

桩基应力波检测的小波分析

王靖涛

(华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘要 论证了小波分析应用到桩基完整性检测上的理论根据. 运用波绕射理论阐明了桩中各种缺陷的反射脉冲频谱发生变化的机理. 模型桩实验和大量工程桩检测结果证实了理论分析的正确性. 提出了定量评估桩身损坏程度的小波分析方法. 给出了描述反射信号频谱变化的特征指标. 利用这些指标可以划分桩损伤程度的等级, 并给出了它们的临界值. 这些特征指标还可用于识别缺陷的类型.

关键词 桩完整性检测 小波分析 波绕射 波散射

在土木工程中, 桩基应力波无损检测对保障建筑物安全具有十分重要的意义. 目前在桩完整性检测中广泛使用的是声脉冲反射波法, 也称低应变法. 桩完整性检测实际上是波传播的介质反问题^[1]. 由于在测试中仅获得桩顶的质点速度响应, 缺少了一个边界条件, 因此属于反问题中的“欠定”问题. 这给问题的定量分析增加了很大困难. Rausche 等人^[2]提出了 PITWAP 信号拟合法来计算波阻抗沿桩身的变化. 然而, 其中力的边界条件是假设的, 这将引入较大误差. 文献[3]提出的 WANG-PIP 法也补充了一个力的边界条件, 然而仅对断裂和裂纹适用. 目前, 桩完整性检测分析中采用将桩身中的缺陷理想化为波阻抗突变的一个间断面的方法. 而实际上桩中缺陷的形态是十分复杂的. 当入射波遇到缺陷时, 将会发生波的散射和弥散.

20 世纪 80 年代后期发展起来的小波分析^[4]具有多分辨率或多尺度分析特征和在时频两域中均可表征信号局部特征的能力. 因此, 它被誉为信号分析的数学显微镜.

本文中, 首先论证了小波分析可以应用到桩完整性检测上的理论根据. 运用波绕射理论阐明了桩中各种缺陷的反射脉冲频谱发生变化的机理. 通过模型桩实验和大量工程桩检测结果的小波分析, 提出了桩完整性检测的小波分析方法.

1 小波分析应用到桩基检测上的理论根据

目前声脉冲反射波法的信号分析中, 都是基于经典的纵波在杆中传播的理论, 即用波动方程来描述声脉冲在桩中的传播过程. 波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中, u 是杆的轴向位移, x 和 t 分别是位置和时间坐标, c 是波传播速度. 这里应指出, 波动方程(1)所描述的波传播过程中, 波是不发生弥散的.

根据方程(1)的 D' Alembert 解答, 可以推导出在桩中一波阻抗突变的间断面上, 入射波和

反射波质点速度的关系式^[1]:

$$v_r = \frac{1 - Z_2 / Z_1}{1 + Z_2 / Z_1} v_i, \quad (2)$$

其中, v_r 和 v_i 分别是反射波与入射波的质点速度, Z_1 和 Z_2 分别是间断面上部和下部介质的波阻抗.

在(2)式的推导中, 将桩身中缺陷理想化为一波阻抗突变的间断面. 由(2)式可知 v_r/v_i 仅是一个常数. 这表明仅反射脉冲的振幅发生了变化, 未发生波形畸变. 然而, 实际桩中的缺陷形态是复杂的, 截面多为渐变的, 还有材料性质的变化等. 如断裂、缩颈和砼离析等.

当波遇到障碍物时, 障碍物表面上任何一点将成为新的波源, 并向各个方向发射次生波, 这种现象称为波的散射. 这种散射既包含反射也包含绕射. 弹性波散射问题研究^[5]表明, 在障碍物周围的应力分布是随入射波波长的改变而变化的. 对于频率趋于零的无限大波长情况, 结果与相应的静应力场相吻合. 应力波检测桩身中的缺陷实质上是弹性波散射的反问题^[1]. 目前, 大部分散射反问题研究都是基于波动方程的系数反演, 未考虑信号简谐成分的变化. 文献[6]的研究结果表明, 波在障碍物周围的反射和绕射状况, 主要取决于入射波波长与障碍物特征尺度的比值. 对于空洞来讲, 当入射波波长 λ 与空洞的直径 D 之比 λ/D 大于 20 时, 入射波的能量大部分可以绕射过去, 空洞周围呈准静态应力分布. 当 λ/D 小于 10 或更小时, 反射波能量急剧增加. 由此可知, 当一应力脉冲遇到障碍物时, 反射波和绕射波振幅的大小及简谐成分的变化主要取决于它的各简谐成分的波长与障碍物特征尺度的相对比值. 低频简谐成分容易绕射过去, 而高频成分却易被反射. 这样一来, 反射脉冲的频谱变化程度与障碍物的特征尺度密切相关. 在混凝土桩中主要存在 3 种类型的缺陷. 打入桩(预制桩)中缺陷多为裂纹和断裂(深且较宽的大裂纹), 灌注桩中多为缩颈和混凝土离析. 裂纹、断裂和缩颈属于结构上的缺陷, 主要是桩截面的变化, 而混凝土离析是桩身材料性质的改变, 混凝土变成松散的碎石体. 根据前面的分析, 前一种缺陷的反射脉冲频谱变化主要取决于缺陷的深度和宽度, 而对于后者, 由于碎石的体积较小, 混凝土离析引起的反射脉冲频率高.

利用各类缺陷反射脉冲频谱变化的不同特征, 可以反推缺陷的类型以及损坏程度.

2 桩完整性检测的小波分析

小波分析(wavelet analysis)是 Fourier 分析的一个重大突破与发展. 它具有两大特点, (i) 具有多分辨率或多尺度的特点, 可以在时频两域上进行分析; (ii) 在时域和频域都可以表征信号的局部特征. 小波分析主要包括两部分, 小波变换和小波级数. 小波变换定义为

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt, \quad (3)$$

其中, 函数 $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t - \tau}{a} \right)$ 是基本小波 $\psi(t)$ 通过位移 τ 和尺度伸缩 a 获得的, $x(t)$ 是平方可积函数 ($x(t) \in L^2(R)$), $*$ 号表示取共轭. τ 和 a 若是连续变量, 称为连续小波变换, 若取离散值, 称为离散小波变换. 采用了适宜描述检测信号局部特征的两个基本小波, 即 Gauss 函数 $\theta(t)$ 的一阶和二阶导数:

$$\psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} t e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

和

$$\psi^{(2)}(t) = -\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}(1-t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (5)$$

这里, $\psi^{(2)}(t)$ 取 $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ 的负值, 即是 Marr 小波. 这两个小波变换能很好地反映出信号突变点的特征. 在不同尺度下进行小波变换, 可获得时间-频率两域的信号特征.

为了验证前节分析的结果, 进行了具有典型缺陷的模型桩试验, 同时对模型桩和大量的工程桩的检测结果进行了多尺度小波变换. 这些结果证实了前面绕射理论分析的正确性.

这里采用了离散的小波变换, 取尺度因子 $a = 2^j$, 用 j 表示尺度. 随尺度 j 的增加, 时窗增大, 而频窗减小. 桩顶速度响应曲线的多尺度小波变换显示出了各种缺陷的反射信号频谱不同的变化特征. 图 1 给出了包含一断裂的模型桩速度响应多尺度小波变换的结果. 该桩长 2.46 m, 截面为正方形, 20 cm × 20 cm, 断裂深度为截面边长的一半, 宽度为 2 cm. 由图 1 可以看出, 断裂处

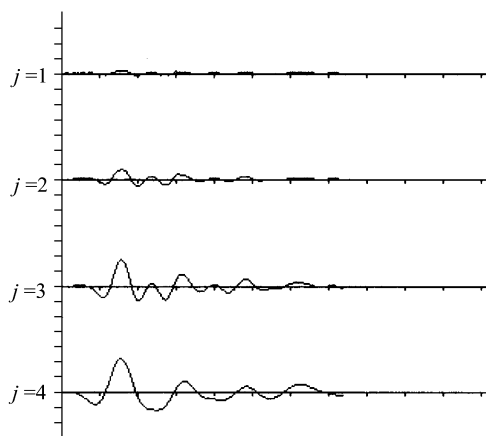


图 1 含一断裂的模型桩速度响应的多尺度小波变换

的反射脉冲在前 3 个尺度上都比较显著, 而在第 4 尺度上消失. 这反映出, 对这种深而窄的断裂, 入射脉冲的低频简谐成分大部分已绕射过去了. 对于大的缩颈, 情况就不一样了. 图 2 给出了含有一大缩颈的某一工程桩的小波变换曲线. 在第 3 和 4 尺度上显示出了较高的反射脉冲, 这意味着还有相当大一部分低频成分未绕射过去. 图 3 显示了一含有离析段的模型桩小波分析结果. 离析段位于桩中间, 长 30 cm. 图 3 显示, 在尺度 $j = 4$ 上, 反射脉冲消失, 在尺度 $j = 1, 2, 3$ 上反射脉冲峰值也很低, 在这种情况下, 部分中低频简谐成分都已绕射过离析段, 仅小部

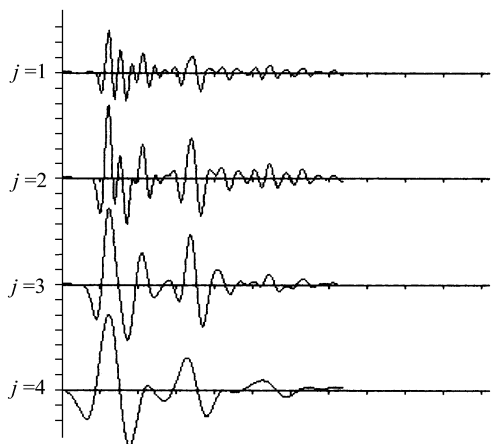


图 2 含一大缩颈的工程桩多尺度小波变换

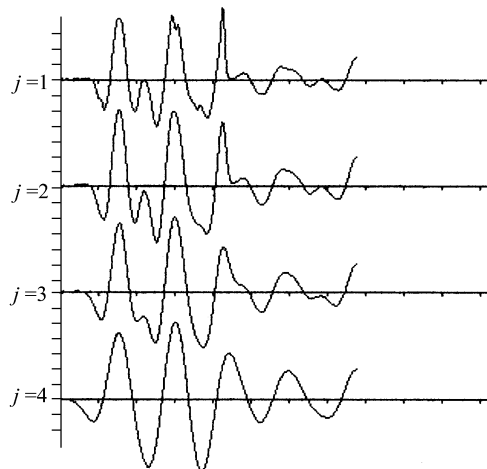


图 3 含混凝土离析的模型桩多尺度小波变换

分高频波反射. 这与前面的分析结果是吻合的.

为了描述反射脉冲在多尺度上的综合表现, 这里给出了表征反射信号特征的 3 个指标, FA , FB 和 FC . 它们能够突出各种缺陷反射脉冲的主要特征.

2.1 缺陷类型的识别

根据 3 种典型缺陷的反射脉冲多尺度小波变换, 分别计算了它们的特征指标 FA , FB 和 FC 值, 并列在表 1 中.

表 1 3 种典型缺陷反射脉冲的特征指标

缺陷类型	FA	FB	FC
深断裂	0.45	0.0	0.84
大缩颈	0.44	0.44	1.09
砼离析	0.04	0.0	0.68

表 1 中的特征指标突出地表现了各类缺陷的差异. 深断裂虽然 FA 值较高, 但 FB 却为零, 大缩颈的 FA 和 FB 值均较高, 砼离析的 FA 值很低, FB 为零. 各类缺陷的指标 FC 的差别也是显著的. 利用这 3 个特征指标, 并结合桩型等其他信息, 一般可以较准确地识别出桩缺陷的类型.

2.2 缺陷损坏程度的定量分析

打入桩中裂纹和断裂比较接近理想的波阻抗突变间断面, 这里波阻抗变化即表现为桩截面面积的变化. 断裂处截面面积的相对变化可以用一指标 β 来表示^[7]:

$$\beta = \frac{A_2}{A_1}, \quad (6)$$

其中, A_1 和 A_2 分别表示断裂处上截面和下截面的面积. 使用 WANG-PIP 法^[3]可以较精确地计算出 β 值. 利用 β 值可以对桩身中断裂处的损坏程度进行分类.

在我国的桩基工程中, 使用最多的是灌注桩. 其中出现较多的缺陷是缩颈. 缩颈不是突变的间断面, 截面是渐变的. 对于这类缺陷用波动方程分析是不合适的. 实际上缩颈已不能用波动方程(1)来精确描述了, 而应用下面的描述变截面杆的控制方程^[11]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (7)$$

其中, A 是桩截面的面积, 它是坐标 x 的函数. 这里须指出, 在变截面杆中传播的波将会发生弥散.

在工程界更关心的是哪些桩是完好的或基本完好的? 哪些桩有严重的损坏? 也就是需对桩的损坏程度进行分类. Rausche 等人^[8]提出将桩分成 4 类: A 类, 桩身完整; B 类, 桩身有严重缺陷; C 类, 桩身中可能存在缺陷; D 类, 测试记录不能支持任何结论. 在我国有些地方也将工程桩分成 4 类: 一类, 桩身完整; 二类, 桩身基本完整; 三类, 桩身存在明显缺陷, 需处理或进一步采用其他方法判断; 四类, 桩身存在严重缺陷或断桩. 这些分类的标准基本上是一致的. 然而, 目前都是凭经验判断. 这里的关键问题是三类与四类之间界限的定量划分. 为此, 对大量具有缩颈的工程桩, 计算出了反射信号的特征指标 FB 和 FC . 表 2 中列出了一些典型的结果.

表 2 缩颈的反射信号特征指标

桩号	FB	FC
2	0.44	1.09
14	0.41	1.06
1	0.40	1.04
15	0.34	0.82
6	0.32	0.61
17	0.31	0.53
4	0.28	0.51
3	0.24	0.44
9	0.23	0.45

表 2 中所列的均是工程灌注桩. 现场开挖后直接观察到, 前 3 根桩 2, 14 和 1 有严重缩颈, 桩 15 缩颈较小. 计算得到的这 4 根桩的特征指标 FB 和 FC , 随缩颈严重程度的加重, 都单调上升. 这表明给出的特征指标确实反映出了桩损坏的严重程度. 根据现有的实验分析结果, 建议把三类与四类桩的界限划定在 $FB_c = 0.38$ 和 $FC_c = 1.0$ 之上. 对于二类和三类桩之间的界限, 这里建议的临界值为 $FB_c = 0.2$ 和 $FC_c = 0.4$.

2.3 小裂纹的识别和缺陷位置的精确确定

小波变换相当于一个带通滤波器. 细小裂纹的反射脉冲属于高频信号, 因此, 用中心频率高的尺度上的小波变换能够将高频简谐成分突出出来. 图 4 显示了含一小裂纹的模型桩多尺度小波变换曲线. 在尺度 $j = 1$ 上明显地出现了小裂纹的反射脉冲, 而在其他 3 个高尺度上却看不出任何响应.

选择适当尺度上的小波变换, 可以清晰地显现出桩尖和缺陷处反射脉冲的峰值位置, 从而能够提高波速计算的精度和降低确定缺陷方位的误差.

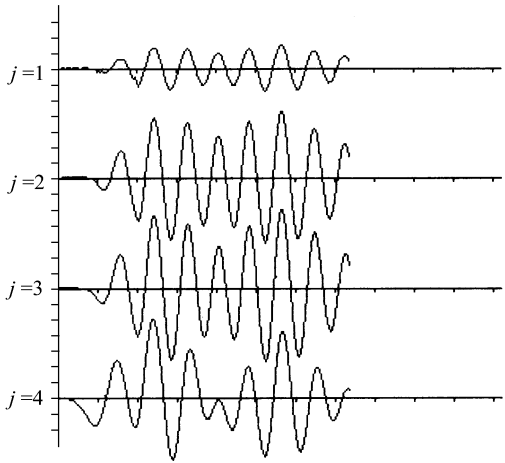


图 4 含有一小裂纹桩的多尺度小波变换

3 结论

(i) 用波绕射理论阐明了桩身中各种缺陷反射脉冲频谱发生变化的机理, 给出了小波分析可以应用到桩完整性检测上的理论根据. 模型桩和大量工程桩检测结果的小波分析证实了理论分析的正确性.

(ii) 提出了综合描述反射信号频谱变化的 3 个特征指标, 这些特征指标可用于划分桩损坏程度的等级和识别缺陷的类型. 同时, 还给出了它们的临界值.

(iii) 在桩中缺陷方位的精确确定和小裂纹的识别等方面都显示出了小波分析的独特功能.

参 考 文 献

- 1 王靖涛. 桩基应力波检测理论及工程应用. 北京: 地震出版社, 1999
- 2 Rausche F. Pile integrity testing and analysis. In: Proc of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Rotterdam, 1992. 613~617
- 3 Wang J T, Ding M Y. Quantitative analysis for pile integrity. In: Proc of the Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Orlando, 1996. 936~944
- 4 崔锦泰, 著. 小波分析导论. 程正兴, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
- 5 钟伟芳, 聂国华. 弹性波的散射理论. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997
- 6 黄明昌, 肖春喜, 王靖涛. 应力波在毛洞周围绕射时波长-洞径比效应. 岩土力学, 1984, 5(1): 47~56
- 7 Rausche F, Goble G G. Determination of pile damage by top measurement. Behavior of Deep Foundations. ASTM, STP670. Raymond L, ed. 1979. 500~506
- 8 Rausche F, Likins G E, Hussein M. Formalized procedure for quality assessment of cast-in-place shafts using sonic pulse echo methods. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D C, 1994. 30~38