

小波分析在钢筋混凝土梁损伤识别中的应用

薛刚^{1,2)} 蔡美峰¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 包头 014010

摘要 为识别钢筋混凝土简支梁的损伤状况,对简支梁进行了逐级加载实验,每级加荷后卸荷,观测梁的裂缝,并测定梁的动力反应.将钢筋混凝土简支梁作为无限自由度体系,并对该体系的动力方程进行小波变换,得到多尺度下的结构动力响应表达式.信号经多尺度分解后,包含了信号中更多的结构损伤信息.基于此,用DASP信号处理系统对钢筋混凝土简支梁各损伤阶段的动态信号进行二进制小波分解,通过分析各频段的波形,确定了梁的损伤.

关键词 钢筋混凝土梁; 损伤识别; 小波分析; 多尺度分析

分类号 TU 392.3

传统的傅里叶分析是一种纯频率的分析方法,它在频域的定位性是完全准确的(即频域分辨率最高),而在时域无任何定位性(或分辨能力).短时傅里叶变换以固定大小的窗函数对时域特性有一定的分析能力,而小波变换通过小波函数的伸缩和平移,克服了短时傅里叶变换窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交基的缺点,是一种非常适合对非稳态信号进行处理的数学工具^[1-3],被誉为数学显微镜.小波函数定义如下.

设 $\Psi(t)$ 为一平方可积函数,即其傅里叶变换 $F(\omega)$ 满足条件:

$$\int_{\mathbf{R}} \frac{|F(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数,并称式(1)为小波函数的可允许性条件.

损伤结构的动力特性与结构的损伤有着直接的关系,所以结构的动力响应信号是结构损伤识别的原始资料^[4].近年来,小波分析技术逐渐被应用于结构损伤识别领域^[1,5-9];韩建刚等人提出了用于损伤识别的小波包能量变化率指标,并根据此指标提出了用其进行损伤识别的实施步骤^[10];Kim等人采用Gabor小波识别简支梁的裂缝,不仅能识别损伤位置,而且也能估计损伤程度^[11].本文对三根钢筋混凝土简支梁在逐级加荷-卸荷后的动力特性进行了测试,研究了在各级荷载作用下的小波原始信号经过多尺度分解后的波形图,分析了基于小波变换多尺度带通滤波器特性在结构损伤识别中的应用.

收稿日期: 2006-09-26 修回日期: 2007-01-05

基金项目: 内蒙古自治区教育厅资助项目(No. NJ06075)

作者简介: 薛刚(1968-),男,副教授,博士研究生;蔡美峰(1943-),男,教授,博士生导师

1 小波变换的多尺度辨析基本原理

将钢筋混凝土梁分解成 n 个单元的无限自由度体系.每个单元的质量为 m_i ,刚度为 k_i ,阻尼为 c_i ,如图1所示.

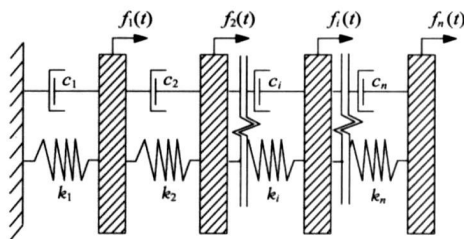


图1 无限自由度体系的动力系统模型

Fig 1 Dynamic mode of multi-degree-of-freedom systems

无限自由度体系的动力方程为:

$$M\ddot{\mathbf{y}}(t) + C\dot{\mathbf{y}}(t) + K\mathbf{y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2)$$

其中 M 、 C 和 K 分别为整体质量、阻尼及刚度矩阵,均为 $n \times n$ 对角矩阵; $\mathbf{y}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{y}}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ 分别为加速度向量、速度向量及位移向量; $\mathbf{F}(t)$ 为荷载向量, $\mathbf{F}(t) = (f_1(t), f_2(t), f_3(t), \dots, f_n(t))$.

由式(2)得:

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) + M^{-1}C\dot{\mathbf{y}}(t) + M^{-1}K\mathbf{y}(t) = M^{-1}\mathbf{F}(t).$$

用正交小波基 $\psi(t)$ 对上式两边进行小波变换^[12],得到:

$$\text{WT}\ddot{y}_i(a, b) + \frac{c_i}{m_i}\text{WT}\dot{y}_i(a, b) + \frac{k_i}{m_i}\text{WT}y_i(a, b) = \frac{1}{m_i}\text{WT}f_i(a, b), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

根据小波变换的多分辨率分析,式(3)中各式的每一项都可以分解为不同尺度上的细节部分和概貌

部分, 即为:

$$(d_{y_i}^1 + c_{y_i}^1) + \frac{c_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + c_{y_i}^1) + \frac{k_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + c_{y_i}^1) = \frac{1}{m_i}(d_{f_i}^1 + c_{f_i}^1), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

利用正交小波变换不同尺度间的正交性, 得到式(4)中各式在各尺度上的关系如下:

$$(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + d_{y_i}^3 + c_{y_i}^3) + \frac{c_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + d_{y_i}^3 + c_{y_i}^3) + \frac{k_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + d_{y_i}^3 + c_{y_i}^3) = \frac{1}{m_i}(d_{f_i}^1 + d_{f_i}^2 + d_{f_i}^3 + c_{f_i}^3),$$

$$\dots$$

$$(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + \dots + d_{y_i}^J + c_{y_i}^J) + \frac{c_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + \dots + d_{y_i}^J + c_{y_i}^J) + \frac{k_i}{m_i}(d_{y_i}^1 + d_{y_i}^2 + \dots + d_{y_i}^J + c_{y_i}^J) = \frac{1}{m_i}(d_{f_i}^1 + d_{f_i}^2 + \dots + d_{f_i}^J + c_{f_i}^J), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中 J 表示尺度. 当结构刚度参数 (k_1, k_2, \dots, k_n) 由未损伤状态 ($k_1^0, k_2^0, \dots, k_n^0$) 变化到损伤状态 ($k_1^d, k_2^d, \dots, k_n^d$) 时, 可以用一个损伤率向量 ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$) 来表示, 其中 $0 \leq \xi_i \leq 1$. 可以得到:

$$\begin{bmatrix} k_1^d \\ k_2^d \\ \vdots \\ k_n^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \xi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - \xi_2 & \dots & 0 \\ & \vdots & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 - \xi_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^0 \\ k_2^0 \\ \vdots \\ k_n^0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

应用多尺度分析, 通过观察结构系统输出的加速度信号 ($\ddot{y}_1(t), \ddot{y}_2(t), \dots, \ddot{y}_n(t)$) 在不同小波空间和尺度空间上的分解, 即 ($d_{y_i}^1, d_{y_i}^2, \dots, d_{y_i}^J$),

($d_{y_2}^1, d_{y_2}^2, \dots, d_{y_2}^J$), \dots , ($d_{y_n}^1, d_{y_n}^2, \dots, d_{y_n}^J$) 及 ($c_{y_i}^J, c_{y_2}^J, \dots, c_{y_n}^J$), 可以对不同损伤率 ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$) 造成的结构的刚度损伤进行识别.

由式(5)可知: (1) 结构不同位置的加速度信号 $\ddot{y}(t)$ 对一定的损伤有不同的敏感性; (2) 同一位置的加速度信号在不同尺度上的分解信号, 对损伤的敏感性不同; (3) 各加速度信号在不同尺度上的能量分布与激励荷载 $F(t)$ 的频带能量分布有关; (4) 不同位置上的加速度信号和不同尺度上的分解信号其信息含量是不同的, 结构不同位置的传感器信号决定了所能提供的系统最大信息, 而信号的多尺度分解能够尽可能地挖掘出原始信号中所包含的结构损伤信息.

2 基于小波分析的钢筋混凝土梁损伤识别

2.1 实验概况

制作了三根钢筋混凝土简支梁, 梁的几何参数为 $150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 2200 \text{ mm}$. 配筋为: 纵向受拉钢筋为二根 $\phi 16 \text{ mm}$ 的钢筋, 受压钢筋为二根 $\phi 12 \text{ mm}$ 的钢筋, 箍筋 $\phi 6 \text{ mm}$, 双臂箍, 间距为 100 mm . 钢筋级别为 HPB235. 混凝土强度等级为 C25. 采用集中力逐级加载的方法, 每级荷载为 5 kN , 在每一级荷载下实验步骤为: (1) 每一级荷载下持荷, 用 DH 3816 静态应变测试系统测定控制截面受拉钢筋及受压边缘混凝土的应变, 并观察裂缝位置、高度和宽度; (2) 卸荷至零, 观察裂缝位置、高度和宽度; (3) 每级荷载卸除后, 用北京东方振动研究所的 DASP 系统进行动态信号采集. 实验在内蒙古科技大学结构实验室完成, 图 2 为实验装置示意图.

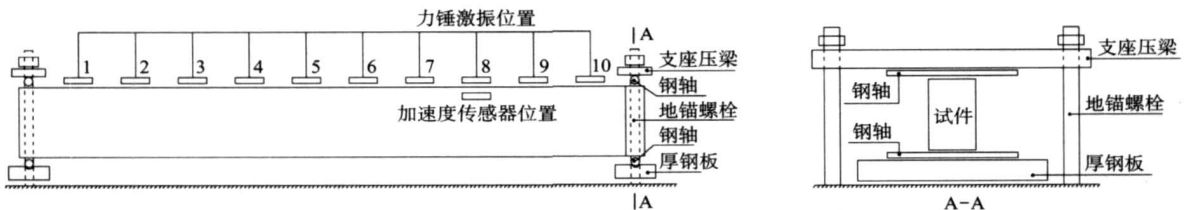


图 2 实验装置

Fig 2 Experimental setup

2.2 小波变换结果及分析

对上述采集信号进行二进制小波分解, 可得到分解的波形图. 图 3 和图 4 为实验梁的各级荷载作用下, 原采集信号的二进制小波分解波形图.

从图 3 和图 4 比较可以看到: 随着外荷载的逐渐增加, 频带 N5 ($96 \sim 192 \text{ Hz}$)、N6 ($192 \sim 384 \text{ Hz}$)、N7 ($384 \sim 769 \text{ Hz}$) 和 N8 ($769 \sim 1538 \text{ Hz}$) 的幅值越来越小, 包含的能量降低, 所以波形衰减越来越快; 对

于 N4(48~96 Hz) 及 N3(24~48 Hz) 频带, 幅值则越来越大, 相应的能量增加, 波形衰减较慢. 钢筋混凝土梁在不同损伤状态下, 由二进制小波分解后的波形图有较明显的区别, 可以判断损伤的存在.

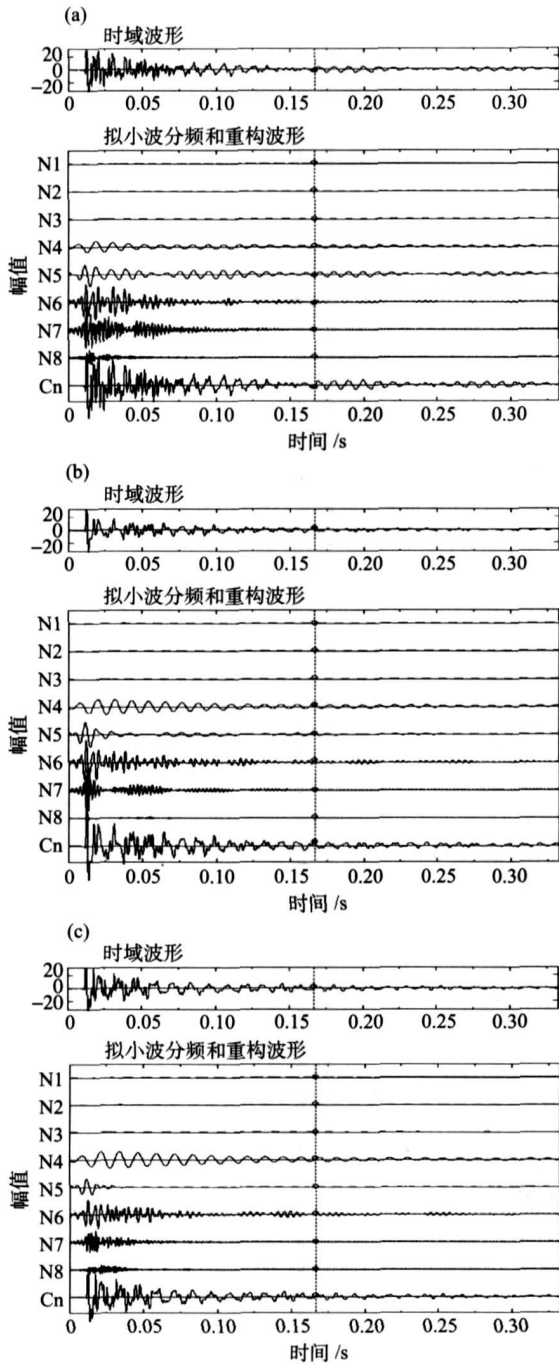


图3 测点2处小波多尺度分解波形图. (a) 加载前; (b) 外荷载 30 kN; (c) 外荷载 50 kN

Fig. 3 Wavelet multi-scale decomposition signal of Point 2: (a) before loading; (b) loading for 30 kN; (c) loading for 50 kN

从实验梁的第 2 激振点和第 6 激振点可以看到: 在各阶荷载下, 两个激振点处经过小波分解的波形图是不同的, 在第 6 激振点处的波形图的幅值明

显大于在第 2 激振点的幅值. 在实验过程中观察到, 实验梁在第 6 激振点产生了裂缝. 可见, 在相同的条件下, 经过小波分解的波形图幅值较大处即为裂缝位置.

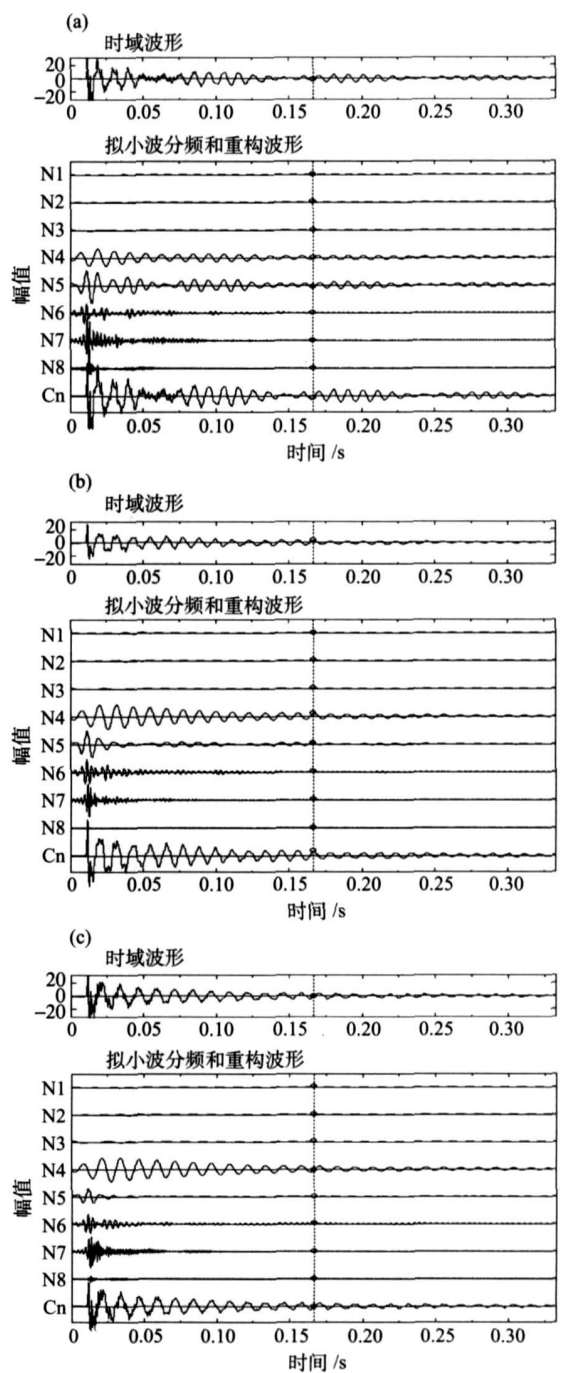


图4 测点6处小波多尺度分解波形图. (a) 加载前; (b) 外荷载 30 kN; (c) 外荷载 50 kN

Fig. 4 Wavelet multi-scale decomposition signal of Point 6: (a) before loading (b) loading for 30 kN; (c) loading for 50 kN

3 结论

(1) 本文分析了结构发生损伤时其动力参数的

变化特征. 应用二进制小波变换, 把结构动力系统的数学方程在不同尺度进行了分解, 得到不同尺度上的动力参数的描述. 通过对比不同尺度下的频率波形, 证明了应用小波分析方法可以得到更多的结构损伤信息.

(2) 对不同损伤状态下钢筋混凝土简支梁的动力信号进行小波分解, 分解后的波形图可较清晰的显示, 随着裂缝出现, 固有频率降低, 低频控制的带宽部分波形振幅越来越大, 衰减越来越慢, 而高频带宽波形衰减较快.

(3) 不同位置的加速度传感器在不同分解尺度上所反映的损伤信息量是不同的. 在离损伤位置近的地方, 频带上的损伤指标更为明显.

参 考 文 献

[1] 冉启文. 小波变换与分数傅里叶变换理论及应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001; 1
 [2] 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 2001; 3
 [3] 徐长发, 李国宽. 实用小波分析方法. 武汉: 华中科技大学出版

社, 2004; 36

[4] Ismail Z, Razak H A, Rahman A G A. Detemination of damage location in RC beams using mode shape derivatives. **Eng Struct**, 2006, 28; 1566
 [5] 郭健. 基于小波分析的结构损伤识别方法研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004; 6
 [6] 张和生, 薛松涛, 陈懿, 等. 基于小波多分辨滤波特性的结构损伤识别. 力学季刊, 2004, 25(1): 152
 [7] 孙增寿, 韩建刚, 任伟新, 等. 基于小波分析的结构损伤检测研究进展. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 93
 [8] 唐和生, 薛松涛, 陈懿, 等. 基于小波变换在线结构损伤检测分析研究. 固体力学学报, 2004, 25(1): 47
 [9] Khadem S E, Rezaee M. Development of vibration signature analysis using multiwavelet systems. **J Sound Vib**, 2003, 261; 613
 [10] Han J G, Sun Z S, Ren W X. Wavelet based damage identification of beams // Proceedings of the Eighth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Beijing: Science Press, 2004; 356
 [11] Kim H, Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis. **Eng Struct**, 2004, 26; 347
 [12] 孙延奎. 小波分析及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2005; 171

Application of wavelet analysis to damage detection of reinforced concrete beams

XUE Gang^{1,2)}, CAI Meifeng¹⁾

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
 2) Architecture and Civil Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

ABSTRACT In order to detect the damage of simple-supported reinforced concrete (RC) beams, experiment set-up for RC beams dynamic test was designed. In the test, the beam was subjected to an increasing static load in the middle to introduce cracks, and the last load step corresponded to failure. After each load step and unloading, the beam crack width was investigated and an experimental dynamic monitoring was performed. The multiple degree-of-freedom dynamic equation of the testing beam was wavelet transformed, and the structural dynamic response expression on multi-scale was acquired. It is shown that multi-scale decomposition of signal comprises more structural damage information. By means of DASP signal processing system, binary wavelet transformation is applied to the dynamic signal of reinforced concrete beams on different damage states. Through analyzing the wave-figure of all frequency scales, the damage of reinforced concrete beams is determined.

KEY WORDS reinforced concrete beams; damage identification; wavelet analysis; multi-scale analysis