

文章编号:1000-582x(1999)06-0066-05

12

66-70

# 冲击回波信号的小波分析研究

马民<sup>1</sup>, 余海龙<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 通信与测控学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学建筑工程学院)

TN911.6  
TU528.01

**摘要:** 利用冲击回波信号的连续小波变换波形特点, 精确提取冲击回波信号的纵波和横波波前, 大大提高了冲击回波测试材料弹性模量的测量精度。

**关键词:** 小波变换; 回波; 地震反射

**中图分类号:** TN 911.6

文献标识码: A  
弹性模量 混凝土, 冲击回波信号

冲击回波是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种混凝土无损探测和定位的方法。该法是用机械撞击在混凝土中产生应力脉冲, 基于脉冲形成的瞬时应力 P 波传播和反射来进行无损探测。在撞击回波系统中加上一个 S 波传感器就形成了一个微型地震反射系统。这一新系统就可用于无损估计混凝土弹性模量。

微型地震反射系统测试的原理简单, 它通过测量声波在混凝土试件中的反射声时确定声波传播速度, 再由试件已知密度和高度就可确定试件的动力弹性常数。众所周知, 混凝土是高衰减材料, 虽然由撞击产生的应力波具有波长长、可扫描相对较大的试件等优点, 但是由混凝土介质引起的频散和模式转换等, 仍使回波很难分辨, 甚至引起误判, 所以提高冲击回波信号的识别能力对改进微型地震反射系统的测试精度具有重要意义。

笔者通过研究冲击回波信号的连续子波变换所得到的相关序列的波形特点, 提出了一个用于检测这种信号起始点的准则函数, 利用此准则函数可以精确地提出冲击回波信号的 P 波和 S 波回波到达时间。

## 1 小波变换

设信号  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ , 其连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

其中  $a$  称为分辨率因子, 通常令  $a > 0$ ;  $b$  为平移因子,  $\overline{\Psi(t)}$  为  $\Psi(t)$  的共轭,  $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$  称为基本小波或小波母函数, 它满足约束条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

• 收稿日期: 1998-11-04

作者简介: 马民(1968-), 女, 四川简阳人, 重庆大学讲师, 博士研究生。研究方向: 电路与信号。

式中  $\Psi(\omega)$  为  $\Psi(t)$  的傅里叶变换, 这意味着:

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

## 2 波前定位的基本原理

冲击回波反射信号中的波形具有如下特点: 其幅度从起始点由零增加到某一最大值, 随后又逐步衰减。在精确提取波前时, 其幅度增加的这一上升过程不能被简化为理想的阶跃过程, 而一般选取平滑过渡信号的最典型数学模型:

$$f(t) = t \exp(-2t + j\omega_0 t) u(t) \quad (4)$$

式中  $u(t)$  为阶跃函数,  $\omega_0 \gg \alpha > 0$ ,  $\alpha$  很小,  $1/\alpha$  称为时间常数,  $\omega_0$  为信号中心频率。

为了确定一个用于检测冲击回波信号起始点的准则函数, 选取调制的高斯函数作为小波, 由于它具有良好的时间和频率局部化特性, 在信号检测中得到广泛应用, 其表达式为:

$$g(t) = \pi^{-1/4} \exp(-t^2/2 + j\omega_0 t) \quad (5)$$

对平滑过渡信号模型进行小波变换得到:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a} \sqrt{\pi}} \int_0^{+\infty} t \exp\left(-\alpha t - \frac{(b-t)^2}{2a^2} + j\omega_0 t + j\frac{\omega_0(b-t)}{a}\right) dt \quad (6)$$

当  $b \geq 0$  时有:

$$W_f(a, b) = \sqrt{2a} \sqrt{\pi} \exp(-0.5(\alpha\omega_0 + ja\alpha - \omega_0)^2 + j\omega_0 b - \alpha b) \cdot (b - a^2\alpha + ja(\alpha\omega_0 - \omega_0)) \quad (7)$$

由  $\frac{\partial}{\partial b} |W_f(a, b)|^2 = 0$  有:

$$b_{1,2} = a^2\alpha + (1 \pm \sqrt{1 - 4a^2\alpha^2(\alpha\omega_0 - \omega_0)^2}) / (2\alpha) \quad (8)$$

已有研究<sup>[1]</sup>表明, 直接应用  $|W_f(a, b)|$  来检测这类信号起始点比较困难的根本原因在于信号在起始点附近的幅度太小, 使得  $|W_f(a, b)|$  在信号起始点附近的值很小。在有不同幅度信号叠加时, 受信号幅度的影响, 直接提取弱信号起始点更为困难。为此, 可设计如下函数来消除幅度的影响:

$$T(a, a_0, b) = \frac{|W_f(a, b)|}{|W_f(a_0, b)|} \quad (9)$$

其中  $a_0$  为一恒定尺度, 令  $A = \omega_0/\omega_0$ , 一般取  $a_0 = A$ ,  $a \leq 0.5$  时, 噪声的平滑能力最强, 信号起始点的估计值误差也很小。事实上, 函数  $T(a, a_0, b)$  是利用平滑过渡信号在起始点附近高频分量比较丰富的特征, 同时又排除了信号幅度的不利影响而设计的一个准则函数。两实信号和噪声叠加的结果如图 1 所示。从图中可看出: 前一段波越小或衰减越大时, 后者受其影响越小。

## 3 测试试验及结果

冲击回波测试系统是一个球面轻击源在固体材料体内和表面产生 P 波和 S 波。对于 P

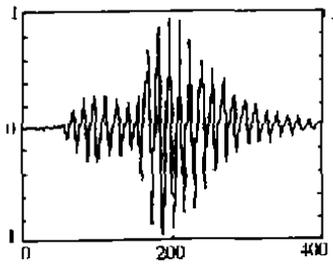


图1 两实信号与噪声叠加

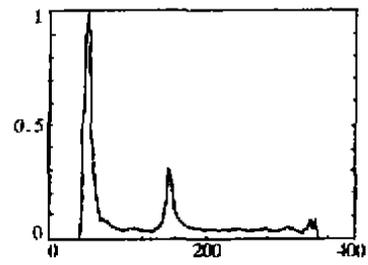


图2 图1的 T(0.5A, A, b) 归一化

波,在撞击点正下方以最大形式幅射,在固体介质中,当冲击源与接收传感器放置很近时,其主要反应就是 P 波从介质顶部到底部的反射引起的。这一反应可很好地由垂直位移传感器检测到。P 波在试件顶表面和底表面或内部界面之间的传播就在表面形成一个周期波形。P 波到达上表面的时间  $\Delta t$  与 P 波传播的路径长度(两倍界面之间的厚度)  $2T$  和 P 波波速  $v_p$  有关。

$$\Delta t = 2T/v_p \quad (10)$$

已知时间  $\Delta t$  和界面厚度  $T$  就可求出 P 波波速  $v_p$

$$v_p = 2T/\Delta t_p \quad (11)$$

对于 S 波,其幅度方式不同于 P 波。在一般混凝土中其泊松比约为  $0.15 \sim 0.25$ 。S 波最大能量以与冲击入射角  $35^\circ \sim 45^\circ$  之间来回传播。在混凝土板中, S 波的位移可以在离冲击源点一倍厚度距离处很好捕获。而在混凝土圆柱试件中, S 波位移可在顶部表面任何位置捕获。用垂直传感器可以检测到 S 波的垂直分量(SV 波);然而,水平位移传感器对横向位移更敏感。

S 波到达顶表面的时间  $\Delta t_s$  与波速  $v_s$  和传播路径  $2T$  同样的关系

$$v_s = 2T/\Delta t_s \quad (12)$$

P 波波速  $v_p$  和 S 波波速  $v_s$  受材料的扬氏模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  和密度  $\rho$  控制,纵波波速  $v_p$  为

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (13)$$

横波波速  $v_s$  为

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (14)$$

如果已知波速  $v_p$  和  $v_s$  以及材料密度  $\rho$ , 则可由(13)和(14)式计算材料的动力弹性常数。

试验选用直径 50 mm, 高 100 mm 圆柱试件。试件 24 小时后脱模,然后用一层薄布覆盖在试件表面 28 天,试件在 7 ~ 28 天间测试其强度和静弹性模量。

试件的 P 波垂直位移传感器放在离试验敲击点 20 mm 处。S 波水平位移传感器放在与敲击点相距 42 mm 处的试件另一边界端。整个试验的采样频率为 100 kHz。试件密度和撞击 P 波、S 波波形每 24 小时测试一次。波形测试结果如图 3、4 所示,由于混凝土试件中有空隙,

P 波和 S 波初至的拾取较为困难, 特别是图 4 的 S 波初至完全淹没在噪声中, 无法识别。而经小波变换后(如图 5 和图 6 所示)。此时才能较准确地拾取 P 波和 S 波初至时间, 较精确地计算动弹常数。最后由公式(13)和(14)计算出的动力弹性常数和测试的静态常数如表 1 和图 6 所示。由图 6 所示的微型地震反射系统获得动弹常数与干燥时间的关系表明: 在干燥期中混凝土的动弹模  $E$  随时间而增加。但动弹模随时间的增长率逐渐减慢, 泊松比  $\mu$  随时间而降低。同时由表 1 可知, 传统检测的动力弹性常数的误差为 13.9% ~ 22.2%, 而小波变换后的误差为 4.5% ~ 5%。由此可见, 小波变换的应用可大大提高材料特性的测试精度, 不失为一种较理想的信号分析工具。尽管普遍认为材料动弹常数和静弹常数有显著差异, 但由微型地震反射系统获得的动弹常数与静态值非常接近, 且表明试件为均质固体, 空隙和小裂隙并不影响由微型地震反射系统获得的速度值。

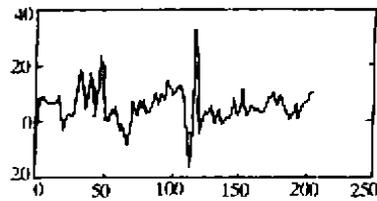


图 3 试件的垂直位移传感器检测波形

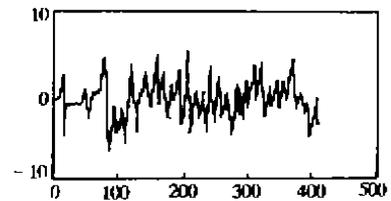


图 4 试件的水平位移传感器检测波形

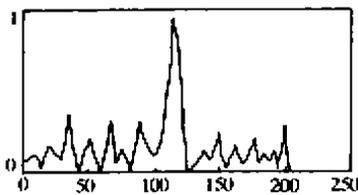


图 5 图 3 的  $T(\omega, \omega_0, b)$  归一化结果

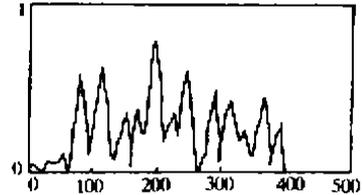
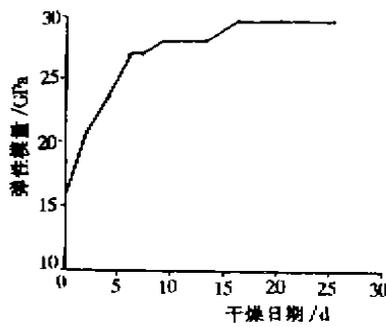
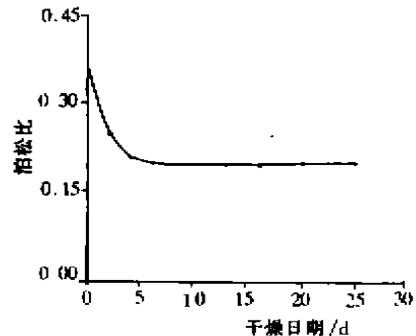


图 6 图 4 的  $T(\omega, \omega_0, b)$  归一化结果



(a) 弹性模量



(b) 泊松比

图 7 混凝土试件的动弹常数与干燥时间的关系

表1 材料强度和弹性常数表

测试手段	动态扬氏模量	静态扬氏模量	动态泊松比	静态泊松比	单轴抗压强度
小波分析	$30.8 \pm 1.4$	-	$0.20 \pm 0.01$	-	$36.3 \pm 2.1$
传统测试	$32.3 \pm 4.5$	$27.5 \pm 2.3$	$0.18 \pm 0.04$	$0.20 \pm 0.01$	$36.3 \pm 2.1$

#### 4 结论

本研究的结果表明,运用小波分析技术可精确地提取由微型地震反射系统产生的P波和S波的波前,大大提高了系统测试材料动弹常数的精度。由微型地震反射系统测试的材料动弹常数与静态值非常接近,且小空隙和裂隙不影响系统测试的波速值。

#### 参 考 文 献

- [1] SHYU H, PAI Y. A new tool for impact-echo measurements wavelet transform[J]. INSIGHT, 1997, 39(5):337~339.
- [2] DAUBECHIES I. The wavelet transform time frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Trans. Inform. Theory 1990, 36:961~1005.
- [3] PESSIKI S P, CARINO N T. Setting time and Strength of concrete using the impact echo method[J]. Materials Journal, 1988, 85(5):389~399.
- [4] 李建平. 小波分析与信号处理. 重庆:重庆出版社, 1997, 12:77~88.

## Study on Wavelet Analysis of Impact-echo Signal

MA Min<sup>1</sup>, YU Hai-long<sup>2</sup>

(1. College of Communication and Information Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Architecture Engineering, Chongqing University)

**ABSTRACT:** Based on the characteristic of the continuous wavelet transform for the impact-echo signal, the wavefronts of longitudinal waves and transversal waves in the impact-echo signal can be estimated precisely, and it is improved that the precision of the dynamic elastic properties of materials evaluated through impact-echo.

**KEYWORDS:** wavelet transform; echo waves; seismic reflection

(责任编辑 吕赛英)