

低应变反射波法波形曲线的分析

丁科, 唐小弟

(中南林学院建筑工程学院, 湖南长沙 410004)

[摘要] 对桩身的各种缺陷所引起的波的变化特征进行了分析, 比较了理论曲线与实测曲线的差异, 并对基桩低应变完整性检测中要注意的事项进行分析和总结。同时指出, 频域分析是时域分析的一种必要的、有益的补充, 能够更好地指导现场测试, 帮助选择更好的安装方法。

[关键词] 建筑工程; 低应变; 反射波法; 基桩; 完整性

[中图分类号] P631.4⁺4; TU473.1

[文献标识码] A

Analysis of the Curve of Low-strain Reflected Wave Method

DING Ke, TANG Xiao-di

(College of Civil Construction Engineering,

Central South Forestry University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract In this paper, the author analyzes the various characters of wave induced by all kinds of defects of pile. The differences between theoretical curve and realistic one are compared. The key notices are analyzed and generalized in detecting a pile's perfection by low-strain reflected wave method. It is pointed out that frequency-domain analysis is a necessary and beneficial complement to time-domain analysis. Frequency-domain analysis can contribute to direct field measurements.

Key words construction engineering; low-strain; reflected wave method; pile; perfection

桩的动测技术在工程检测中应用广泛。根据作用在桩顶上的能量是否使桩土之间产生塑性位移, 可以分为高应变和低应变两种检测方法^[1]。从目前的现状来看, 以低应变反射波法检测桩身完整性最为有效, 它检测速度快, 准确性高。在检测基桩承载力方面, 低应变方法虽然可行, 但误差较大, 而高应变方法相对来说误差较小, 但检测费用较高。目前, 在检测仪器设备方面, 已取得了很大进展, 基本上实现了超集成化、轻便、操作简单、性能基本稳定。我国的仪器设备性能已超过了国外同类产品, 而在检测方法和数据处理分析方法等研究方面, 这几年几乎没有取得进展, 在检测中主要还是凭经验判别桩身完整性。笔者多年从事反射波法完整性检测工作, 本文中, 对低应变反射波法检测桩身完整性的理论和实践进行探讨。

1 反射波法检测的基本原理

基桩完整性反射波法测试技术是以一维波动理论为基础的^[2,3]。假定基桩作为均匀细长的线弹性杆件, 当桩顶受到纵向冲击力作用时, 激起桩纵向应力波沿桩身传播。根据波动方程的解, 桩的应力波传播规律为:

$$U_R = RU_1, \quad (1)$$

$$U_T = TU_1. \quad (2)$$

* [收稿日期] 2003-09-26

[基金项目] 中南林学院青年基金项目(0204).

[作者简介] 丁科(1971-), 男, 湖南桃江人, 工学博士, 主要从事弹性波理论的研究、数据处理和实用技术的开发以及建筑工程质量的无损检测技术研究。

式(1)和式(2)中, U_i 、 U_R 和 U_T 分别表示入射波、反射波和透射波, R 和 T 分别表示反射系数和透射系数。当桩身波阻抗有明显变化时, 就会有反射波回到桩顶引起基波振幅和相位发生变化, 由记录分析仪所接收到的波形数据, 就可以判断桩身的完整性, 其检测如图1所示。

2 桩身不同缺陷理论与实测波形分析

根据反射波法的原理, 当桩身波阻抗 (ρcA) 发生变化时, 会产生反射波和透射波, 其中反射波传回桩顶, 被传感器接收。根据接收到的波形信号, 可以分析桩身的完整性。现场检测时, 常见的桩身缺陷类型主要有: 扩径、缩径、断裂、离析、夹泥、胶结不良以及桩底浮渣较多等。

2.1 完整桩的波形曲线

当桩身完整时, 仅存在唯一的反射界面, 即桩底反射面, 其理论曲线如图2所示。在条件较好的情况下, 可以得到明显的桩底反射波(如图3所示), 该曲线是用高阻尼传感器通过橡皮泥粘结, 用力棒激振在某工地工程桩上测得的。此时, 可以利用波速 c 、反射时间 t 和桩长 L 三者之间的关系(即 $L = ct/2$) 来估算桩长或波速。进而根据波速与砼强度的关系来评估桩身混凝土的强度^[4]。

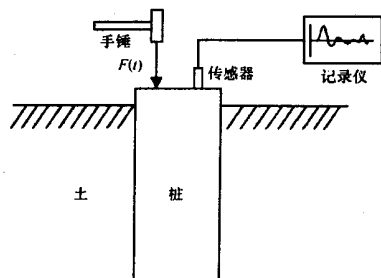


图1 低应变反射波法检测桩身完整性示意图

Fig 1 The sketch map of detecting integrity of pile by low-strain reflected wave method

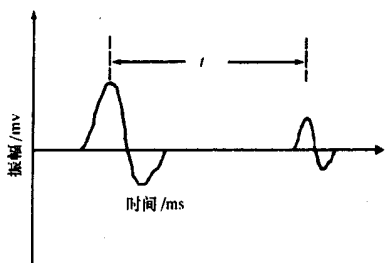


图2 完整桩理论波形曲线

Fig 2 The theoretical curve of perfect pile

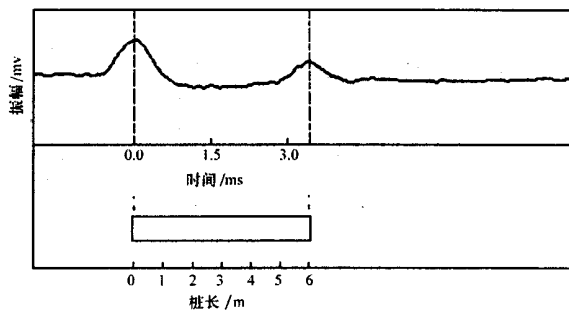


图3 完整桩实测波形曲线

Fig 3 The detected curve of perfect pile

2.2 扩径桩的波形曲线

在桩身扩径处有 $\rho_1 = \rho_2$, $c_1 = c_2$, $A_1 < A_2$, 因此其反射系数 $R < 0$, 故扩径处反射波与入射波反相(如图4所示)。根据平均纵波波速和反射波走时差 t , 可以估算扩径的位置 L , 即有 $L = ct/2$ 。对于实际工程桩, 由于受扩径处反射波的影响, 桩底反射往往不是很明显(如图5所示)。

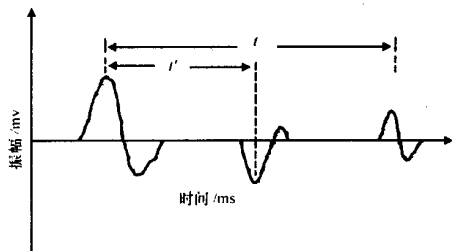


图4 扩径桩理论波形曲线

Fig 4 The theoretical curve of diameter-expanding pile

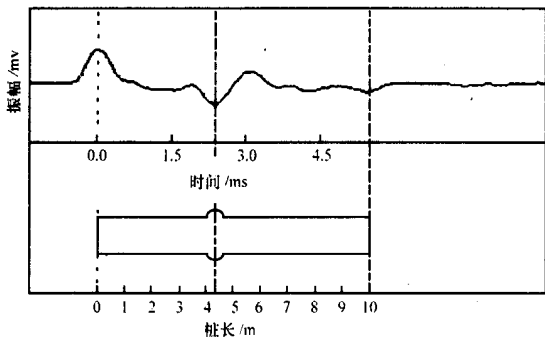


图5 扩径桩实测波形曲线

Fig 5 The detected curve of diameter-expanding pile

2.3 缩径桩的波形曲线

在桩身缩径处有 $\rho_1 = \rho_2$, $c_1 = c_2$, $A_1 > A_2$, 因此其反射系数 $R < 0$, 故缩径处反射波与入射波同相(如图6所示)。

示). 同样根据平均纵波波速 c 和反射波走时差 t , 可以估算缩径的位置 L , 即有 $L = ct/2$ 实际的工程桩的实测波形曲线如图 7 所示

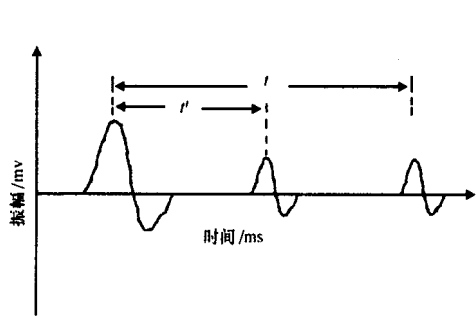


图 6 缩径桩理论波形曲线

Fig 6 The theoretical curve of diameter-shrinking pile

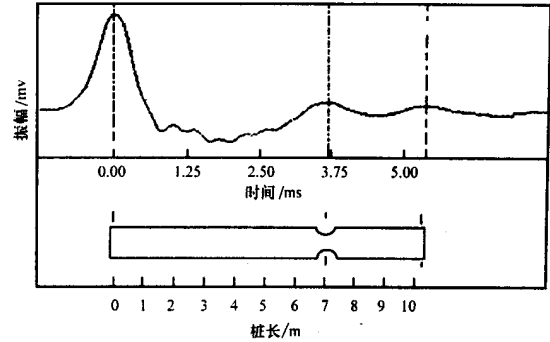


图 7 缩径桩实测波形曲线

Fig 7 The detected curve of diameter-shrinking pile

2.4 断裂桩的波形曲线

在桩身断裂处, 其反射系数 $R = 1$, 即在桩身断裂处发生全反射, 这时往往可以见到多次反射波, 桩底反射信号很难见到 图 8 所示为某工地工程桩, 该桩在 2.7 m 处断裂, 在图 8 中可以见到多次反射

2.5 离析、胶结不良桩的波形曲线

在桩身离析和胶结不良处有 $\rho_1 = \rho_2, c_1 = c_2, A_1 = A_2$, 其反射系数 $R > 0$, 故反射波与入射波理论上应该同相, 但由于波速发生改变, 使得波的频率也发生变化, 其高频成分衰减较快, 使得波形变得平坦 (如图 9 所示). 至于是由离析还是胶结不良引起的, 则要结合施工时的情况和地质报告等辅助资料来加以区分.

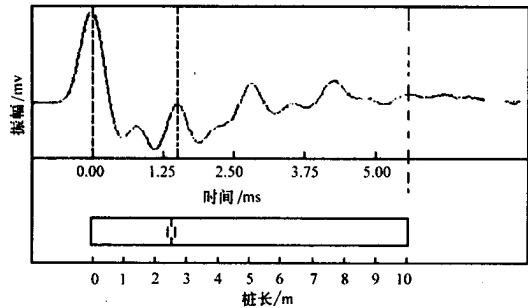


图 8 断裂桩实测波形曲线

Fig 8 The detected curve of ruptured pile

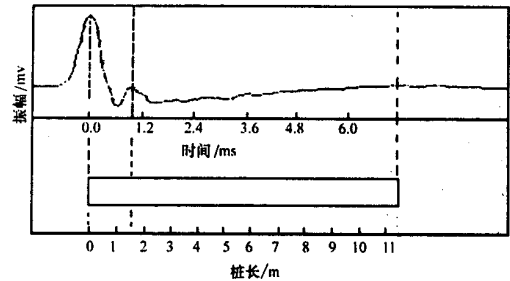


图 9 离析桩实测波形曲线

Fig 9 The detected curve of eroded pile

2.6 嵌岩桩的波形曲线

对嵌岩桩, 如果桩底没有浮渣或浮渣比较少, 桩和基岩接触良好, 则桩底反射信号不明显, 但经过指数放大等技术处理, 有时可以见到一反相反射信号. 如果桩底浮渣较多, 有时可以看到一同相反射波出现, 由于浮渣对波的吸收较强, 有时也很难见到反射信号 (如图 10 所示).

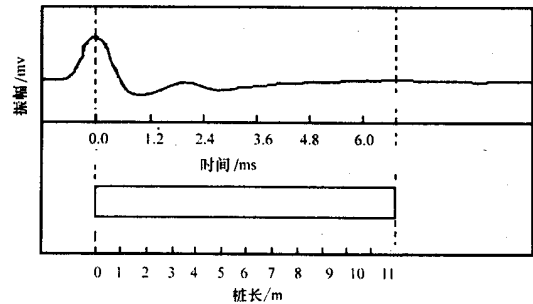


图 10 嵌岩桩实测波形曲线

Fig 10 The detected curve of embedded-rock pile

3 数据分析方法

动态测试与静态测试最大的区别在于动态测试包含了对多种频率成分动态信号记录问题 在分析桩身完整性时, 通常只利用了时域波形, 通过对时域曲线的分析来判断桩身的完整性, 而没有利用所测曲线的频谱特性, 这实际上是浪费了一半的资源 事实上, 频谱分析

是研究动态测试系统频响问题的主要手段。研究波形曲线的频谱特性,可以更好地指导现场测试和对桩身完整性作出辅助性分析。如图11所示为某工地的一根工程桩,从时域曲线可以看出,在1.7 ms处有一微小的反射波,可能此处存在缺陷,但由其频谱曲线可以看到,各共振峰间距基本相等,该桩应为完整桩。图12所示为同一工地的另一根缩径桩,由其频谱曲线可以看到,各共振峰间距不相等。同时,在选择传感器的安装方法时,利用频谱分析各自的安装谐振频率,然后选择谐振频率最高的安装方法是很有必要的,因为它将充分延拓系统的测试范围。大家都知道,尼龙锤测试效果比铁锤好,长大桩时用力棒检测效果最好,时域里虽然可以比较激振效果的好坏,但对于好坏的解释与理解却常常是在频谱分析的基础上使用频率概念进行的。

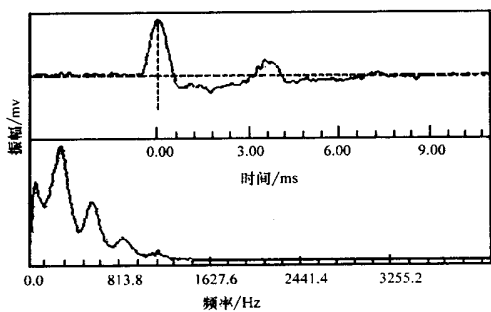


图11 完整桩频谱曲线

Fig 11 The frequency curve of perfect pile

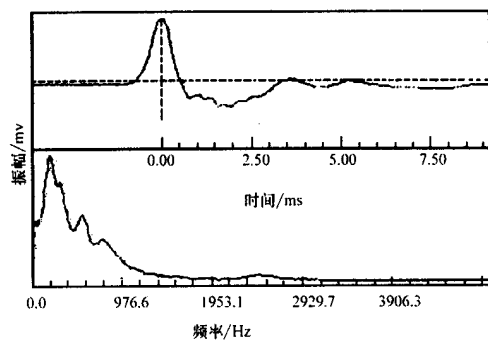


图12 缩径桩频谱曲线

Fig 12 The frequency curve of diameter-shrinking pile

很多情况下,由于各种干扰成分的存在,时域里如不进行滤波处理则难以进行分析,这时滤波成为一种重要的手段,但有时候,滤波容易导致波形畸变以至影响分析判断;相反,在频域里,各种频率成分一目了然,只要对所用测试系统进行认真分析,极易排除干扰成分。当时域信号一致性较差或干扰太严重时,利用频域分析比较各信号的共同点(共振峰),分析这些共振峰所对应的缺陷,然后再反过来在时域里进行验证,这是相当好的一个办法,有时候时域里难于发现桩底反射,频域里反而可以找到,时域里难于检测的浅部缺陷,频域里也较易发现。当然,频域分析只能成为时域分析的一个必不可少的补充,因为频域分析本身尚有许多不足之处,如缺陷性质难于确定,缺陷位置计算偏差较大以及对于同一缺陷引起的相邻共振峰难于识别等。这些影响了频域分析的效果,也是频域分析没有广泛应用起来的主要原因。不过,频域分析是时域分析的一种有效补充,这一点是不容置疑的^[5]。

4 检测中的注意事项

4.1 激振问题

在基桩检测时,激起高质量的脉冲波是提高检测质量的关键,理论分析和多年的实践经验表明,激振技术是反射波法完整性检测的重要环节。在检测时,通常使用瞬态激振,最简单的方法是用手锤或力棒激振,其机理建立在碰撞理论上。当桩身较长或桩身连续性差时,用铁质或木质手锤激发很难识别桩底反射信号,其原因是铁质或木质手锤激发的信号频率较高,在桩身中传播时衰减较快,此时可以采用不同质量不同材质组成的力棒激振较易获得桩底反射信号。在检测时应注意,提高激振脉冲波的频率,可以提高分辨率,但容易衰减的高频波对长桩不易获得桩底反射,因此只能用频率较低的脉冲波来获取桩底反射,再用高频波来检测桩身上部的缺陷。

由实测的波形记录来看^[4],激振脉冲波的频率大约在300~1500 Hz左右。不同的桩长和桩型,其激振的频率不一样,一般60 m左右的摩擦桩或30 m左右的摩擦端承桩,脉冲波的主频在300~500 Hz左右;10~20 m的短桩,脉冲波的主频在500~1000 Hz左右;小于10 m的短桩,脉冲波主频可高至1000~1500 Hz。激振时另外一个要注意的问题是激振的能量要适中,并不是能量越大越好。对于硬地层,由于桩身内脉冲波能量扩散较多,其所需的激振能量应稍微大一些。此外,激振时要干脆、利索,不要拖泥带水,最好是由有经验的人专门激振,以使每次的激振波形基本一致,有利于对比分析。

4.2 传感器与粘结剂的选择

传感器是基桩检测的“眼睛”,它的频响特性、阻尼大小、灵敏度和动态范围等对实测波形的影响非常大。反射波法对传感器有特殊的要求,由于传感器处于激振点附近,很强的激振信号要不畸变的接收下来,同时又要将传播几十米长距离后反射回来的波加以接收转换成电信号,因此传感器的量程范围和动态范围要足够宽,且要有较高的灵敏度。在强烈的激振下,其余振要短,这就要求它有良好的阻尼特性。在通常情况下,我们可以使用不同特性的传感器多测几组曲线,通过对比分析进一步提高分析精度。

在传感器性能较好的情况下,必须选择好粘结剂,使传感器与基桩得到较好的耦合。目前常用的粘结剂有石膏粉、橡皮泥、蛇皮膏、黄油等,此外,有些检测人员还使用咀嚼后的口香糖作为粘结剂。在这些粘结剂中,石膏粉粘结的耦合频率较高,而后几种的耦合频率较低。应该注意的是,当桩头较湿时,采用橡皮泥和蛇皮膏作为粘结剂其粘结的效果不是很好,此时最好用石膏粉。

4.3 桩头的处理

灌注桩的桩头往往有一层浮浆,特别是人工挖孔灌注桩,由于桩头一般低于地面,成桩后经沉淀作用,会使桩身上部出现一层较厚的浮浆,这使得在用小锤激振时能量不够集中,发散较快,激振的脉冲波频较低,影响检测效果,因此在检测时必须将浮浆打掉,同时保持桩头平整。

此外,预制桩在贯入过程中桩头可能产生破损,灌注桩在破除浮浆时也可使桩头产生破碎,这将使弹性波能量快速衰减,严重时使激发的脉冲波不规则,严重影响检测效果,甚至造成误判现象。因此,我们在检测时要注意桩头情况。

4.4 辅助资料的收集

在进行桩基检测时应该注意辅助资料的收集,结合辅助资料来分析桩身的缺陷类型。这些辅助资料包括岩土工程地质勘察报告、灌注桩的成孔工艺、成桩机具和工艺以及桩基施工记录等。根据这些辅助资料,可以分析可能出现哪些缺陷,甚至缺陷出现的部位。例如,对于人工挖孔灌注桩,不可能出现缩径,而桩底浮渣可能是这类桩的主要缺陷;对于振动沉管灌注桩,必须注意桩身上部的缺陷,这类桩极易出现缩径或断桩现象。在软地层与硬地层分界面处,可能会形成反射波等。如果传感器靠近钢筋安装,则钢筋会对检测波形产生影响。这些都是在进行桩基检测时必须注意的问题。

[参 考 文 献]

- [1] 地质矿产部勘察技术司. 中华人民共和国行业标准 基桩低应变动测规程(JGJ/T 93-95)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 徐攸在, 刘满兴. 桩的动测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [3] 郭 平. 敲击法测桩的波动原理[J]. 湖南大学学报, 1992, 19(4): 82-87.
- [4] 潘景龙. 混凝土结构性能评定和探测[M]. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1993.
- [5] 王雪峰, 吴世明. 基桩动测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[本文编辑: 邱德勇]