

低应变反射波法判别 PHC 管桩接头质量的研究

李正印^{1,2}, 柯宅邦³, 刘东甲¹, 卢志堂¹, 郭 杨³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 山东省城乡建设勘察院, 山东 济南 250031; 3. 安徽省建筑科学研究设计院, 安徽 合肥 230001)

摘 要: 由于单根管桩设计长度的限制, 设计桩长较长时, 需要接桩, 目前主要的接桩方式是焊接。接头焊接质量的好坏会直接影响桩基的承载力、稳定性。同时在管桩施工过程中, 由于压桩操作不规范、土层软弱变化等原因, 可能造成管桩接头松动甚至断开, 导致管桩整体稳定性丧失, 引发严重的工程安全问题。为了研究低应变反射波法对管桩接头质量的检测效果, 正确判断接头处是否存在质量问题, 根据接桩特点, 建立接头模型, 进行了数值模拟。然后, 通过制作模型桩, 进行现场实验, 对实测曲线和数值模拟曲线进行了比对分析, 得出了有意义的结论。

关键词: 低应变反射波法; PHC 管桩; 接头模型; 管桩实验

中图分类号: TU473.16 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0209-04

作者简介: 李正印(1989-), 男, 山东嘉祥人, 本科生。E-mail: lzhy1113@163.com。

Tests on PHC pipe pile joint quality by low-strain reflected wave method

LI Zheng-yin^{1,2}, KE Zhai-bang³, LIU Dong-jia¹, LU Zhi-tang¹, GUO Yang³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shandong Province Investigation and Survey Institute of Urban and Rural Construction, Jinan 250031, China; 3. Anhui Institute of Building Research and Design, Hefei 230001, China)

Abstract: Pipe piles need to be connected in actual projects for the design length constraints of a single pile. Nowadays, the main pile extension method is welding. The quality of welding joints will directly affect the bearing capacity and stability of pile foundation. During the construction process of pipe pile, the non-standard piling operation, changes of soil layers and other factors may make joints become loose or broken and lose the overall stability of pipe pile, leading to serious security problems in the end. In order to study low-strain integrity test effect on the detection of the pipe pile joints and correctly identify the quality of joints, a joint model is established according to the connection features of pipes pile. Numerical simulation is carried out. Some conclusions are drawn by making model piles, conducting field tests and analyzing theoretical and test curves.

Key words: low-strain reflected wave method; PHC pipe pile; joint model; pipe pile test

0 引 言

在近代高性能混凝土和预应力技术的基础上发展起来的预应力高强混凝土管桩(简称 PHC 管桩), 以其质量稳定、施工工期短、施工速度快、穿透能力强、无污染、承载力高等特点, 得到了广泛的应用。由于单根管桩设计长度的限制, 不能达到工程实际需求, 因此, 实际工程需要对管桩进行接桩, 目前主要的接桩方式是焊接。多节管桩拼接成整桩一般采用端板焊接进行连接, 手工焊接时应分 3 层以上对称进行环缝焊接, 并采取措施减小焊接变形。因此, 接头焊接质量的好坏会直接影响桩基的承载力、稳定性。同时, 在施工过程中, 尤其是压桩过程中, 由于土层软弱变化或者压桩操作不规范, 接头容易松动, 甚至断开, 导

致管桩丧失整体性, 对工程安全带来严重的隐患。因此, 只有更精确地检测出接头处是否存在质量问题, 才能将工程事故的概率降到最低, 然而目前对接头质量检测的研究还不够完善, 故本文对利用低应变反射波法检测接头质量问题进行了相应的研究和探讨。

目前已有许多研究人员针对 PHC 管桩接头质量的判断做了相关的研究。黄良机等^[1]揭示了管桩接头在未入土时, 桩顶测到的接头处的反射信号综合反映了接头处端头板接触面的接触情况和焊缝的焊接质量, 探讨了应力波在接头处通过接触面和焊缝的传播性

基金项目: 国家大学生创新性实验计划项目 (091035938); 住房和城乡建设部科学技术项目 (2010-k3-23)

收稿日期: 2011-08-02

能；刘奎荣等^[2]分析了接头脱接现象产生的原因；张世虎^[3]分析了接桩处开裂的原因并提出了预防措施；张吴渝等^[4]针对反射波法检测PHC管桩时经常无法检测到接头板部位反射波的现象，从理论上分析了可能产生该现象的原因。但是，前人研究并没有对接桩存在各种的质量事故进行模拟计算和实验对比分析。

本文首先根据一维波动理论，建立了管桩接头模型，对有接头管桩的桩顶速度响应进行了模拟计算，了解接头管桩中波的传播特征。其次，进行现场模型桩的焊接实验，将实测曲线与本文的模拟计算结果进行对比分析，得出相关结论。

1 基本理论

PHC管桩的完整性检测，一般采用低应变反射波法^[5]。低应变反射波法是以手锤或力棒敲击桩顶，给桩一定的能量，产生纵向应力波，应力波沿桩身向下传播，由传感器拾取桩身缺陷以及不同界面的反射信号，通过检测和分析应力波在桩身中的传播历程，来分析桩基的完整性。实际管桩检测是三维波动问题，考虑到接头位置较深，即一般位于满足平截面假定的深度，因此可以忽略三维因素的干扰，将其看为一维波动问题。

多节管桩拼接成整桩一般采用端板焊接进行连接，手工焊接时应分三层以上对称进行环缝焊接，并采取减小焊接变形。但是由于法兰盘处存在波阻抗的差异，因此，进行数值模拟计算时采用了非完整桩振动模型，如图1所示。

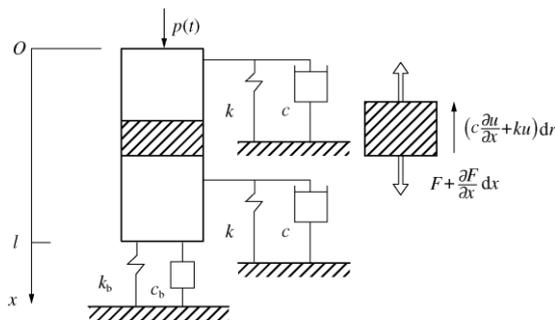


图1 非完整桩纵向振动模型

Fig. 1 Longitudinal vibration model of non-intact pile

基本假定：桩为变截面非均质弹性直杆；桩周土体对桩的作用简化为与位移成正比的分布弹性力和一个与振速成正比的分布阻尼力。此时桩身微段在桩身内力、桩周土的弹性力和阻尼力作用下的运动方程^[6]为

$$F + \frac{\partial F}{\partial x} dx - F - c \frac{\partial u}{\partial t} dx - k u dx = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中， $F = AE \frac{\partial u}{\partial x}$ 为桩身内力； $u = u(x, t)$ 为桩身 x 处在 t 时刻的质点位移； c 、 k 分别为单位深度桩周土的等效阻尼系数和等效刚度系数。

将桩身内力 $F = AE \frac{\partial u}{\partial x}$ 及位移表达式 $u = u(x, t)$ 代入式(1)，简化可得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial u}{\partial x} \right) - c \frac{\partial u}{\partial t} - ku = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中，桩截面面积 $A = A(x)$ ；桩弹性模量 $E = E(x)$ 随桩身坐标 x 变化。

桩底边界条件为

$$\left(AE \frac{\partial u}{\partial x} + c_b \frac{\partial u}{\partial t} + k_b u \right) \Big|_{x=l} = 0 \quad ; \quad (3)$$

桩顶边界条件为

$$AE \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = -p(t) \quad ; \quad (4)$$

取零初始条件，即：

$$u|_{t=0} = 0 \quad , \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

式(1)中 k 和 c 由桩侧土密度、剪切模量及桩半径确定。式(2)中 k_b 和 c_b 由桩底土密度 ρ_b 、剪切模量 G_b 及桩半径 r_0 确定；式(3)中激振力 $p(t)$ 由其冲量 I 和作用时间 t_0 确定。以上参数的具体表达式见文献^[7]。

对式(2)~(5)的 u 求关于时间 t 的一阶导数，得：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial u}{\partial x} \right) - c \frac{\partial u}{\partial t} - kv = \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$\left(AE \frac{\partial u}{\partial x} + c_b \frac{\partial u}{\partial t} + k_b v \right) \Big|_{x=l} = 0 \quad , \quad (7)$$

$$AE \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{dp(t)}{dt} \quad , \quad (8)$$

$$v|_{t=0} = 0 \quad , \quad \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

式中， $v = v(x, t)$ 为桩身 x 点在 t 时刻的振动速度； l 为桩长。

2 数值模拟

运用 Matlab 对式(6)~(9)进行编程计算，可求得非完整桩桩顶振动速度曲线。在算例中，各参数取值如下：桩身密度为 2450 kg/m^3 ，泊松比为 0.28 ，内外径分别为 0.15 、 0.25 m ，壁厚为 0.10 m ，激振力冲量 I 取 1 N s ，激振力作用时间 t_0 取 0.66 ms 。

由于法兰盘和混凝土之间不可能是完全耦合，故将法兰盘和混凝土接触的部分等效为一个过渡区，因

此可以将两个焊接在一块的管桩分成 5 部分, 即: 桩身、过渡区、接头、过渡区、桩身, 如图 2 所示。



图 2 管桩等效分段模型

Fig. 2 Equivalent pile segmentation model of pipe pile

低应变反射波法基本原理是基于应力波理论, 当桩身存在明显的波阻抗界面时, 便会产生反射波, 因此, 波阻抗是十分重要的参数。

波阻抗表达式为

$$Z = \rho AC \quad (10)$$

式中 Z 为波阻抗; ρ 为传播介质密度; A 为传播介质的横截面积; C 为应力波传播速度。

根据模型桩接头的多组实测信号 (如图 3 所示), 可以看出, 实测曲线在接头处出现类似缩颈的信号, 但是由于法兰盘的密度 ρ (数值模拟时采用 7900 kg/m^3) 和纵波波速 C (数值模拟时采用 5000 m/s) 可以视为定值。而出现类似缩颈信号主要是因为法兰盘处波阻抗 Z 相对于桩身波阻抗偏小, 因此假定: 由于焊接部分仅在法兰盘外围, 上下法兰盘并不是完全接触在一起, 故波阻抗中的 A 应该乘以一个折减系数 w 得到等效接触面积, 即, 接头③位置的波阻抗表达式为 $Z = \rho wAC$ 。

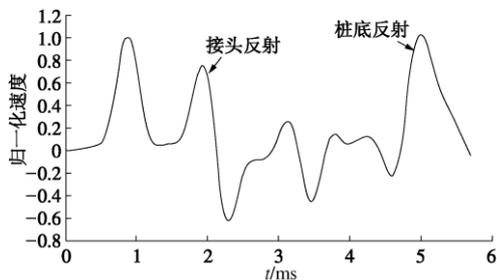


图 3 管桩接头实测曲线

Fig. 3 Measured curve of pipe pile joints

图 4 是对 3 种不同桩进行数值模拟计算出来的理论曲线。其中: 长虚线是一根 3 m 的接头断开桩; 实线是理想接头的管桩; 短虚线代表采用上面等效模型对接头进行等效处理后得到的理论曲线。从图 4 中可以看出: 理想接头桩和接头折减桩的桩底反射信号比较明显, 而接头断开的管桩看不到桩底反射信号; 接头折减处理后的曲线接头反射信号幅度介于理想接头

桩和接头断开两者之间。而且理想接头是扩颈信号 (波阻抗变大), 实际中是不可能出现这种信号的。

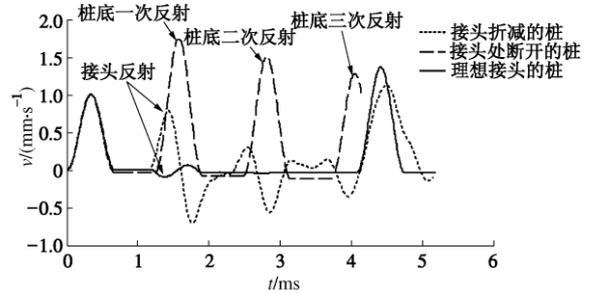


图 4 3 种桩的理论计算曲线

Fig. 4 Calculated curves of three piles

3 实验分析

利用数值模拟部分中提出的桩分段模型, 和实际检测得到的曲线进行对比分析, 验证其是否合理。图 5 (a) 是接头全部焊接时的情况照片, 图 5 (b) 为正在进行信号采集。



(a) 管桩接头



(b) 测试现场

图 5 实际工作照片

Fig. 5 Photos of actual work

数值模拟时桩各段参数: 桩身①长度为 2.78 m, 弹性模量为 $5.763 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; 过渡区②长度为 0.15 m, 弹性模量为 $3.354 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; 接头③长度 0.03 m, 即为两个法兰盘的厚度, 弹性模量为 $1.975 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$; 过渡区④长度为 0.15 m, 弹性模量为 $3.354 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; 桩身⑤长度为 6.73 m, 弹性模量为 $5.763 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

为了比较实测曲线和理论计算的吻合程度, 利用

Matlab 软件对实测曲线进行了归一化处理, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 理论曲线和实测曲线吻合程度很好。这表明本文提出的管桩接头模型假定是合理的。

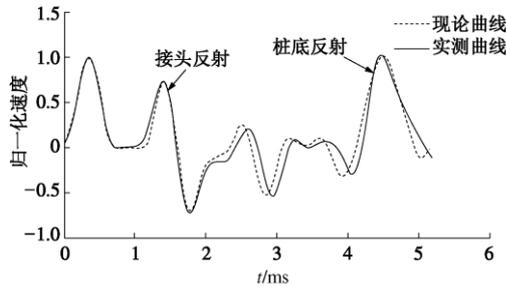


图 6 实测和理论拟合曲线

Fig. 6 Measured and theoretical fitting curves

考虑到管桩接头处的接触情况, 将其分为 4 种类别, 如图 (7) 所示, 图 (8) 为对应的实测曲线。从图 8 可以看出: 除了曲折桩的情况, 其他 3 种情况的管桩接头实测曲线的反演基本相同, 利用低应变反射波法不能判断管桩接头质量是否存在问题。在实际检测工作中即使在接头位置出现较大的反射 (断桩的反射信号除外), 也不能判定该处接头存在问题, 应该利用其他方法检测。

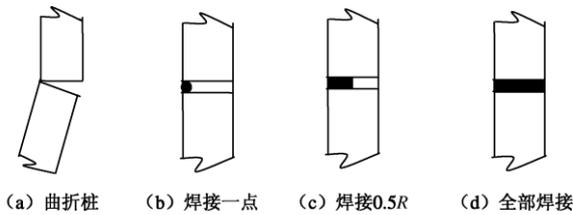


图 7 4 种焊接情况的说明

Fig. 7 Description of four welding conditions

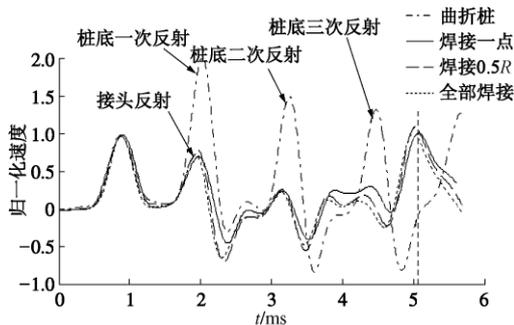


图 8 不同焊接程度实测曲线对比

Fig. 8 Measured curves under different welding degrees

4 结 论

(1)数值模拟曲线和实测曲线对比分析结果证实了提出的五段等效模型的正确性, 以及将法兰盘接头面积进行折减方案的合理性。这可以对以后研究接头检测问题提供一个很好的思路。

(2)在实际低应变检测中, 当遇到接头处出现较大反射 (接头断开情况除外) 时, 不能盲目的判断接

头出现质量问题, 因为即使是在完全焊接的情况下也可能出现较大的反射信号。

(3)对于法兰盘焊接接头的质量问题的检测, 低应变反射波法很难检测出来, 建议采用其他方法进行检测。

参考文献:

- [1] 黄良机, 林奕禧, 黄春晓, 等. 应力波在预制管桩接头处传播性能的试验研究[J]. 工程质量, 2005(6): 21 - 24. (HUANG Liang-ji, LIN Yi-xi, HUANG Chun-xiao, et al. Experimental research on conductivity of stress wave in the splicers of pre-cast pipe piles[J]. Quality Test, 2005(6): 21 - 24. (in Chinese))
- [2] 刘奎荣, 高映辉, 罗振阳. 预应力管桩三种主要质量事故的诊断[J]. 西部探矿工程, 2006(增刊): 117 - 119. (LIU Kui-rong, GAO Ying-hui, LUO Zhen-yang. Diagnosis of three main quality accident of prestressed pipe pile[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(S0): 117 - 119. (in Chinese))
- [3] 张世虎. 预应力管桩工程的质量控制浅析[J]. 中国新技术新产品. 2010(8): 73. (ZHANG Shi-hu. Discussion on quality control of pre-cast pipe piles[J]. China New Technologies and Products, 2010(8): 73. (in Chinese))
- [4] 张吴渝, 王雪峰, 忻元跃. 关于应力波在 PHC 管桩接头部位反射问题的探讨[J]. 山西建筑, 2010, 36(20): 1 - 3. (ZHANG Wu-yu, WANG Xue-feng, XIN Yuan-yue. Discussion on the stress wave reflect on the PHC pipe pile joint position[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(20): 1 - 3. (in Chinese))
- [5] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (JGJ—106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 陈义全, 任志国, 刘东甲. 非完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 2004, 27(10): 1210 - 1214. (CHEN Yi-quan, REN Zhi-guo, LIU Dong-jia. Simulation and calculation of transient longitudinal vibration of non-integrite piles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 27(10): 1210 - 1214. (in Chinese))
- [7] 刘东甲. 完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 683 - 687. (LIU Dong-jia. Simulation and calculation of transient longitudinal vibration of integrite piles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition). 2000, 23(5): 683 - 687. (in Chinese))

