维普资讯 http://www.cqvip.com

第33卷 第5期
1997年9月
地质与勘探
GEOLOGY AND PROSPECTING
Vol.33 No.5
September, 1997

55-59 TU473.16

反射波法检测桩身质量的理论要点与实际应用

贺占海
(中国有色金属工业总公司华北地质勘查局·天津·300181)

主要探讨了反射波法的基本理论要点、信号采集处理过程中的有关动态测试技术，桩身质量判别的应用分析方法以及现场检测时应注意的某些问题。

关键词 反射波法，波阻抗，频率混叠 频率泄漏，桩基，桩身质量

自1867年圣·维南(St·Venant)提出波动方程，解决了自由支撑的细长弹性杆件一端受锤击后应力波的传播规律，到本世纪60年代初史密斯(Smich)首次提出桩系统模型，使桩的动测理论分析有了比较接近于实际的分析方法，之后桩基动测技术得到了不断的发展和完善。在我国20多年的应用研究中，伴随着大量高层建筑、厂房、桥梁、港口码头等混凝土桩基础的采用，桩身质量无损检测技术受到了越来越广泛的重视。实践表明，在众多的桩质检测方法中，反射波法通过测定桩头动力响应与沿桩身传播波的反射信号来确定桩身质量，它具有比较完善的理论基础和先进的诊断技术，能够比较准确地反映应力波在桩体中的传播规律，有效地诊断桩身局部缺陷，因而得到了普遍应用。

1 基本理论要点

根据波动理论，桩近似为一维弹性杆件，在顶端瞬时激振力作用下，产生微小的弹性变形，以压缩波形式沿桩身传播。由于桩底残缺陷部位存在波阻抗差异，应力波将发生反射，反射波回传至桩顶，与桩顶原有振动波形形成叠加。在波阻抗差异界面处(如图1)，由于界面两侧总作用力相等和速度相等，于是有：

$$\begin{cases} A_1(\sigma_I + \sigma_R) = A_2\sigma_T \\ V_I - V_R = V_T \end{cases}$$

由波阵面处动量守恒条件

$$\frac{\sigma_I}{(\rho c)_1} - \frac{\sigma_R}{(\rho c)_1} = \frac{\sigma_T}{(\rho c)_2}$$

联立求解可得

$$V_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} V_I = \alpha V_I \qquad (1)$$

$$V_T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} V_I = (1 + \alpha) V_I \qquad (2)$$

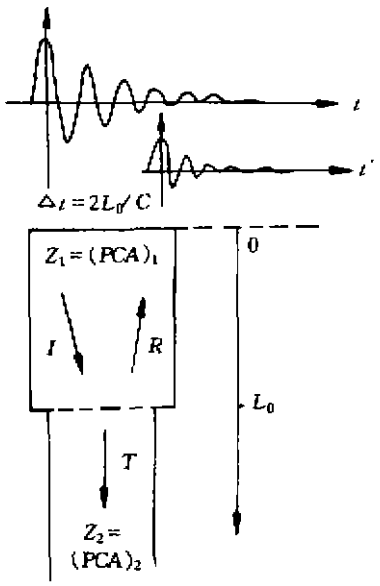

图1 应力波在缺陷处的反射与透射

式中：$Z = PCA$ 称为广义波阻抗，P、C、A

本文1996年7月收到，1997年4月改回，王梅编辑。

维普资讯 http://www.cqvip.com

分别为桩身材料密度、应力波传播速度和桩身横截面积，桩身质量缺陷通常表现为材料密度（或强度）与横截面积的变化；$\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$ 称为反射系数，$-1 < \alpha < 1$，下标 I、R、T 分别表示入射波、反射波和透射波。由(1)、(2)两式可知：

(1)透射波在传播过程中，始终不改变方向或符号，与初始入射波同相。

(2)波阻抗差异界面处产生的反射波与入射波的关系由 α 决定：当波从阻抗大的介质进入阻抗小的介质时，$Z_1 > Z_2$，$\alpha > 0$，反射波与入射波同相；当波从阻抗小的介质进入阻抗大的介质时，$Z_1 < Z_2$，$\alpha < 0$，反射波与初始入射波相位相反。

(3)界面两侧材料波阻抗差异的大小(即缺陷程度)决定了反射响应信号的强弱。

当缺陷较严重，$|\alpha|$ 值较大时，应力波会在缺陷部位发生多次反射。由(1)式可有：

$$V_R^1 = \alpha V_I$$

$$V_R^2 = \alpha^2 V_I$$

$$V_R^3 = \alpha^3 V_I$$

……

由此得到：

(1)当缺陷部位的波阻抗是相对减小时，$Z_2 > Z_1$，$\alpha < 0$，奇次反射的相位与初始入射波相反，而偶次反射却与初始入射波相同。

(2)多次反射响应的时间差均相等 $\Delta t = \frac{2L_0}{C}$（$L_0$ 为缺陷深度）。

2 动态测试技术

动态测试技术表现在，将一个微弱的、幅值连续变化的桩顶振动响应真实地完整地记录下来，使其能够在计算机中显示或存贮，能够进行一系列的数据分析处理，并且有利于桩身质量情况的分析判断。这首先需要将桩顶振动量转化成与加速度或速度成一定比例的电量(由加速度或速度传感器实现)，再经电荷放大器放大增强，高低通滤波器滤除分析频带外的噪声和无用的振荡信号，然后进行采样保持、模数转换(将电压模拟量转化成数字量)等处理，最终得以在计算机中显示、存贮或进行波形分析判断。在这一整套信号采集处理过程中通常存在一些值得注意的问题。

2.1 频率混叠

动态测试中首先需要将连续变化的桩顶振动信号转变成时间域离散的信号，它通过周期性脉冲序列的调制来实现(即采样)，脉冲周期即为采样间隔 t_0。实际采样时，为了保证信号在时域离散化后不失真，能够准确完整地反映原始信号特征，要求采样间隔 t_0 或采样频率 f_0（$f_0 = 1/t_0$）的选取必须适当。

假设原始连续信号最大频率为 f_m，对原信号和采样信号分别作谱分析，可以看到采样信号频谱中包含了原信号及多个经过平移的原信号频谱，平移量等于采样频率 f_0 及其各次倍频 nf_0（如图 2）。从图中可以看出，当 $f_0 \geqslant 2f_m$ 时，采样信号频谱中平移谱与原信号谱未重叠，在频率域 $[0, f_m]$ 内，采样信号频谱与原信号频谱完全一致，信号无失真。当 $f_0 < 2f_m$ 时，采样信号频谱中平移谱与原信号谱重叠，在频率域 $[0, f_m]$ 内，采样信号频谱与原信号频谱不同，这种现象称为频率混叠。频率混叠使信号失真造成偏度误差。

由此，为保证连续信号离散化后无失真，f_0 与 f_m 必须满足：$f_0 \geqslant 2f_m$。在实际测试中，需要首先确定测试信号的最大频率 f_m。然后通过抗混滤波器对测试信号进行低通滤波，限制信号带宽，再确定采样频率。对于反射波法，一般桩顶振动响应的有效频率上限在 5 kHz～7 kHz，采样频率可选择 20 kHz～50 kHz。

2.2 频率泄漏

对于连续变化的非周期性响应信号

维普资讯 http://www.cqvip.com

$\bar{V}(t)$，经有限长时间 T 采样截断后得到截断信号 $V(t)$，当对 $V(t)$ 进行谱分析时，频

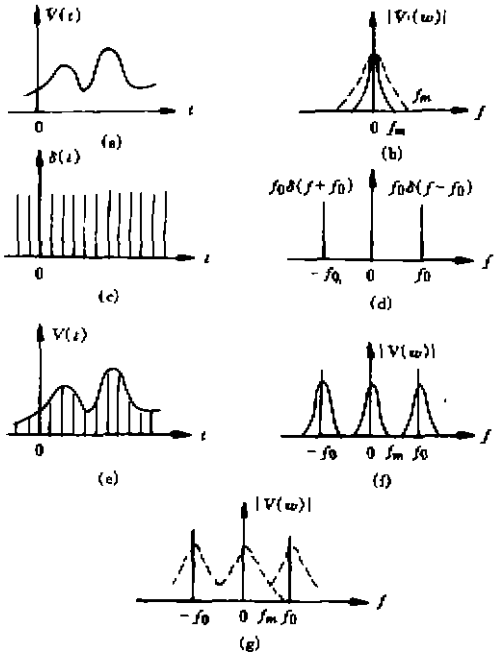

图2　频率混叠示意图

(a)连续信号；(b)连续信号频谱；(c)梳状信号(脉冲序列)；(d)梳状信号频谱；(e)采样信号；(f)采样信号频谱($f_0 \geqslant 2f_m$)；(g)采样信号频谱($f_0 < 2f_m$)

谱图中在主频瓣两侧出现了许多旁瓣，也就是说，原来集中在主频处的能量经有限长时间 T 采样截断后，部分泄漏到了旁瓣，这种现象称为频率泄漏(图3)。

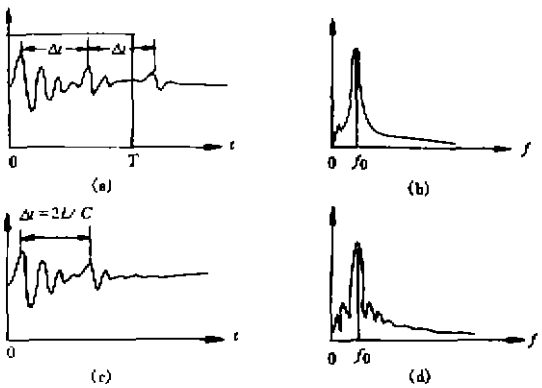

图3　频率泄漏示意图

(a)连续信号(非周期性)；(b)连续信号频谱；(c)采样截断信号；(d)截断信号频谱

一般情况下，频率泄漏是无法避免的，只有尽量增加采样长度，才可一定程度上抑制泄漏，但采样过长也只会加大工作量，延长计算时间。目前，常采用特殊的时域加窗函数(如汉宁窗或海明窗等)来抑制泄漏，但是加窗处理后将导致主瓣加宽，频率分辨率降低。此外还有一种用于频谱分析的最大熵法MEM，较快速傅立叶变换FFT更具优点，可较大程度上避免出现上述缺陷(有关MEM可参考有关资料)。

通常桩顶响应信号经动态测试系统的滤波处理后，在保证其真实性和完整性的前提下，应便于分析判断，无杂波和无用振荡信号的影响，(图4)为完整桩和缺陷桩的标准曲线图。

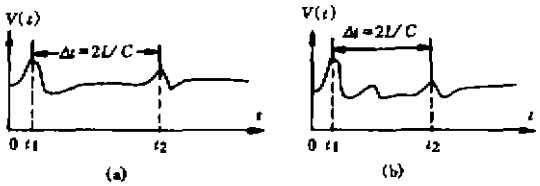

图4　完整桩和缺陷桩标准曲线图

(a)完整桩；(b)缺陷桩

3　应用分析方法

在实际工程中，由于现场地质条件和其他环境条件的不同以及桩身质量情况的复杂性，测试波形十分复杂，单从基本理论上还很难作出明确具体的判断，通常需要借助其他一些辅助分析方法。

3.1　谱分析

简单地说，谱分析就是对振动响应信号进行频率域的分析，找出其中哪些频域成份的波占主导地位，据此来判断桩身质量情况。根据频率域的分析方法不同，谱分析可以有振幅谱或富氏谱、功率谱、相位谱等。

由于一个振动响应波形包含着多种不同的频率成份，其中以桩身振动基本频率和缺陷部位的波动频率为主，在频谱图中形成峰值，而不同的质量情况常对应于不同的频谱曲线特征，因此，在没有频率混叠和杂波干

维普资讯 http://www.cqvip.com

扰、频率泄漏比较轻微的情况下，通过研究振幅谱或功率谱曲线特征，可在一定程度上判断桩身质量情况。

目前，各种反射波法检测仪器的分析软件中，一般都含有谱分析一项，在判断桩身质量时，对时域曲线和频域曲线进行对照分析，常常可得到比较准确的结论。

3.2 参考波速了解桩身混凝土质量

根据应力波传播理论，波在介质中传播的速度依赖于介质的物性参数及密实度，所以通过波速值可大致了解桩身混凝土质量情况。目前，依照"第三届应力波理论在桩基的应用"国际会议建议的标准，将桩身混凝土强度对应波速划分为五个等级（表 1）

表 1 桩身混凝土强度对应波速等级划分表

波速 V_p (m/s)	>4120	3300～4120	2750～3300	1920～2750	<1920
砼强度等级	$>C_{25}$	C_{20}～C_{25}	C_{15}～C_{20}	C_{10}～C_{15}	$<C_{10}$

以上对应关系并非固定标准，应具体情况具体分析，因为我们在实际工程中发现，波速还与桩型、桩的长短等因素有关。通过波速了解混凝土质量时，应在同一工程相同条件下进行比较。

3.3 从施工情况判断桩身质量问题

我们知道，一般桩身缺陷的主要来源多为不正当的施工操作或受现场一些复杂客观条件的影响，如灌注桩在混凝土灌注过程中出现停电或停水超过混凝土初凝时间，易出现断桩或胶结不良现象。对于沉管灌注桩，由于其特殊的施工工艺，通常在钢筋笼底部附近易出现离析或缩径，而钻孔灌注桩施工时，投料管在混凝土中的埋深十分重要，如埋深少于 1 m～2 m，则易出现夹泥（砂）、离析或断桩等缺陷。对于预制桩，接桩部位为相对薄弱环节，在夯击时常易出现裂缝或破损。由此，在判断桩身质量问题时，了解不同类型桩的施工工艺，认真分析现场原始施工记录，对于分析结果的准确性十分重要。

3.4 从场地土质条件分析桩身质量问题

不管何种类型的桩，在施工时都离不开特定的土质条件，其对桩身质量的影响不容忽视。通常，处于地基土层中下部的粘性土，其侧压力较大，施工中容易在该层桩身部位造成缩颈；而对于较松散的砂层或粉土，该段桩身部位则易产生扩颈或夹砂夹泥等现象。在滨海软土地区，由于粘性土渗透性差，地下水水位高，桩基施工时常产生地面隆起，如果布桩较密，施工顺序又安排不当，则土层侧向挤压和孔隙水压力的作用往往容易造成桩身断裂或错位。假如在开挖时场地有一面或一面以上凌空，则断裂、错位加剧，个别桩顶部移位甚至能超过 2 m～3 m。另外，在上硬下软的土层交界处，由于摩擦力的差异和超孔隙水压力的作用，常易使未凝固的桩产生缩颈甚至断裂（如图 5）。因此，在分析桩身质量问题时，必须考虑土质条件的影响。

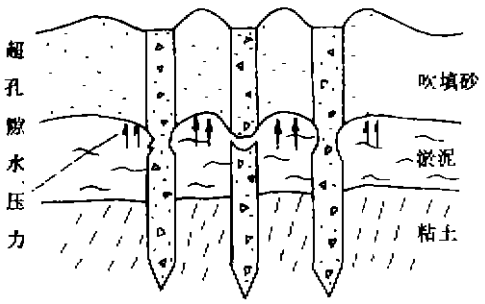

图 5 土质与桩身缺陷示意图

以上分析方法作为辅助手段，是从其它侧面对时域波形分析结果的检查印证，在缺陷性质判别时要以反射波法的基本理论为基础，其它辅助方法相结合，且要求分析人员具有相当的理论认识和实践经验。

4 现场检测及注意事项

在桩身质量的野外测试中，一般用手锤或力棒作震源，瞬间激发桩顶，响应信号经传感器采集接收，再经测试分析系统的放大滤波、A/D 转换、存贮增强等处理，最后在显示

维普资讯 http://www.cqvip.com

屏上显示、确认波形真实有效后,即可进行存盘、打印、或作进一步的分析处理。然而有时由于受现场多种因素的影响,所得测试信号中会出现许多杂波或干扰波,如果检测时误将这种波形认为是真实的振动响应,那么将直接影响分析结果的准确性。事实上,现场判断测试波形真实性的过程就是识别杂波或干扰波、大致判断桩身质量的过程,需要有一定的分析水平和实践经验,要熟悉所用仪器的性能,了解不同缺陷的波形特征。对此,在野外测试时,为保证取得准确的有效信息,一般要求:

(1)桩头处理。桩头要平整,混凝土新鲜面外露,顶部钢筋不影响操作。

(2)传感器的配置与安装。传感器配置宜选用高阻尼的,其所有技术性能应满足反射波法检测需要,有效测量频率宜在1.0 Hz~5 kHz以上,固有频率不低于20 kHz。每次使用新传感器前应连接所用测试仪器进行试验,检查波形是否正常,能否符合检测要求。传感器安装时要与桩顶面垂直,粘贴紧密牢固,保证接收到的信号是桩顶振动响应,而非传感器的自振波形,同时注意传感器粘贴位置不可靠近截面;边缘或离钢筋太近,传感器使用0.5年~1年时间要做一次标定。

(3)测试参数的选定。使用性能优良的仪器,选择合理的测试参数,对取得清晰完整的波形是十分重要的。测试时尤其注意选择好采样频率、采样长度及滤波范围等,要避免发生频率混叠,消除杂波干扰,尽量减少频率泄漏。

(4)桩顶激振。特别值得注意的问题是敲击的脉冲宽度。由于反射波法的理论基础是一维波动理论,而事实上桩是一个三维体,要使理论尽可能符合实际,须先满足平截面假设,即桩受激振动时,同一截面上所有质点的位移方向和大小都一致,也不存在位移的差别或振动的超前滞后现象。对此,一般要求桩的长径比 $L/D>10$,敲击脉冲的波长大于10倍桩径($\lambda/D>10$)。

通常宽脉冲不仅可以有效避免高频成份带来的干扰,而且能增加探测深度,但是宽脉冲对缺陷的反射不明显,尤其容易掩盖浅部缺陷。在现场测试时,应根据实际情况,选择适当的脉冲宽度或宽窄脉冲相结合。一般敲击脉冲宽度与锤重、锤的形状、材料、硬度及胶垫厚度等有关。此外,在每根桩的检测中,应重复敲击几次,多条曲线多种手段综合对比分析,以消除误差,增加分析结果的准确性。

参考文献

1 汪凤泉.基础结构动态诊断.南京:江苏科技出版社,1992

2 雷林源.动力测桩导论.桂林市地质学院,1993

3 陈　凡.桩基动力检测的基本原理.中国建筑科学研究院地基所,1994

4 陈　凡.桩基动测实例分析.中国建筑科学研究院地基所,1994

5 程乐平.动力试桩资料汇编.武汉岩海工程技术开发公司,1993

THEORETICAL GIST AND PRACTICAL APPLICATION OF REFLECTING WAVE METHOD(RWM) USED TO TEST PILE-BODY'S QUALITY

He Zanhai

RWM's theoretical essentials, the technique concerned with signal collection and disposal, some practical methods used in analysizing and deciding pile-body's quality, as well as some problems on testing were studied.

Key words reflecting wave method, wave resistance, confusion and superposition of frequency, leakage of frequency