

文章编号:1006-2106(2015)10-0057-04

管波在基桩完整性检测中的应用研究^{*}

任春山^{**} 杨怀玉 王 闯

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要:研究目的:管波的产生是有条件的,其传播具有能量强、衰减慢、传播速度慢等特性,且在传播过程中携带了周围固体介质的物理特征。通过对在桩身预埋管水中管波的产生条件、传播特性的分析,结合纵波的传播规律,对比分析不同完整性类型基桩的传播特性,研究利用管波分析判断灌注桩桩身混凝土完整性的可行性。

研究结论:(1)应用管波传播理论,通过桩身中管波传播特性分析判断桩身混凝土完整性质量是可行的;(2)纵波与管波在桩身中传播是呈规律性的,两种波的传播特性差异较大,形成竖向透射法检测波列图上特有的同相轴影像特征;(3)管波的传播携带桩身混凝土介质的物理特征,不同的管波同相轴影像图特征反映出桩身混凝土的结构性质;(4)本研究成果可应用在工程建设基桩检测领域,为基桩完整性检测技术提供了一种全新的途径。

关键词:基桩;管波;波列影像图;桩身完整性检测

中图分类号:TU473.1 文献标识码:A

Application Analysis of Tube Wave in the Pile Integrity Testing

REN Chun-shan, YANG Huai-yu, WANG Chuang

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: **Research purposes:** The generation of the tube wave is conditional, with its spreading characteristics of strong energy, slow decay, slow propagation velocity and the feature of solid medium around in spreading. Combined with the propagation of longitudinal waves and the comparative analysis of propagation characteristics of different types of foundation pile integrity, study the feasibility of analyzing and determining the integrity of concrete piles pile by using tube wave analysis, through the analysis of the pipe wave generation conditions and the propagation characteristics in the pipe water.

Research conclusions: (1) It is feasible to determine the quality of concrete pile integrity through analyzing the pile of tube wave propagation characteristics, based on the theory of tube waves. (2) It is regularity spreading of the longitudinal wave and the tube wave in the pipes, with a quite difference of the two waves' spreading characteristics, forming the image features of the phase axis. (3) The tube wave propagation has the physical characteristics of pile concrete, the different tube wave phase axis image map features reflect the structural properties of the concrete pile. (4) The research results can be used in the field of engineering construction pile foundation inspection. And the method provides a new way for pile integrity testing technology.

Key words: foundation pile; tube waves; the wave train image map; pile integrity testing

1 管波的概念

管波最早的发现与应用是在声波测井领域,是在

管内流体中传播的声波。有些声波测井资料文献将“管波(Tube waves)”称为“斯通利波(Stonely waves)”,其是在声波全波列中的一种瑞雷波(Rayleigh

^{*} 收稿日期:2015-07-22

^{**} 作者简介:任春山,1965 年出生,男,高级工程师。

waves),其特征是频率低(3~5 kHz)、能量强、幅值大、衰减慢、传播速度慢(相速度和群速度接近孔中流体介质速度的0.9倍)且与孔周围岩土层的剪切波速度密切相关、频散特性不明显等,在弹性介质中其幅值不随距离增大而衰减。在全波列声波测井记录时窗内所有的波列信号包括:纵波、横波和斯通利波(如图1所示)等多种成分的速度、幅度、频率等信息。

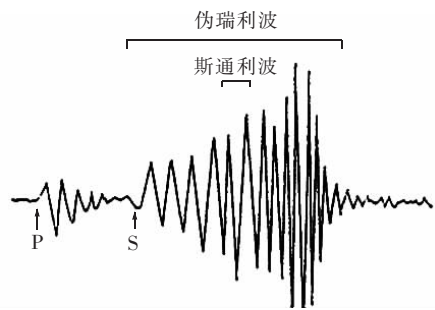


图1 声波记录的全波列示意图

在管内流体中安置震源探头,通过高压放电产生脉冲,在液体中形成纵波,在纵波的激励作用下在管壁固体介质中产生横波。由于横波所发生的剪切变形(其位移方向与管壁法线方向一致),管壁表面将有垂直于管轴方向的位移,由于连续条件,管内液体尤其是贴近管壁附近的流体也要产生垂直于管轴方向即声波传播方向的位移。因此管内流体在传播沿管轴方向的声波信号,其质点发生以沿管轴方向为主的运动同时,也发生沿管壁法线方向的运动。这样,管内流体质点的运动不再是沿管轴的单一方向,而是沿管轴方向和垂直于管轴方向的两种运动的合成。这种在管内液体和固体两种介质分界面的固体表面附近产生的沿界面传播的界面波即为“管波”。

2 桩身中管波的传播特性研究

2.1 管波的产生条件与传播

管波是在尺寸有限的管内流体中产生的一种致导波,产生的条件是管内为有限尺寸,即管径 a 小于管内液体纵波的波长 λ ,如果管内液体的纵波速度为1500 m/s,管径为40 mm,满足 $a < \lambda$ 的声波信号频率 f 的上限值即是6 kHz。管波的速度还取决于管壁固体介质的弹性力学性质,尤其是与管壁上横波传播有关的性质。

管波速度与管壁介质横波速度、管内流体纵波速度的关系式为:

$$v_t = \frac{v_f}{\sqrt{1 + \frac{\rho_f v_f^2}{\rho v_s^2}}} \quad (1)$$

式中 v_t ——管波速度(m/s);
 v_s ——管壁介质的横波速度(m/s);
 v_f ——管内流体纵波速度(m/s);
 ρ_f ——管内流体的密度(kg/m^3);
 ρ ——管壁介质的密度(kg/m^3)。

对管波的表述概括为以下三点:一是在尺寸有限的管内流体中产生的声波导,只是在某些特定的低频时被激发(离散模式波),而且有频散;二是波的幅度与速度是“对偶”的,即幅度增加的同时其速度减小,反之亦然,管波的速度 v_t 以管内流体的纵波速度为上限值;三是管波幅度的基本变化规律是随管径的减小而变大、随管壁介质(地层或混凝土)的横波速度的降低而增大、沿管轴方向传播不发生几何扩展。

管波的幅值是随距管壁的距离增加而减小的,其质点运动轨迹为椭圆,其长轴方向与管轴平行,短轴方向与管壁法线方向一致。在贴近管壁时,椭圆的短轴最长,椭圆的面积也最大,表示管波的幅度(能量)也最大,其速度也最慢;离开管壁移向管轴时,短轴逐渐缩短,椭圆的面积逐渐减小,表示管波的幅度(能量)逐渐减小,其速度亦略有增加;在管轴方向上,短轴缩短为零,椭圆退化为直线(长轴),管波“退化”为流体中的纵波。管波沿管壁进行轴向传播,在管壁固体介质中从管壁向外呈指数衰减,在一个波长的范围均存在管波,如图2所示。

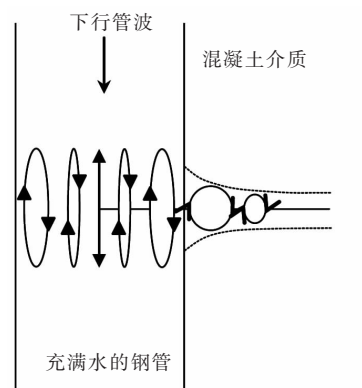


图2 管波传播过程中质点运动轨迹图

2.2 桩身中管波的传播特性

竖向透射法检测与声波透射法检测类似,一般采用钢管作为电火花震源探头和声波探头的移动通道,钢管(即声测管)内径一般为30~50 mm,要求顺直通畅,检测时须灌满清水。水的纵波速度为1500 m/s,电火花震源的激振主频率为1~5 kHz,则声测管内水中声波的纵波波长 $\lambda = \frac{v_f}{f} = \frac{1500(\text{m/s})}{3(\text{kHz})} = 500 \text{ mm}$,波

长远大于声测管内径,满足管波产生的前提条件。

管波由电火花震源激振点处产生沿管内水介质向上传播的上行管波 $T_{\text{上}}$ 和向下传播的下行管波 $T_{\text{下}}$,同时产生沿桩身混凝土向上传播的上行压缩纵波 $P_{\text{上}}$ 和向下的下行压缩纵波 $P_{\text{下}}$,如图3所示。

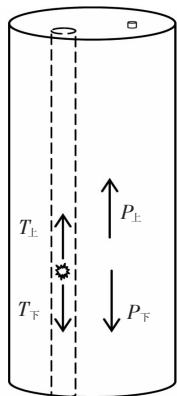


图3 行波示意图

根据井孔耦合理论,上行压缩纵波 $P_{\text{上}}$ 沿桩身混凝土传播至桩顶,被安装在桩顶的传感器所接收,即为直达纵波,其携带的弹性波特征信息是竖向透射法检测新方法分析判断桩身混凝土完整性的基本参量,包括桩身混凝土平均波速、分段波速、波幅及波幅衰减指数、频率特性等,用以从定量的角度判断桩身混凝土的完整性。向下的压缩纵波 $P_{\text{下}}$ 沿桩身混凝土向下传播,从弹性波传播理论上分析,应在桩底产生反射后,转换为沿桩身向上传播的拉伸纵波至桩顶,但在竖向透射法检测的波列图中暂时还没有清晰地看到该列波形。

由激振点产生沿管壁向上传播的上行管波 $T_{\text{上}}$ 至桩顶,被安装在桩顶的传感器所接收,其后在桩顶界面产生反射,沿管壁向下传播至桩底又反射回来沿管壁向上传播至桩顶,即上行管波的反射波,该列上行管波 $T_{\text{上}}$ 及其反射波在竖向透射法检测波列图中有清晰的波序列反映,印证了管波的幅度(能量)大、衰减慢的特性。

由激振点产生沿管壁向下传播的下行管波至桩底,其后形成两种波:其一是直接反射后沿管壁形成向上传播的下行管波的反射波,至桩顶时到达接收传感器;其二是由于管波的幅度(能量)大,在桩端产生波形转换后形成沿桩身混凝土向上传播的纵波,即反射的上行纵波,相当于在管壁和桩端交界处形成一个新的震源。沿桩身向上传播的纵波被安装在桩顶的传感器所接收,该波列在竖向透射法检测波列图中有清晰的波序列反映,其传播路径已经过大量桩的竖向透射法试验验证。

3 桩身完整性特征分析

基桩桩身完整性检测中,在预埋管内灌满清水,根据式(1)可以看出,管波的传播主要取决于管壁桩身混凝土介质的弹性力学性质,尤其是与桩身混凝土介质的剪切特性有关,在桩身混凝土波阻抗变化界面处,管波同样会产生反射与透射。

竖向透射法检测是在管内不同深度按一定的间距逐点进行激振,通过安装在桩顶的接收传感器接收来自不同深度激发的沿桩身传播至桩顶的纵波信号和沿管壁附近介质传播的管波信号。由激振点沿桩身传播的直达纵波在遇到混凝土缺陷时会携带因缺陷引起的波速下降、波幅衰减、频率改变等弹性波特征信息;管波在传播过程中遇到混凝土缺陷时发生反射与透射,其中透射波在通过缺陷后发生波形转换,转换为沿桩身传播的纵波;管波在桩端形成反射波和波形转换的沿桩身向上传播的纵波。桩顶传感器接收来自桩身的一系列信号,组合形成反映桩身混凝土质量的波列图(如图4所示),不同的波列图同相轴影像特征反映了桩身混凝土完整性质量(如图5所示)。

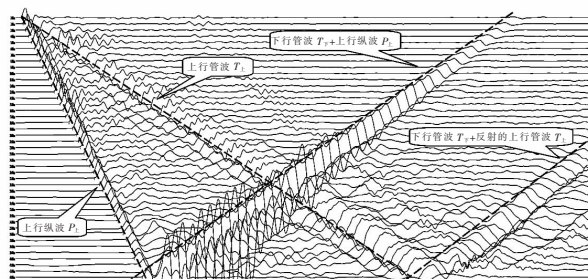


图4 完整桩波列影像图

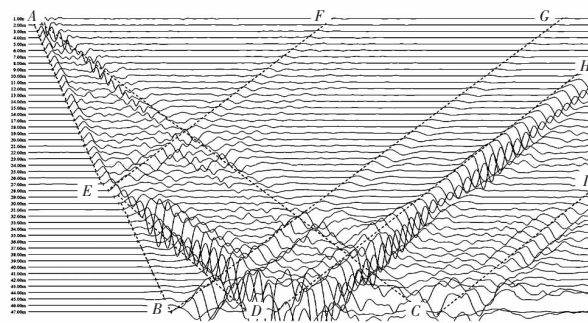


图5 缺陷桩波列影像图

3.1 完整桩特征

一是,上行直达纵波(初至波)波列与下行管波至桩端波形转换后沿桩身向上传播至桩顶的纵波波列呈不对称的“V”字形;

二是,上行管波波列与下行管波至桩端反射的上行管波波列呈现对称的“V”字形;

三是,完整桩的波形序列图中没有其他波列出现,波形序列图规则、完整。

3.2 缺陷桩特征

一是,缺陷之上各个激振点的下行管波在缺陷(造成波阻抗变化)处产生反射管波形成的波列 EF 与缺陷以下各激振点的上行管波在通过缺陷透射后转换为沿缺陷以上桩身向上传播的纵波波列 ED 呈现斜倒“K”字形;

二是,缺陷以下各激振点的上行管波在通过缺陷透射后转换为沿缺陷以上桩身向上传播的纵波波列 ED 与各激振点的下行管波的桩端反射管波通过缺陷透射后转换为沿缺陷以上桩身向上传播的纵波波列 DH 呈不对称的“V”字形;

三是,多缺陷桩会形成多个“K”字形同相轴影像;

四是,通过管波上下行波的声时差结合管波视速度可以推算桩长。

4 结论

(1)应用管波传播理论,通过桩身中管波传播不同的影像特征分析判定桩身混凝土完整性质量是可行的(铁道第三勘察设计院集团有限公司已获得发明专利授权),结合竖向透射法检测首波幅值衰减指数的定量评价,可实现对桩身完整性质量的准确判定。

(2)纵波与管波在混凝土桩桩身中传播是呈规律性的,两种波的传播特性差异较大(纵波速度快、衰减也快;管波的频率低、能量强、幅值大、衰减慢),在遇到桩身波阻抗变化界面时均会产生透射和反射,形成竖向透射法检测波列图上特有的同相轴影像特征。

(3)管波的传播携带了桩身混凝土介质的物理特征,不同的管波同相轴影像图特征反映了桩身混凝土的结构性质,综合分析这些特征可作为评价完整桩、缺陷桩和断桩或短桩的依据,判定桩身完整性质量类别,该方法为基桩完整性检测技术提供了一种全新的途径。

参考文献:

- [1] 孙树礼. 大直径超长灌注桩承载特性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2011(10): 66-71.
Sun Shuli. Research on Bearing Characteristics of Large-diameter and Overlength Bored Pile [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(10): 66-71.
- [2] 杨怀玉. 采用弹性波透射方式检测混凝土桩桩身完整性的方法: 中国, ZL 2008 1 0154315.6[P]. 2010-11-17
Yang Huaiyu. The Method of Using Elastic Wave

Transmission Testing Concrete Pile Integrity: China, ZL 2008 1 0154315.6[P]. 2010-11-17.

- [3] TB 10218—2008, 铁路工程基桩检测技术规程[S].
TB 10218—2008, Technical Specification for Testing of Railway Piles[S].
- [4] JGJ 106—2014, 建筑基桩检测技术规范[S].
JGJ 106—2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].
- [5] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundation[S].
- [6] 杨怀玉, 孙树礼, 任春山. 铁路岩土工程检测技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
Yang Huaiyu, Sun Shuli, Ren Chunshan. Testing Technology for Railway Geotechnical Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [7] 吴庆曾. 基桩声测与动测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
Wu Qingzeng. Acoustic and Dynamic Testing Technology of the Foundation Pile [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [8] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. 岩土工程学报, 2001(5): 552-556.
Zhang Zhongmiao. The Endurance of Overlength Piles in Soft Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(5): 552-556.
- [9] 阳吉宝, 钟正雄. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报, 1998(6): 108-112.
Yang Jibao, Zhong Zhengxiang. Research on Load Transfer Mechanism of Overlength Pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(6): 108-112.
- [10] 唐风华, 嵇小海, 毛益佳. 大直径钻孔灌注桩的承载力发挥特性分析[J]. 现代交通技术, 2010(5): 51-55.
Tang Fenghua, Ji Xiaohai, Mao Yijia. Research on the end Bearing Capacity Features of Large-diameter Bored Piles [J]. Modern Transportation Technology, 2010(5): 51-55.
- [11] 张齐兴. 超长桩基承载性状及承载力计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
Zhang Qixing. Research on Loading Behavior and Method to Simulate the Behavior of Lengthy Pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [12] 马晔. 超长钻孔灌注桩桩基承载性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
Ma Ye. Research on the Bearing Behavior of Super-long Drilled Pile [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.

(编辑 曹淑荣)