分布, 承载了 $|W(a,b)|$ 的主要信息。

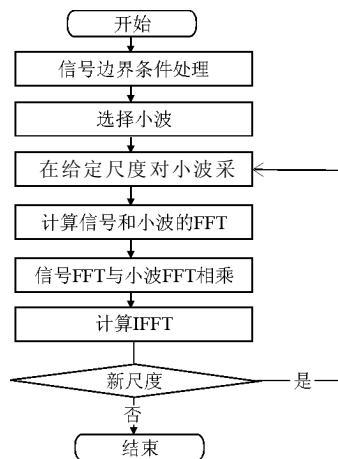


图3 FFT-CWT 算法示意图
Fig.3 Schematic diagram of FFT-CWT

2.4 Morlet 和 Marr 小波的优势互补

Morlet 小波和 Marr 小波都起源于 Gaussian 函数, 对 Gaussian 函数的一些优良特性进行了继承和延伸。但深入分析发现, 在 Heisenberg 定理支配下, 二者具有不同的优缺点: Morlet 小波具有良好的时频分析能力, 尤其是其频域正则性强, 频域分析能力优于 Marr 小波, 并且复分析能力使其能够提取瞬态频率、瞬态振幅和瞬态相位等动力学特征, 但其时域正则性相对差一些, 时域分析能力不够突出。Marr 小波具有良好的时域正则性, 且是低通平滑函数的导数, 时域分析能力突出, 优于 Morlet 小波, 但频域分析能力弱一些, 也无复分析功能。可见, Morlet 小波与 Marr 小波是优势互补的, 单独将 Morlet 或 Marr 小波用于反射波分析均存在一定局限性, 但将 Morlet 小波良好的时频分析能力与 Marr 良好的时域分析能力结合起来, 可以实现反射波的精细分析, 适应了工程基础的精细无损检测要求。

3 反射波特征分析及关键技术

3.1 基于 Scalogram 和 $|W(a,b)|$ 的反射波分析

3.1.1 Scalogram 分析动力学特征

Morlet 小波域 Scalogram 是反射波特征识别的重要依据。Scalogram 是工程基础介质的动力学信息库: Morlet 小波捕获了反射波丰富的动力学信息, 反映在 Scalogram 图上, 为工程基础介质识别提供

了依据:瞬态振幅内容反映出给定时刻反射信号能量的大小,其变化表现了信号随传播距离的衰减程度,研究信号衰减的影响因素,可利用瞬态振幅推得地下介质的性质;瞬态频率内容变化是介质差异的反映,在介质突变处,频率发生显著变化,在反射层处瞬态频率的大小在数值上与反射波的主频对应得很好,可以利用瞬态频率的大小和稳定情况,来判断地下介质的稳定和岩性变化。

3.1.2 $|W(a,b)|$ 分析奇异特征

Marr 小波域 $|W(a,b)|$ 是对工程基础介质缺陷进行空间定位的有利工具,它反映了反射波能量随时间的细致变化,凸现了突变事件的时域特征,其局部极大值点对应于反射波的突变点。对 $|W(a,b)|$ 作进一步深入分析,提取 WTMML 组成的基干图 Skeleton, Skeleton 勾勒了 $|W(a,b)|$ 能量局部极大的精确平面分布。从 Skeleton 中选取有效 WTMML,从大尺度向细尺度追踪能够进行突变点的精确时域定位。

由以上分析可见,利用 Morlet 小波域 Scalogram 对反射波进行动力学特征分析,进而由 Marr 小波域 $|W(a,b)|$ 对反射波进行奇异特征分析,两者相结合构成了一条有机的基于反射波特征分析的工程基础无损检测技术路线。

3.2 程序实施中的关键技术

3.2.1 Morlet 最优基小波

在小波工程应用中,除了小波类型外,基小波的合理选取也是十分重要的。对于 Morlet 小波,由 ω_0 的不同取值可以产生一个基小波空间,只有选取最优基小波才能使 Morlet 小波达到最优时频分析能力。文献[11]由小波域香农熵确定最优时域分辨率基小波,这里扩展为构建最优时频分辨率基小波。

香农熵 (Shannon Entropy, 简称 SE) 是一个良好的信息量测度指标,有效地用于度量信息能量的集中和散布程度。对于一维离散信号集合 $E_1 = \{e_i\}_{1 \leq i \leq N}$, SE 按下式计算:

$$SE(E_1) = -\sum_i P_i \lg P_i \quad (6)$$

式中 $P_i = |e_i|^l / \|E_1\|^l; l \geq 1, \|E_1\|^2 = \sum_i |e_i|^2; \sum_i P_i = 1$ 。

式(6)计算结果为 $0 \leq SE(E_1) \leq \lg N$, 标度了信号能量由集中向散布过渡。将 FFT-CWT 产生的 $|W(a,b)|$ 的标准归一化形式 $N_w(a,b)(E(N_w) = 0, \sigma(N_w) = 1)$ 视为二维信号集合 $E_2 = \{N_w(a_i, b_j)\}_{1 \leq i \leq m, 2 \leq j \leq n}$, 记 $A_{i,j} = N_w(a_i, b_j)$ 。

建立时频信息测度 SE:

$$SE(E_2) = -\sum_i \sum_j \left(\frac{|A_{i,j}|^l}{\sum_{j=1}^n |A_{i,j}|^l} \right) \lg \left(\frac{|A_{i,j}|^l}{\sum_{j=1}^n |A_{i,j}|^l} \right) - \sum_i \sum_j \left(\frac{|A_{i,j}|^l}{\sum_{j=1}^n |A_{i,j}|^l} \right) \lg \left(\frac{|A_{i,j}|^l}{\sum_{j=1}^n |A_{i,j}|^l} \right) \quad (7)$$

$SE(E_2)$ 度量了能量在时频平面上的集中程度。取 $l=2$, 调节中心频率参数 ω_0 , 有 $E_2 = f(\omega_0)$, 从而 $SE(E_2) = F(\omega_0)$ 。当 SE 达到最小值时, E_2 在时频相平面上的能量集中程度最高, 这时 Scalogram 达到最优时频分辨率, 由此确定最优 ω_0 值, 得到最优 Morlet 基小波。

3.2.2 分析尺度

选取 CWT 的有效分析尺度区间是必要的。基小波、尺度、采样率和分析频率存在如下关系^[12]:

$$f_x = \frac{f_0 f_s}{a f_\omega} \quad (8)$$

式中 f_x 为分析频率; a 为尺度参数; f_s 为信号采样率; f_ω 为小波采样率; f_0 为基小波中心频率。通过频谱分析, 确定分析频率的上下界, 在选定 f_s , f_ω , f_0 这 3 个参数后, 由式(8)可以确定 a 的取值区间。

另外, 信号边界条件预处理也是 FFT-CWT 的一个必要环节(许多软件包由于标准化内置函数的使用, 使合理的边界处理得不到保证), 本文采用两端对称拓延、零衬垫两种可选方法来对信号边界条件进行预处理。

4 实验分析

4.1 数值模型实验

人工合成一道含有 A, B, C, D 共 4 个子模式的工程基础检测复合反射波记录。子模型 A 是由 Ricker 子波和单个反射系数褶积生成的反射子波, 代表两种不同岩性的交界面; 子模型 B 为线性升频的高频波, 代表层厚逐渐变薄的多个互层岩性; 子模型 C, D 采用式(9)瞬态信号模型模拟:

$$s(t) = A \exp(-a(t-\tau)) \sin(\omega(t-\tau) + \phi) u(t-\tau) \quad (9)$$

式中 A, a, τ, ω, ϕ 分别为振幅、衰减系数、发生时刻、频率和初相位; $u(t)$ 为单位阶跃函数。子模式 C, D 由两组参数 $\{A_i, a_i, \tau_i, \omega_i, \phi_i\}_{i \in \{c,d\}}$ 所决定, 其中 A_c 略小于 A_d , ω_c 略大于 ω_d , 分别代表层厚为常数 L_c, L_d , 且 L_c 略小于 L_d 的多个互层岩性, 且 D 中多个互层的密度变化程度大于 C。

A, B, C, D 子模式的发生时刻分别位于采样点 40, 75, 150, 310, 4 个子模式表示的岩性介质的非均匀性, 可认为是介质损伤状态。在反射波记录上叠加正态分布的白噪声, 加噪后信号的信噪比为 6:1, 最后合成的应力波记录波形见图 4(a)。从图中只能大略分辨出 4 个子模式, 但难以对诸如 B 的线性升频、 A_c 略小于 A_d , ω_c 略大于 ω_d 等细节内容进行反映, 因此, 据其难以辨识岩性细致特征。

4.1.1 由 Morlet 小波域 Scalogram 识别损伤模式

由小波域香农熵确定的最优基小波为 Morlet ($\omega_0 = 6.18$)。对合成反射波进行 FFT-CWT 分析, 产生的 Scalogram 见图 4(b)。图中每个子模式占据 Scalogram 的某一子空间, 并表现出不同的特征, 得到了明晰分离。从瞬态频率分析, A 为竖线段形状, 表示瞬时升频, 说明岩性的突变; B 为随时间演化而向细尺度倾斜的线段形状, 表示线性升频, 说明岩性为层厚逐渐减小的多个互层; C, D 均为水平线段形状, 且 C 相应尺度略低于 D, 表示 ω_c, ω_d 为单一频率, 且 $\omega_c > \omega_d$, 说明岩性由层厚相等的多个互层构成, 且 C 的层厚小于 D。从瞬态振幅分析, C, D 的等值线变化梯度由急变缓, 反映

了振幅的衰减速度。对比可见, D 比 C 具有更高的等值线量值, 表示 $A_d > A_c$, 说明 D 中多个互层密度的相对变化更大。因此, 二维 Scalogram 比一维时域波形更深入、细致地反映了合成反射波的动力学特征。

4.1.2 由 Marr 小波域模谱对损伤定位

采用 Marr 小波作为基小波对合成应力波进行 FFT-CWT 分析, 得到的 $|W(a, b)|$ 见图 4(c)。图中每个子模式的时间演化细节被揭露出来。在细尺度部分, 跨尺度贯通的竖“1”字构造清晰地标明了突变事件的时域特征。子模式中首个竖“1”字构造标志了子模式的发生, 在时间轴上能够指示突变事件的发生时刻, 亦即实现介质损伤初步定位。由模谱求取的基干图见图 4(d), 根据反射子波 WTMML 的跨尺度延伸性, 并参照动力学特征分析和突变事件初步定位, 4 个子模式发生事件对应于 A, B, C, D 4 条 WTMML。沿每条 WTMML 由大尺度向细尺度追踪, 在最细尺度上拾取的时间坐标为: 43, 72, 153, 314, 与实际值 45, 71, 155, 312 差别很小。可见由 Marr 小波域模谱及基干图可以进行损伤的精细定位。

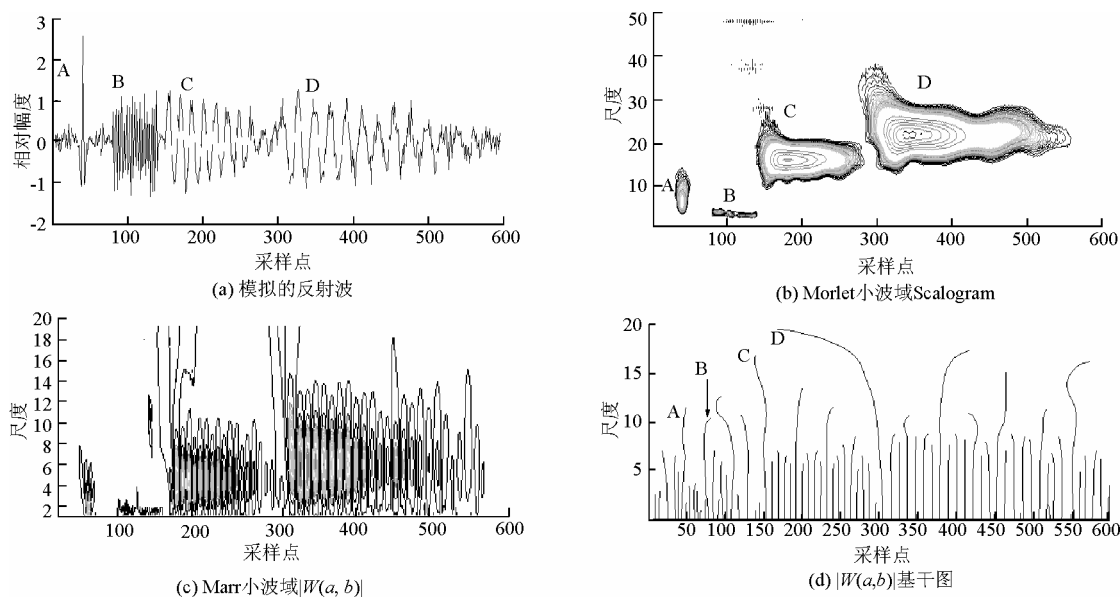


图4 模拟反射波的 Morlet、Marr 小波分析

Fig.4 Analysis of simulated reflection wave by Morlet wavelet and Marr wavelet

4.2 物理模型实验

自 1998 年长江流域特大洪水后, 地下连续墙被大量兴建, 用于地基、堤坝的防渗和加固。据不完全统计, 目前已建工程规模近万公里, 但由于施工质量难以控制, 空洞、疏松、离析、夹泥等现象常有发生, 其无损检测成为一个亟需解决的问题, 并成为土木工程界的一个研究热点和难点。

本文开展基于反射波特征小波分析的地下连续

墙无损检测物理模型实验研究。由变层厚、变密度的多个互层构成两个墙体模型见图 5(a)、图 6(a), 记为模型 A, B。采用高分辨率探测, 从墙顶实测的反射波见图 5(b)、图 6(b), 反射波具有较强的非平稳性且含有较多噪声, 从单一时域或频域难以对墙体岩性进行细致解释。下面基于反射波特征小波分析对地下连续墙模型进行无损检测。

对于模型 A: (1) 由 Morlet 小波 Scalogram 识

别损伤模式。由小波域香农熵确定的最优基小波为 Morlet ($\omega_0=5.12$), 对图 5(b) 反射波进行 FFT-CWT 分析, 产生的 Scalogram 见图 5(c)。图中清晰可辨 3 个损伤模式 A, B, C, 其中 A 表现为瞬时升频, 说明岩性突变; B 表现为近似线性降频, 说明岩性为层厚逐渐增大的多个互层; C 表现为近似线性升频, 说明岩性为层厚逐渐减小的多个互层。A 的能量等值线量值大于 B, C, 说明 A 的岩性变化程度更大。(2) 由 Marr 小波 $|W(a,b)|$ 实施损伤定位。采用 Marr 小波对反射波进行 FFT-CWT 分析, 产生的 $|W(a,b)|$ 见图 5(d)。图中清晰可辨由密到疏、再由疏到密有序排列的竖“1”字构造, 标明了互层岩性的空间分布, 由 $|W(a,b)|$ 提取基干图, 沿每条 WTMM 从大尺度向细尺度追踪, 可以实现岩性突变的细致定位。上述分析结果与模型 A 是吻合的。

对于模型 B: (1) 由 Morlet 小波 Scalogram 识别损伤模式。由小波域香农熵确定的最优基小波为 Morlet ($\omega_0=5.07$), 对图 6(b) 反射波进行 FFT-CWT 分析, 产生的 Scalogram 见图 6(c)。图中清晰可辨 4 个损伤模式 A, B, C, D, 其中 A 表现为瞬时升频, 说明岩性突变; B 表现为渐近升频, 说明岩性为层厚逐渐减小的多个互层; C 表现为渐近降频, 说明

岩性为层厚逐渐增大的多个互层; D 表现为恒频, 说明岩性为多个等价互层。A 的能量等值线量值大于 B, C, D, 说明 A 的岩性变化程度更大。(2) 由 Marr 小波 $|W(a,b)|$ 实施损伤定位。采用 Marr 小波对反射波进行 FFT-CWT 分析, 产生的 $|W(a,b)|$ 见图 6(d)。图中清晰可辨由疏到密, 再由密到疏, 进而疏密均匀的有序排列的竖“1”字构造, 标明了互层岩性的空间分布, 由 $|W(a,b)|$ 提取基干图, 沿每条 WTMM 从大尺度向细尺度追踪, 可以实现岩性突变的细致定位。上述分析结果与模型 B 是吻合的。

从模型 A、B 的反射波特征小波分析无损检测中, 可以归纳提取出不同时频特征表示的基本损伤模式: (1) 瞬时升频表示岩性突变; (2) 渐近升频表示层厚减小的多个互层; (3) 渐近降频表示层厚增加的多个互层; (4) 恒频表示多个等价互层。另外, 时频分布杂乱无序表示岩性随机分布。这些基本损伤模型为采用反射波特征小波分析对实际工程基础进行无损检测提供了依据。

因此, 基于 Morlet 与 Marr 小波优势结合进行反射波特征分析, 动力学特征和奇异特征的综合运用使其具有优于传统方法的明显特色, 构成一条工程基础精细无损检测的有效技术路线。

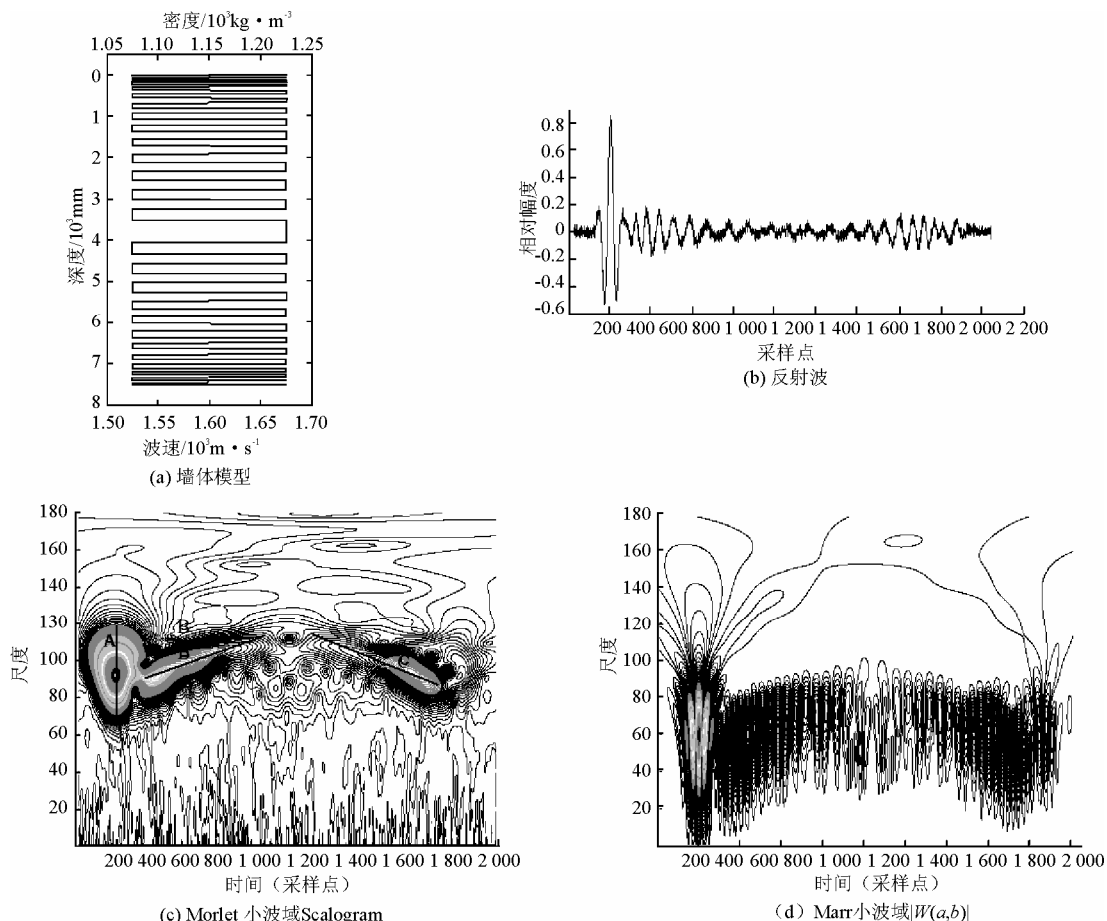


图5 墙体模型 A 反射波特征小波分析无损检测

Fig.5 Nondestructive detection for wall model A by wavelet-based reflection wave analysis

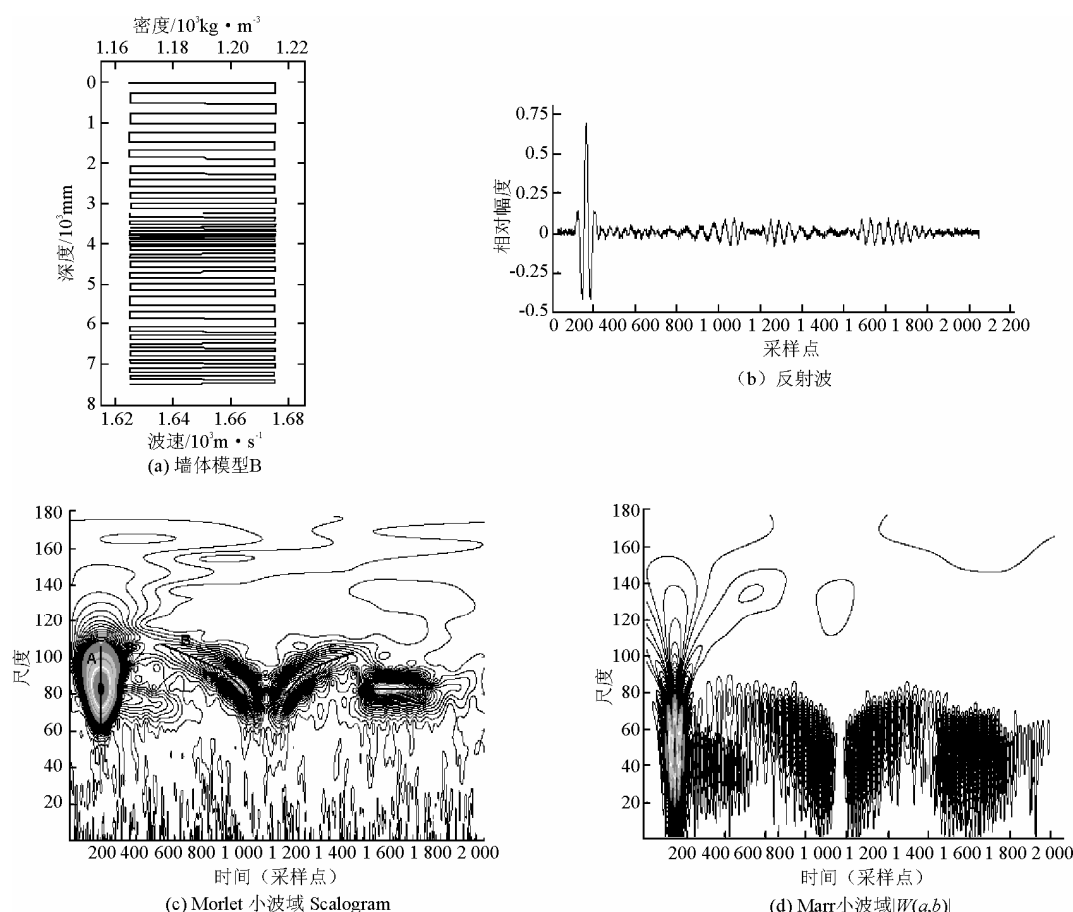


图6 墙体模型B反射波特征小波分析无损检测

Fig.6 Nondestructive detection for wall model B by wavelet-based reflection wave analysis

5 结 语

本文分析了 Morlet 与 Marr 小波在工程基础无损检测应用方面的功能互补性。将两个小波的优势有机结合, 提出了基于反射波特征小波分析的工程基础精细无损检测技术路线。小波理论在工程应用中发挥的动力学和信号分析作用, 从一个新角度拓展了目前小波理论在工程基础无损检测中的应用范围。

参 考 文 献

- [1] Wang Jing-tao. Wavelet analysis for stress wave detection of piles[J]. *Science in China, Series E*, 2004, 2: 1-7.
- [2] Flandrin P. Time-Frequency/Time-Scale Analysis[M]. New York: Academic Press, 1999.
- [3] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1992, 24: 395-457.
- [4] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [5] Mallat S. A wavelet tour of signal processing[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- [6] Kijewski T, Kareem A. Wavelet transforms for system identification in civil engineering[J]. *Computer-aided Civil Infrastructure Engineering*, 2003, 18: 339-355.
- [7] 曹茂森, 任青文, 王怀洪. 基于小波与分形理论的地震异常检测[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 672-679.
- [8] 曹茂森, 任青文, 毛伟兵. 基于解耦子波和优化神经网络的坝变形预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1751-1757.
- [9] 许明, 张永兴. 锚固系统质量检测的小波分析法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 262-265.
- [10] 张良均, 王靖涛, 李国成. 小波变换在桩基完整性检测中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(11): 1735-1738.
- [11] Hong J C, Kim Y Y. Determination of the optimal gabor wavelet shape for the best time-frequency localization using the entropy concept[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(4): 387-395.
- [12] Staszewski W J. Identification of damping in MDOF systems using time-scale decompositions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(2): 283-292.

CAO Mao-sen, REN Qing-wen, WANG Huai-hong. A method of detecting seismic singularities using combined wavelet with fractal[J]. *Chinese Journal of geophysics*, 2005, 48(3): 672-679.

[8] 曹茂森, 任青文, 毛伟兵. 基于解耦子波和优化神经网络的坝变形预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1751-1757.

CAO Mao-sen, REN Qing-wen, MAO Wei-bing. New prediction model for dam deformation based on decoupled wavelet and optimal neural networks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1751-1757.

[9] 许明, 张永兴. 锚固系统质量检测的小波分析法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 262-265.

XU Ming, ZHANG Yong-xing. Wavelet analysis of quality inspection of anchorage system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 262-265.

[10] 张良均, 王靖涛, 李国成. 小波变换在桩基完整性检测中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(11): 1735-1738.

ZHANG Liang-jun, WANG Jing-tao, LI Guo-cheng. Application of wavelet transform in integrity testing of piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1735-1738.

[11] Hong J C, Kim Y Y. Determination of the optimal gabor wavelet shape for the best time-frequency localization using the entropy concept[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(4): 387-395.

[12] Staszewski W J. Identification of damping in MDOF systems using time-scale decompositions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(2): 283-292.