

文章编号: 1672-7940(2009)01-0073-05

小波分析在旁孔透射波测桩法中的应用

吴宝杰¹, 杨桦¹, 邢保国²

(1. 浙江省建筑设计研究院, 杭州 310012;

2. 湖北中南勘察基础工程有限公司, 武汉 430081)

摘要:常规无损检测方法无法检测既有建筑物下基桩桩身长度,而旁孔透射波法凭借其优势,可以在不直接接触桩顶的情况下检测基桩桩身长度。但该方法的推广受到桩周土和震源的限制,从而影响异常判别。文中根据实测数据证明,小波分析的应用能够提高解释精度,使该方法的适用性更强,且基于 Matlab 的小波分析容易实现,编程简单。

关键词:小波分析;旁孔透射波法;基桩;初至时间

中图分类号: P631.5

文献标识码: A

收稿日期: 2008-11-24

Application of Wavelet Analysis in Piles Detection Based on Parallel Seismic Test

Wu Baojie¹, Yang Hua¹, Xing Baoguo²

(1. Zhejiang Academy of Building Research & Design, Hangzhou Zhejiang 310012, China;

2. South-central Geological Prospecting Bureau, Wuhan 430081, China)

Abstract: Conventional non-destructive testing methods can not detect the length of pile under existing building. Parallel seismic method, with its advantages, can detect the length of pile, not directly contact the top of the pile. However, the method of promotion is restricted by the soil around the pile and wave source, and that makes more difficult to identify abnormal. According to the paper, the measured data show that the application of wavelet analysis can improve the accuracy of interpretation and the method can enhance the applicability. The wavelet analysis based on matlab is easy to achieve and is simple to program.

Key words: wavelet analysis; parallel seismic test; pile; first-break time

1 引言

随着我国建筑业的蓬勃发展,桩基在建筑基础中的运用越来越广泛。既有建筑物的基桩由

于先期的缺陷或地表的下沉、地震、泥石流等等的破坏,对上层的建筑造成了一定的威胁^[1],在对既有建筑物进行安全性鉴定时,经常需要知道建筑物下基桩的实际长度或完整性,但由于此时上部建筑结构已经存在,直接接触桩的顶部几乎

基金项目:浙江省建设厅科研项目,既有建(构)筑物下基桩检测技术研究(编号:07004)资助。

作者简介:吴宝杰(1981-),男,福建人,工程师,毕业于浙江大学地球探测与信息技术专业,主要从事工程物探应用研究。

E-mail: wubaojie81@126.com

邢保国(1963-),男,工程师,湖北中南勘察基础工程有限公司项目经理,主要从事桩基础施工技术及管理工作。E-mail:

xzss63@sina.com

不可能,常规的基桩检测方法无能为力^[2,3]。因此研究一种适应性强、受限制条件少的既有建筑物下的基桩检测新技术,对客观准确地评定工程质量、解决工程建设中的矛盾纠纷以及完善既有建筑质量评定或危房安全鉴定指标体系等,有着较大的现实意义,也必将推动建筑基桩检测技术的进一步发展。

旁孔透射波法最先在法国得到应用,用来评估既有建筑物基础的深度。之后,Larry D. Olson 用此方法来检测既有桥梁下桥墩桩基础的深度^[4]。但受到桩周土复杂性和震源锤击能量无固定性的限制,此方法的解释精度较低。而小波分析能够对信号进行不同层次的分解,进而可观察信号在各个尺度的特征,提高解释精度。

2 旁孔透射波法

旁孔透射波法属于地震测井的一种方法^[5],亦称平行地震法(Parallel Seismic Test),利用地震波传播中的透射波^[6,7]。地震波可分为纵波、横波和面波,而旁孔透射波法测的是纵波。纵波 V_P 在介质中的传播速度为

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

式中, G 为拉梅模量; G 为剪切模量; ρ 为密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

旁孔透射波法对既有建筑物的基桩进行检测,不损坏基桩和上层既有建筑物,其方法原理如图 1。在被测试桩旁一定范围内预钻一平行于桩身的孔,在钻孔中设置一 PVC 管,管内充满清水,检波器放置在管中。测试时,在基桩顶部或与基桩相连的刚性结构(承台)激振产生地震波,并将检波器沿 PVC 管自管底以一定距离垂直上拉,检波器在管中各个位置均可接收到经由桩身或桩底以下土层传递的地震波,并由主机记录保存。

根据式(1)可知,纵波在桩的传播速度远远大于在桩周土,因此管中检波器首先接收到的是沿桩身向下传播的纵波。当检波器远离桩底时,接收到的纵波在土壤中传播的距离增大,必然加大初至时间的后延,并且地震波在土层中的衰减系数比在桩身传播时大,因此可通过对地震波波列初至的时间和振幅综合分析,判断桩身长度。

现场钻孔的布置如图 2,为了采集到最佳的

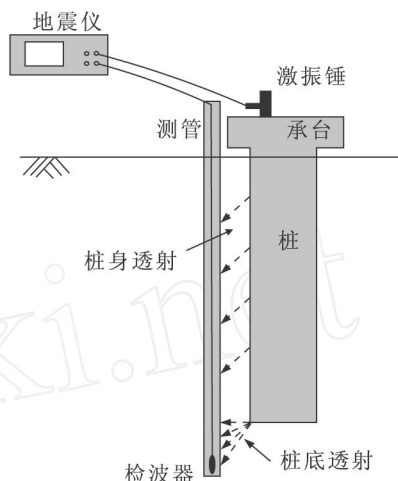


图 1 旁孔透射波法示意图

Fig. 1 Specification for parallel seismic test



图 2 现场钻孔布置

Fig. 2 Scene of drilling layout

数据最好满足如下条件: 钻孔必须与桩轴线平行,以保证孔与桩之间的距离始终一样; 钻孔要尽可能接近被测桩,距离被测桩一般是在 1.5m 范围以内。这是为了减少周围土壤的影响,特别是在非饱和土的情况; 钻孔深度至少要比被测桩预测的桩底深 1.5m。这是为了确保采集的数据满足深度的要求。如果钻孔的深度没有超过基桩底部一定深度,将很难判别桩长;

钻孔中应放入 PVC 套管,且管径(90 ~ 110mm)要能够放入地震检波器。不能使用钢套管,钢材的应力波传播速度比混凝土快,而所有的基础建筑材料,波速都高于 PVC 管。如果使用钢套管,地震波通过钢套管的速度比通过桩基础的快,将使检测结果难以解释; 测管应下端封闭、上端加盖、管内无异物;测管连接处应光滑过渡,管口应高出地面 100mm 以上,便于检测; PVC 管中充满清水,管与周围土体的空隙

用水泥砂浆充填或静置 7 天以上使周围土体充填空隙,以便检波器接收到地震波信号。

3 基于 Matlab 的小波分析

Matlab 是一种集数值分析、矩阵运算、信号处理和图像处理、显示于一体的科学计算软件,具有编写简单、编程效率高、易学易懂等优点,已被广泛地应用于各行各业^[8,9]。Matlab 为用户开发图形界面提供一个方便高效的集成环境,即:GUIDE(图形用户界面开发环境)。GUIDE 将用户设计好的图形界面保存在 *.fig 文件中(图 3),同时自动生成程序代码 *.m 文件。在界面上摆放完毕控件后,通过界面设计编辑器、属性检查器、对象浏览器、菜单编辑器等完成控件属性设置。然后,在 *.m 文件中进行编程。主要内容包括:创建 GUIM 文件;打开 GUIM 文件;在回调间共享数据;在初始化函数中添加代码;用对象浏览器识别回调。因此,控件摆放、属性设置、程序编写 3 部分组成一个完整的 GUI 设计。

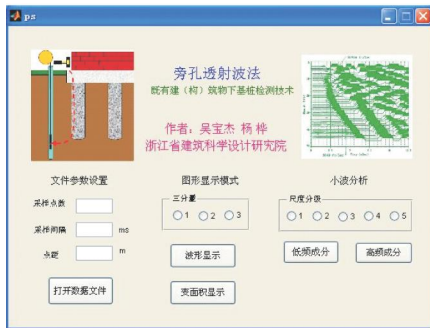


图 3 用户界面

Fig. 3 User's interface

小波分析是建立在泛函分析、Fourier 分析、样条分析及调和分析基础上的新的分析处理工具,在时域和频域同时具有良好的局部化特性,常被称为信号分析的“数学显微镜”。Matlab 的小波工具箱基本上囊括了目前比较成熟的小波分析方法^[10]。小波变换的含义是:把一称为基本小波的函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 后,再在不同尺度下与待分析信号 $f(t)$ 做内积:

$$WT_f(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad s > 0 \quad (2)$$

在实际应用中,为了方便计算机进行分析、处理,信号 $f(t)$ 都要离散化为离散系列,和

也必须离散化,成为离散小波变换,记为 DWT (Discrete Wavelet Transform)。离散小波变换的定义为:

$$WT_f(\tau, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{\tau, k}(t) dt \quad j = 0, 1, 2, \dots, k \quad Z \quad (3)$$

信号 s 在第 j 层的小波分解结构为 $[a_j, d_j, \dots, d_{1j}]$ 。比如,当 $j=3$ 时,分解结构树包含如图 4 所示的终端结点。

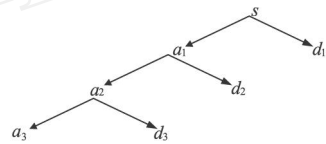


图 4 多层分解结构树

Fig. 4 Multi-layer decomposition for the structure trees

可以从 5 个方面来评价小波函数: 正交性。正交性有利于小波分解系数的精确重构。支撑性。紧支撑小波函数在数字信号的离散小波分解过程中可以提供系数有限的滤波器,非紧支撑小波必须截短,从而使分解信号的能量散失。对称性。在图像处理中可以有效地避免移相。消失矩。消失矩阶数越大,小波变换的滤噪声能力越强,信号的能量越集中。正则性。用来描述小波函数的光滑程度,正则性阶数越大,小波函数越光滑,其频域的能量越集中,信号分解的效果也越好。

Daubechies(dbN) 小波可用于检测信号的起跳点,也具有滤噪功能,它是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,一般简写成 dbN , N 是小波的阶数,其支撑域在 $0 \sim 2N - 1$ 范围内,消失矩为 N ^[11,12]。

为了与旁孔透射波法采集的信号相对应,模拟了图 5 的信号,此信号具有明显的起跳点(突

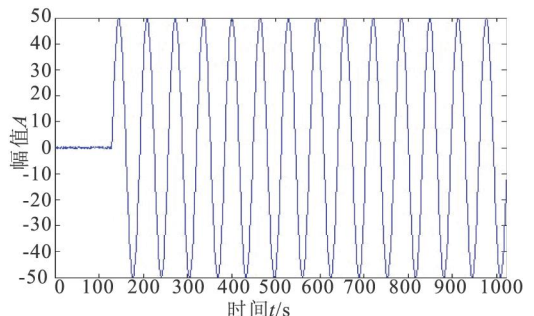


图 5 模拟信号

Fig. 5 Simulation signal

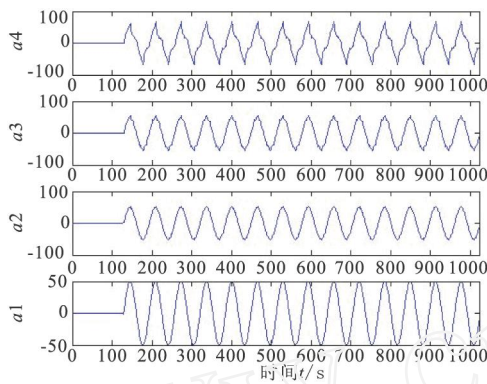


图 6 db2 小波分解低频成分

Fig. 6 Low - frequency of db2 wavelet decomposition

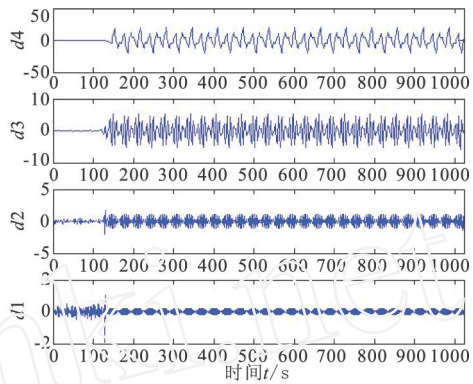


图 7 db2 小波分解高频成分

Fig. 7 High - frequency of db2 wavelet decomposition

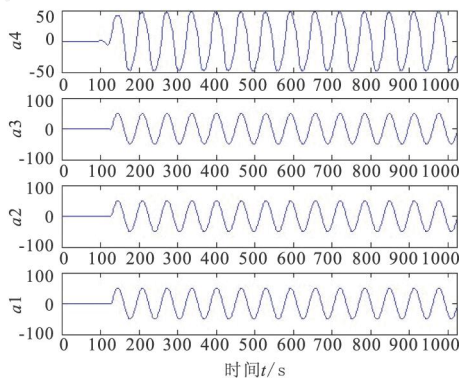


图 8 db4 小波分解低频成分

Fig. 8 Low - frequency of db4 wavelet decomposition

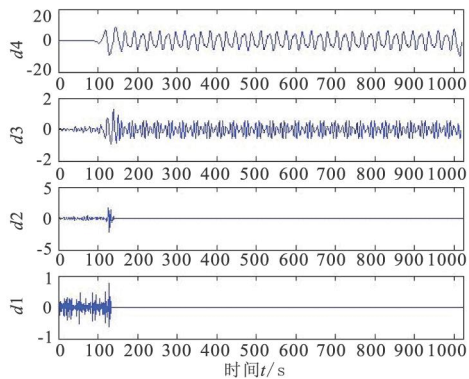


图 9 db4 小波分解高频成分

Fig. 9 High - frequency of db4 wavelet decomposition

变点),起跳点之前为背景随机噪音,起跳点之后为有效信号。图 6 为 db2 小波分解后的低频成分,图 7 为高频成分。图 6 低频信号中噪声已被滤除,但 a4 已失去了光滑性。图 7 高频信号中 d1、d2、d3 包含背景噪声和部分有效信息,信噪比低,而 d4 中信噪比则较高。图 8 为 db4 小波分解后的低频成分,图 9 为高频成分。图 8 低频信号中噪声已被滤除,且光滑性都较好。图 9 高频信号中 d1、d2 只包含背景噪声,d3 包含背景噪声和部分有效信息,而 d4 中噪声已被滤除。因此对突变信号的检测 db4 比 db2 效果好。

与测试深度之间的关系是一条折线,折点位置就是两种不同介质的分界面。对于基桩检测,当波在桩的传播速度远大于桩周土且桩孔距较小时,折点的位置就是桩底的位置。地震波在土壤比在桩身衰减快,对于同样的锤击能量,当检波器到达桩底以下,由于在土壤的传播距离增大,接收到的能量较为微弱,因此可根据幅值大小辅助判别。

4 测试数据分析

根据现场检测数据,读取各测点的初至时间、波幅,绘制深度 - 时间图。从深度 - 时间图上读取初至时间斜率拐点,或波幅大幅衰减的深度位置,即桩底位置,再根据搜集的工程相关资料,判定桩身长度。

旁孔透射波法检测基桩长度的评判准则:在时间 - 深度图中初至时间斜率的变化;桩底以下能量的大幅衰减。

宁波某楼房交付使用后地基发生不均匀沉降,导致部分墙体、梁、板等出现开裂损坏现象。为了确定地基不均匀沉降与施工是否具有因果关系,采用旁孔透射波法检测基桩的深度,看其是否进入持力层。

旁孔透射波法是测量透射波的初至时间与测试深度之间的关系和能量的衰减情况。初至时间

其中某基桩为 400 沉管灌注桩,桩身砼等级 C20。图 10 为旁孔透射波法采集到的原始数

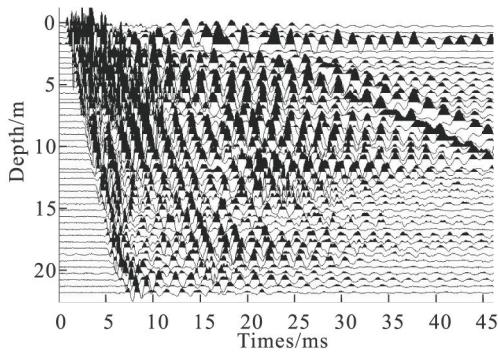


图 10 原始信号

Fig. 10 Original signal

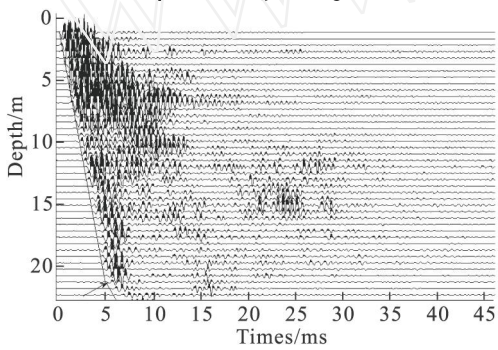


图 11 db4 小波分解第 3 层高频信号

Fig. 11 No. 3 layer high - frequency signal of db4 wavelet decomposition

据,从图中大致可看到初至时间在测试深度 20.0m 附近出现转折,但是振幅没有对应地出现衰减,且初至时间之前的信号含有背景噪音。

图 11 为原始信号通过 db4 小波分解后第 3 层的高频信号。从图中测试深度 19.5m 处可以清楚地看到初至时间的转折点,且在该转折点还出现振幅突然降低。由于锤击能量大小的不同,所以能量的衰减程度无法在原始信号中体现出来,但是通过小波分析后发现第 3 层的高频信号在 19.5m 处衰减开始增大。因此可判定测试深度 19.5m 处为桩底的位置,此处初至时间出现后延突增,且高频信号急剧衰减。再根据工程相关资料,可得出桩长为 19.0m。而测试深度 19.5m 处的桩底未进入持力层,这正是地基不均匀沉降的原因。

5 结 论

旁孔透射波法具有原理简单、结果直观等优点,该方法检测时无需直接接触桩顶,且不具破坏性,因此在既有建筑物基桩检测中具有广阔的应

用前景,是常规基桩检测方法所无法替代的。

旁孔透射波法检测基桩长度的评判标准分别为初至时间斜率和首波振幅大小的变化。初至时间斜率的差异性取决于地震波在桩周土和桩身的传播速度。如果桩周土的层速度变化较大,也会引起初至时间斜率的明显变化,因此在判别时应参考相关地质资料。如果桩端附近土体地震波传播速度与桩身接近,将难以识别桩端的具体深度。首波振幅大小为检波器所接收到信号能量大小,这主要由锤击能量和介质衰减决定,由于目前无法固定锤击能量,因此对介质衰减分析有影响。但是通过小波分析,可以提高信噪比和分辨率,对初至时间斜率转折点的识别有一定的帮助;可以根据各个频率段幅值大小,分析介质的衰减情况,从而提高解释精度。

参考文献:

- [1] Liao Shutao, Tong Jianhua, Chen Chenghao, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Parallel Seismic Test for Piles [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 2279 ~ 2298.
- [2] 陈凡. 基桩质量检测技术[M]. 北京:中国建筑业出版社, 2003.
- [3] JGJ 106 - 2003, 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑业出版社, 2003.
- [4] Olson L D, Liu M, Aouad M F. Borehole NDT Techniques for Unknown Subsurface Bridge Foundation Testing[J]. *SPIE*, 1996, 2946(10): 10 ~ 16.
- [5] 丁华,蔡香平. 地球物理测井技术在基桩检测中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2007, 4(5): 400 ~ 404.
- [6] 汤建新,黄大治. 旁孔透射波法检测水泥搅拌桩质量的研究[J]. *中国市政工程*, 2006, 6(12): 83 ~ 85.
- [7] 黄大治,陈龙珠. 旁孔透射波法检测水泥搅拌桩的三维有限元分析[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(6): 960 ~ 964.
- [8] 苏金明,王永利. Matlab 7. 0 实用指南[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [9] 李南南,吴清,曹辉林. Matlab 7 简明教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [10] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 Matlab 7 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [11] 杨晓楠,唐和生,陈镨,等. 钢结构损伤识别中 Db 族小波函数选择[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 1568 ~ 1572.
- [12] 柳建新,韩世礼,马捷. 小波分析在地震资料去噪中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 541 ~ 545.