

小波分析在基桩浅部缺陷检测中的应用

刘世奇, 潘冬子

陈静曦

(中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071) (武汉理工大学, 武汉 430072)

摘要:通过对基桩存在浅部缺陷时桩顶响应信号的小波分析, 提取信号中所包含的对应于缺陷部位的应力波反射特征信息, 可以实现对基桩浅部缺陷的准确定位。数值模拟试验显示了该方法的合理性; 在此基础上, 进行了工程桩的现场试验研究, 结果表明该方法对基桩浅部缺陷的检测是可靠的。

关键词:小波分析; 基桩检测; 信号分析; 浅部缺陷

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2005)04-0195-03

Application of Wavelet Analysis in Shallow Defects Testing of Pile

LIU Shi-qi, PAN Dong-zi

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Chen Jing-xi

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: By analyzing the response signal of pile when it has shallow defects with wavelet transformation, the reflecting characteristics of the stress wave hiding in the original signal is obtained. This method can locate the shallow defects of pile accurately and be verified by numerical simulation experiment. The result of in-situ test is in good agreement with numerical simulation and it shows that this is an effective method and can be used in shallow defects testing of piles.

Keywords: Wavelet analysis; Pile testing; Signal analysis; Shallow defects

随着桩基工程的发展, 桩的动测技术得到了广泛的应用。其中应力波反射法以其设备轻便、检测快速、成本低廉等优点而成为基桩完整性检测的重要手段, 但是也存在一些亟待解决的问题, 如对桩身浅部缺陷的判断一直是个难题。小波分析是一种时频分析方法, 具有多分辨率分析的特点, 可在时域和频域内部表征信号的局部特征。提出一种基于小波分析的桩身浅部缺陷检测方法, 数值模拟和现场试验结果表明, 该方法对基桩浅部缺陷的检测行之有效, 对提高动测结果的准确性有较重要的意义。

1 数值模拟

1.1 数值模型与参数确定

基桩浅部缺陷的类型有① 桩表面浮浆未清理

干净。② 浅部裂缝。③ 浅部离析层。④ 浅部夹泥等。浅部缺陷一般位于桩身上部 1.5 m 内, 其反射波波形畸变, 并呈强振幅和低频率特征。在数值模拟试验中, 将桩身和地基系统等分成一系列小单元, 建立桩身在瞬态纵向激振力作用下的动力有限元分析模型(图 1)。该数值计算模型假定① 桩为有限长, 且在有限

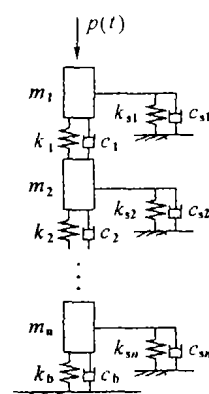


图 1 桩土模型

单元内为等截面均质杆, 杆的材料为粘弹性材料并为 Voigt 体^[1], 弹性模量为 E 、密度为 ρ 、粘性常数为 c_i 。② 桩侧土在有限单元内为均质, 桩侧土对桩的作用用一个线性弹簧和线性阻尼器以平行的方式耦合, 其分布式弹簧系数为 k_{si} , 阻尼系数为 c_{si} 。③ 桩

底土对桩的作用简化为线性弹簧 k_b 和线性阻尼 c_b 来耦合的方式。④ 激振力沿桩轴线方向且均布于桩顶;桩土系统的振动为小变形。

应力波反射法测试中一般用小锤敲击桩顶,根据大量的测试研究,升余弦函数在波的形态及归零方面更接近于实测力波^[2],能够较理想地描述激振力,所以锤击桩顶的瞬态纵向激振力可以采用升余弦脉冲^[2]来模拟,其表达式为

$$p(t) = \begin{cases} \frac{I}{T} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}t\right) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t < 0 \text{ 或 } t > T \end{cases} \quad (1)$$

式中 I ——激振力的冲量

T ——作用时间

在所选取的计算模型中,桩长 $l=9$ m,桩径 $d=350$ mm,波速 $c=3\ 600$ m/s,缺陷距桩顶 $H=0.65$ m,缺陷长度 $h=10$ cm,缺陷类型为软弱夹层,夹层材料的弹性模量与桩身混凝土弹性模量之比 $n=20$,桩侧土及桩底土的动力参数见表 1。

表 1 桩侧土及桩底土的动力参数^[3]

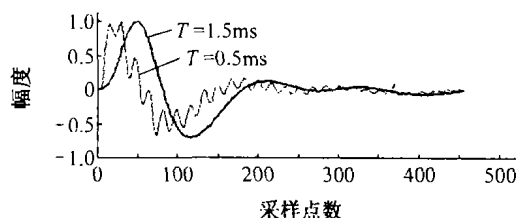
部 位	弹簧系数 k	阻尼系数 c
桩侧土	$2.75G_{sa}$	$2\pi r_0 \sqrt{\rho_{sa}G_{sa}}$
桩底土	$4G_{bs}r_0/(1-\nu_b)$	$3.4r_0^2 \sqrt{\rho_bG_b}$

注:表中 G_{sa} , ρ_{sa} , G_b , ρ_b 分别为桩侧土和桩底土的剪切模量和质量密度; r_0 为桩的半径; ν_b 桩底土的泊松比。

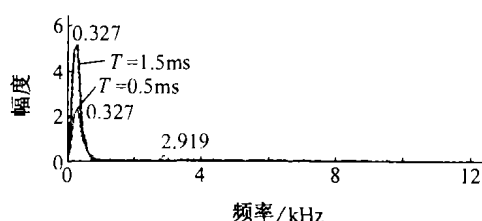
1.2 浅部缺陷的信号特征

图 2 表示存在浅部缺陷时,桩顶质点速度时程曲线及功率谱图。

图中 T 代表激振力作用时间, T 越大,高频成分越少,模拟低频信号;反之, T 越小,低频成分越



(a) 浅部缺陷桩顶质点速度时程曲线



(b) 桩顶质点速度功率谱图

图 2 浅部缺陷桩顶速度的时程曲线及功率谱图

少,模拟高频信号。由图 2 可见① 低频脉冲容易检测出靠近桩顶的缺陷,造成浅部缺陷判读困难;高频脉冲判别浅部缺陷比低频脉冲有利。② 低频脉冲激发时,功率谱图中仅见一大低频信号,缺陷位置难以辨认;高频脉冲激发时,将在大低频的基础上迭加一高频,谱图中将出现双峰,相应的高频对应浅部缺陷的位置 H

$$H = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}$$

式中 c ——弹性波波速

f_1 ——第一峰值

f_2 ——第二峰值

代入 $c=3\ 600$ m/s, $\Delta f=f_1-f_2=2\ 592$ Hz, 估算缺陷位置距桩顶 $H \approx 0.7$ m,与假设基本一致。

由此可见,对于浅部曲线,不论脉冲宽窄,时域分析很难确定其位置。在合适的窄脉冲作用下利用频域分析能较准确地定位,但在实际检测过程中脉冲宽度具有很大的人为性,有必要探讨一种新的方法,在任意脉冲宽度下实现基桩浅部缺陷的判别。在此引入小波变换。

1.3 小波分析^[4,5]

小波变换是把基本小波函数作位移后,在不同尺度下与待分析的信号作内积

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \overline{\psi_{ab}(t)} dt \quad a > 0 \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

变换结果 $W_f(a, b)$ 反映了信号 $f(t)$ 在尺度 a (频率) 和位置 b (时间) 的状态,即小波变换实际上是一种时频分析。设 $\psi \in L^1 \cap L^2$ 且满足容许条件

$$C_\psi < \infty \quad (5)$$

$$\text{式中} \quad C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(a\omega)|^2}{a} da$$

若 $f(t)$ 在 t 处连续,则信号 $f(t)$ 可由下式重构

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db \quad (6)$$

在实际应用中,广泛使用的是二进制小波变换,即取 $a=2^{-j}$, $j \in Z$ 。利用 Mallat 算法,设有信号 $f(t)$ 的离散采样序列 $f(n)$, $n=1, \dots, N$ 信号在尺度 $j=0$ 时的近似值为 $C_0(n)=C_j(n)|_{j=0}=f(n)$,则离散二进制小波变换由下式确定

$$C_{j+1}(n) = \sum_{k \in Z} H(k-2n) C_j(k)$$

$$D_{j+1}(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} G(k-2n)C_j(k) \quad (7)$$

式中 H 和 G 为小波函数 $\phi(t)$ 确定的两列共轭滤波器系数。此时尺度函数中两尺度关系为

$$\phi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} H(k)\phi(2t-k) \quad (8)$$

式中 $H(k) = (\frac{1}{\sqrt{2}}\phi(\frac{t}{2}), \phi(t-k))$, 相应小波函数为

$$\psi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(k)\phi(2t-k) \quad (9)$$

式(9)中 $G(k) = (-1)^k H(1-k)$, 因此, 信号的小波分解为

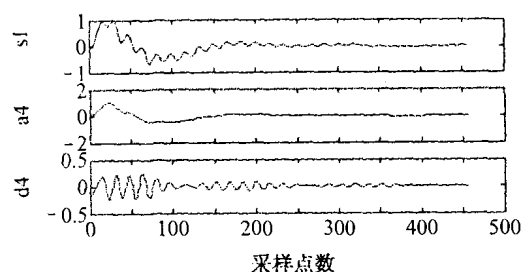
$$A_j f(t) = A_{j+1} f(t) + D_{j+1} f(t) = \sum_n C_j(n)\phi_m(t) + \sum_n D_j(n)\psi_m(t) \quad (10)$$

设 V_j 为由 ϕ 张成的子空间, W_j 为由 ψ 张成的子空间, 则 $A_j f$ 是 $f(t)$ 在 V_j 上的投影, 称为逼近信号, 相当于一低通滤波器对 $f(t)$ 滤波的结果; $D_j f$ 是 $f(t)$ 在 W_j 上的投影, 称为细节信号, 相当于一组带通滤波器对 $f(t)$ 滤波的结果。可见小波变换的实质是把原始信号中不同频段的信息抽取出来, 并将其显示在时间轴上, 这样既可以反映信号的时域特征也可以反映信号的频域特征。小尺度的变换包含信号的高频成分, 大尺度则包含低频成分。这样, 就可以根据需要, 选取不同尺度的变换来描述信号的特征。

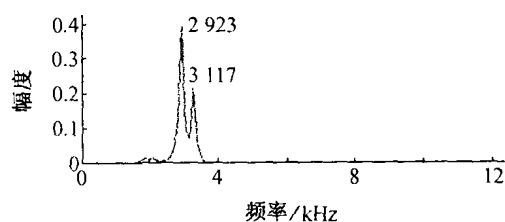
在小波分析的工程应用中, 一个很重要的问题就是最优小波基的选取, 这是因为运用不同的小波基解决同一个问题会产生不同的结果。另外, 根据要从信号中提取的信息不同, 也应恰当选择小波和构造小波函数。Daubechies 小波作为正交小波, 具有有限紧支撑, 其时域和频域局部化能力强, 尤其是在数字信号的小波分解过程中可以提供有限长的更实际更具体的数字滤波器, 因此选择 Daubechies 小波系列的 db6 小波对桩顶响应信号进行小波变换, 对每一信号分解到第四层。

图 3a 是图 2 中高频激发 ($T=0.5$ ms) 时桩顶速度信号的小波分析结果。s1 是原始信号, a4 是第四层逼近信号, d4 是第四层细节信号。图 3b 是第四层细节信号的频谱分析结果, 可见, 在 2 923 Hz 左右, 有一能量极大点, 与图 2b 中浅部缺陷所对应的高频相近, 借此可以判断缺陷的位置。

另外, 将图 2 中用低频 ($T=1.5$ ms) 激发时的桩顶信号进行小波分析, 显见第四层细节信号 d4 中在频率 2.927 kHz 处有一能量极大点, 与浅部缺陷



(a) 信号分解



(b) 细节信号 d4 的功率谱图

图 3 高频激发时桩顶速度信号的小波分解

所对应的高频相近。在图 2b 中, 低频激发时, 功率谱图中仅见一大低频, 缺陷位置难以辨认, 而通过小波变换, 提取细节信号的信息, 重新拾取原始信号功率谱中被掩盖的高频, 实现在低频激发下基桩浅部缺陷的判别。

2 现场试验

为了说明基于小波分析的基桩浅部缺陷检测方法的有效性, 数值模拟分析结果的正确性, 对某工程桩的实测信号进行了小波分析。桩长 16 m, 混凝土标号 C25, 图 4 是实测信号的小波分析结果。s 是原始信号, a4 是第四层的逼近信号, d4 是第四层的细节信号。图 5a 原始信号的功率谱图, 与数值模拟结果类似, 图中仅见一大低频, $f_1 = 332$ Hz, 图 5b 是第四层细节信号的频谱分析结果, 对应的高频能量极大点 $f_2 = 3 135$ Hz。桩内弹性波速取为 $c = 3 400$ m/s, 由式(2)得桩身浅部缺陷距桩顶距离 $H = 0.6$ m。经开挖证实, 与实际缺陷位置相差不大。

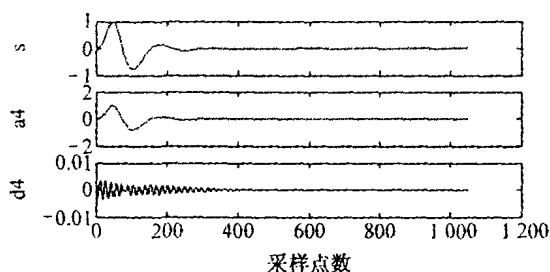


图 4 实测信号小波分析结果

(下转第 201 页)

的处理效果不如非线性滤波,而且在很多情况下还会模糊边缘等细节特征。

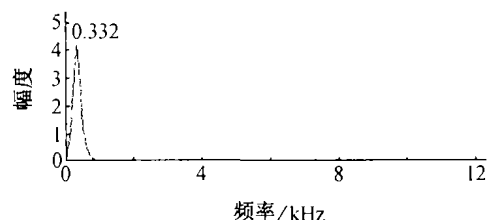
参考文献:

- [1] 张兆礼,赵春晖,梅晓丹.现代图像处理技术及 Matlab 实现[M].北京:人民邮电出版社,2001.
- [2] 梁 诚.双能量 X 射线骨密度分析的研究与实现[D].上海:华东理工大学,2001.
- [3] 祁 吉,高野正雄(日).计算机 X 线摄影[M].北京:人民卫生出版社,1997.
- [4] 黄煦涛.二维数字信号处理[M].北京:科学出版社,1985.
- [5] 张丕壮.数字射线成像中射线对面阵 CCD 图像传感器影响的研究[J].华北工学院测试技术学报,2001,15(3):196—199.
- [6] 韩 焱.弹药装药高能 X 射线数字图像处理技术[D].北京:北京理工大学,1998.
- [7] 陈树越.X 射线数字图像质量改善研究[D].南京:南京理工大学,2001.
- [8] 杨文玲.低剂量 X 射线实时成像处理[D].山西:华北工学院,1996.
- [9] 王明泉,韩 焱.非线性滤波在射线图像降噪增强中的

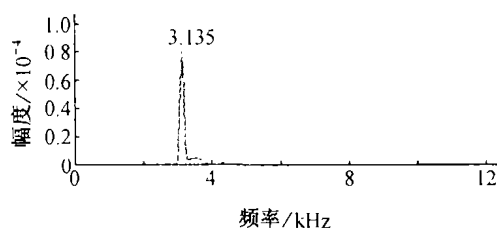
应用[J].无损检测,2002,24(7):281—285.

- [10] 陈树越,路宏年.工业 X 射线透视成像中的散射及其校正[J].兵工学报,2004,25(2):163—166.
- [11] 郭建中,陈森林.用维纳逆滤波器解卷积提高超声检测纵向分辨率的改进方法[J].陕西师范大学学报,2004,32(2):40—42.
- [12] Prasongsook Walailak, Rangsanseri Yuttapong, Thiti-amajshima Wiyada. Image denoising by wavelet-domain Wiener filtering[A]. Proceeding of the International Conference on Telecommunications[C], 2002.
- [13] 张 宇,王希勤,彭应宁.自适应中心加权的改进均值滤波算法[J].清华大学学报,1999,39(9):76—78.
- [14] 陈树越,路宏年,杨巧宁.X 射线对 CCD 噪声影响的分析及滤波方法研究[J].光学技术,2000,26(5):459—461.
- [15] 蔡 靖,杨晋生,丁润涛.模糊加权均值滤波器[J].中国图象图形学报,2000,5(A)(1):52—56.
- [16] 王志刚,王 伟,许晓鸣.一种改进型自适应加权模糊均值滤波算法[J].高技术通讯,2003,(2):19—24.
- [17] 蔡 靖,杨晋生,丁润涛.分类均值-加权中值混合滤波器[J].天津大学学报,1999,32(5):551—554.

(上接第 197 页)



(a) 原始信号



(b) 细节信号 d4

图 5 实测信号的功率谱图

表明,小波变换能够将信号在不同频段分解,然后再对分解出来的小波分量进行傅里叶分析。这样,小波变换和傅里叶变换结合起来,相互完善,相互补充就能够实现基桩浅部缺陷微弱反射波信号的分离和提取。

(2) 进一步的试验研究表明,小波分析不仅可以用于基桩浅部缺陷的检测,而且对于基桩其它部位缺陷、多重缺陷的检测同样适用。因此在基桩完整性检测中,小波分析具有广阔的应用前景,对提高基桩动测结果的准确性有较重要的意义。

参考文献:

- [1] 王奎华.桩材料阻尼对动测曲线的影响研究[J].岩土力学,1998,19(4):57—62.
- [2] 王雪峰,吴世明.基桩动测技术[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] Novak M, Nogami T, Aboul-Ella F. Dynamic soil reactions for plane strain case[J]. J E M D ASCE,1978,104(4):953—959.
- [4] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析[M].西安:电子科技大学出版社,1995.
- [5] 李建平.小波分析与信号处理——理论、应用及软件实现[M].重庆:重庆出版社,1997.

3 结语

(1) 当基桩存在浅部缺陷时,较强的人射波可以掩盖较弱的缺陷处反射波,形成检测盲区。采用小波变换多分辨率技术,对小波方法在基桩浅部缺陷检测中的应用进行了研究,数值模拟和现场试验