

透射波法和声波 CT 在桩基检测中的应用

钟菊芳¹, 张伟^{1,2}

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510665)

摘要 目的 研究声波透射法在混凝土桩基缺陷检测中的声波响应特征, 以避免声波透射法桩基检测效果受传感器耦合不佳或噪音干扰等的影响. 方法 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件模拟声波在大直径桩基中传播规律, 开展了模拟声波波速与理论波速的对比分析、声学参数的时频域分析, 缺陷的介质特性、水平尺寸及竖向尺寸对声波接收信号时频特性的敏感分析, 以及声波层析成像反演分析. 结果 缺陷竖向线性尺寸、材料参数对波速、波幅及主频幅值影响较大, 缺陷水平向线性尺寸对波速、波幅及主频幅值影响较小. 结论 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元法开展桩身波动问题研究是合理和可行的, 建议选用 50 kHz 声波进行大直径桩基声波层析成像分析.

关键词 桩基检测; 声波透射法; 震源频率; 缺陷类型; 声波层析成像

中图分类号 TU473

文献标志码 A

Application of Transmission Wave Method and Acoustic Wave CT in Pile Foundation Detection

ZHONG Jufang¹, ZHANG Wei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, China, 330063; 2. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, China, 510665)

Abstract: The acoustic response characteristics were studied to avoid the poor coupling of sensor and the influence of noise disturbance during the detection of pile foundation acoustic wave. The propagation law of acoustic waves in large diameter pile foundation was simulated by ANSYS / LS-DYNA finite element software. The propagation law of the sound waves in the defective concrete pile foundation was revealed, analysis of the acquisition of a variety of acoustic parameters in the time and frequency domain. The influence of defect dimensional change and material parameters on the frequency and frequency characteristics of the acoustic receiving signal was discussed by changing the shape of the defect, the characteristics of the medium, and as well as the horizontal and vertical dimensions. The acoustic quality of the pile foundation was retrieved by acoustic tomography. The result showed that the vertical linear dimension, hole size and material parameters of

收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51069010, 51468045); 科技部水利公益性行业科研专项项目(201401009); 江西省教育厅科技项目(GJJ160703)

作者简介: 钟菊芳(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事地震动输入机制研究及结构抗震分析方面研究.

the defect have significant influence on the velocity, amplitude and amplitude of the main frequency. However the linear dimension of the defect has little influence on the velocity, amplitude and amplitude of the main frequency. The rationality and feasibility of using ANSYS / LS-DYNA finite element method to study the fluctuation of pile body were verified by comparing the simulated wave velocity and theoretical wave velocity. The sound wave with frequency of 50 kHz is suitable for large diameter pile acoustic tomography.

Key words: pile foundation detection; acoustic wave CT method; source frequency; defect type; acoustic tomography.

桩基础被越来越多的用于各类大型建筑、桥梁工程中,其施工质量的好坏对建筑的可靠性、安全性起着至关重要的作用。由于施工技术、施工环境、荷载作用以及混凝土材料性质,经常会使混凝土桩基桩身产生蜂窝、夹泥、断裂、集中性气孔等缺陷,从而严重影响建筑物的安全性和使用寿命^[1]。又由于桩基检测环境条件复杂,检测对象比较隐蔽,给桩基质量检测技术提出了越来越高的要求,推动着桩基质量检测技术向着无损评价、高精度、高效率方向发展^[2]。近年来,声波透射法及声波层析成像技术逐渐被应用于混凝土的质量检测中。声波透射法通过声波信号的一种或多种声学参数来反映桩基内部质量情况,可定性半定量的判断桩身混凝土均匀性、缺陷大小及位置。层析成像技术能够以图像重建的方式直观反映混凝土结构剖面内部质量情况,能够弥补传统检测方法只能半定量的评价桩基缺陷的局限^[3]。因此,开展桩基工程声波 CT (Acoustic Tomography) 无损检测技术的研究尤为重要。包龙生等^[4]提出了用于桩基检测评判和预判桩身质量的灰色系统理论预测模型;李廷等^[5]通过试验研究和模拟计算对比分析了桩基声波透射法波速、波幅及 PSD (声时-深度曲线相邻两点的斜率与相邻时差值的乘积) 判据,提出了声波透射法检测桩基质量的综合评判方法;王述红^[6]等利用脉冲声波对大直径灌注桩桩身质量检测,分析了接收信号的声速和波幅,对桩身完整性类别进行了判定;张献民等^[7]建立了声测管弯斜修正模型,将声波 CT 技术

引入到桩基工程检测中是发展趋势。郭峰等^[8]通过测试试验混凝土梁模型内部缺陷和密实性,准确地识别了混凝土缺陷特征。张永乐^[9]利用逐次线性化迭代与配置阻尼最小二乘法的 QR 分解相结合的声波层析成像方法对预设置缺陷的模型桩测试,提出了基于特征阻抗的层析成像技术。刘润泽等^[10]对基于 Delaunay 三角剖分优化法的声波层析成像检测技术进行了研究。

目前声波检测混凝土桩基缺陷大部分是根据接收信号的某单一声学参数(如声时、声幅、波形)的大小及变化来进行间接判别,而对声时的变化、接收信号能量的衰减、接收与发射声波频谱的差异以及波形的变化等进行综合运用的研究较少,且这些方法对缺陷的大小、形状及性质很难以给出一个定量的结果,很难对桩基的可靠性、安全性进行准确评估。利用声波 CT 技术进行桩基质量检测已经成为混凝土无损检测的研究热点,但现有的声波反演重建技术受伪像的影响分析效率不高,已发展成熟的超声波检测系统又因超声波主频频率较高、衰减严重而使探测距离受限,大部分混凝土缺陷实验只针对混凝土内某一具体缺陷进行成像效果的影响分析,未能够系统性的研究混凝土内部缺陷尺寸、形状及位置与成像效果之间的关系,也未能够给声波 CT 实测所得的图像提供丰富的参考图像。因此,需通过大量的数值模拟或实验研究来提供各类典型缺陷图像来为现场实测提供快速可靠的判定依据。如何从声波信号中获取有用信息并将这些信息具体化、

形象化是桩基声波检测的关键。

针对大直径桩基检测中存在的上述问题,笔者采用数值模拟仿真方式来研究声波CT系统检测混凝土桩基的内部质量的可靠性、适用性。通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件模拟声波在带缺陷的大直径桩基内部传播规律,研究缺陷类型、形状和尺寸对声波在桩基内传播规律的影响;把接收的声波信号转换为反演成像的数据,重建桩基内部缺陷图像,从而分析不同观测方式、不同声波频率、不同尺寸缺陷对桩基声波 CT 反演精度的影响。研究成果将为实际工程中的声波 CT 检测提供可靠的参考依据,完善声波 CT 成像技术在桩基工程检测中应用。

1 桩基声波检测有限元模型及模拟

为研究桩基内声波的波动特性,基于实际桩基工程以及建筑桩基检测技术规范建立了以混凝土为基体的桩基声波检测二维模型。有限元模型材料参数^[11-12]见表 1 所示,使用 PLANE162 单元,单元网格尺寸 0.004 m。在满足声波波动效应模拟精度下,为减少不必要的计算时间及内存,采取如图 1 所示的局部测试方案,采用对测法进行检测。声测管布置在桩身两侧,距桩身外边缘 5 cm。发射点及观测点布置方式如图 2 所示,其中 A~E 五个接收点距震源(发射点)的距离分别为 0 m、0.4 m、0.8 m、1.2 m、1.6 m。

表 1 有限元模型材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model

混凝土强度	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ 10 ¹⁰ Pa	泊松比 μ
C15	2 250	2. 20	0. 23
C20	2 370	2. 55	0. 23
C25	2 380	2. 80	0. 23
C30	2 385	3. 00	0. 23
C40	2 400	3. 20	0. 23

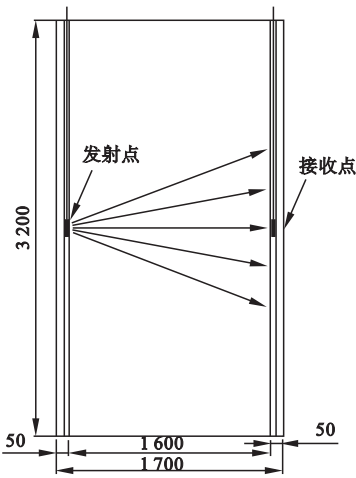


图 1 桩基声测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile foundation acoustic test

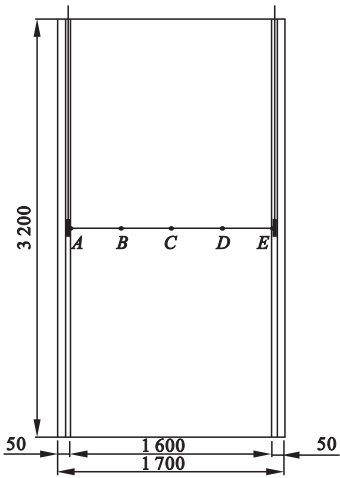


图 2 信号接收点布置示意图

Fig. 2 Signal receiving point arrangement diagram

为防止声波在桩基内传播时频散现象干扰,便于分析震源与接收信号之间的频谱差异,选择对震源加汉宁窗的处理方式来实现发射单音频震源信号,其中震源信号的数学表达式为

$$f(t) = \frac{1}{2} \sin(2\pi f_c \cdot t) \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c \cdot t}{n}\right) \right]. \tag{1}$$

式中: f_c 为震源信号的主频,取 $f_c = 50$ kHz; n 为单音频个数,取 $n = 10$; t 为时间。

根据声波穿透桩基所需的时间设定求解时间为 0.002 s,完整周期荷载加载时间为

0.000 2 s,时间步长为 10^{-6} s. 声波的初至时间为接收波首波波峰时间与发射波首波波峰时间之差. 在 A 点发射震源信号,震源首波波峰时间 $t_0 = 6.610\ \mu\text{s}$; E 点处接收到的首波波峰时间 $t = 395.705\ \mu\text{s}$,即声波在混凝土中传播时间 $t_E = 389.095\ \mu\text{s}$,计算得到的声波波速 $c_E = 4\ 112.11\ \text{m/s}$.

声波在混凝土中传播的理论波速可由式(2)计算得到:

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; ρ 为密度; ν 为泊松比.

为检验 ANSYS/LS - DYNA 模拟声波对桩基进行检测的可行性,采用式(3)来计算模拟波速 c_E 与理论波速 c_d 间的相对误差 e :

$$e = \left| \frac{c_E - c_d}{c_d} \right| \times 100\% \quad (3)$$

经计算得 $c_d = 4\ 085.26\ \text{m/s}$, $e = 0.65\%$,即模拟波速与理论波速间的误差小于 1%,说明经过合理的网格划分和时间步长选取,利用 ANSYS/LS - DYNA 模拟声波桩基检测是可行的.

2 缺陷桩基声波检测有限元模拟

实际桩基工程中的缺陷复杂,种类多且大小不一,笔者探讨桩基中存在不同尺寸、外

形及材料参数缺陷时声波检测信号的差异,探讨缺陷的类型、外形及尺寸效应对检测结果的影响规律. 桩基基体材料为 C40 混凝土,假设桩基中存在 C15 低强度混凝土缺陷和空洞.

2.1 竖向尺寸改变对声波检测信号的影响分析

为探究 C15 混凝土缺陷和空洞的竖向尺寸对声波在桩基内传播规律的影响,在桩体中心区设置了水平尺寸为 0.1 m,竖向尺寸分别为 0.20 m、0.25 m、0.30 m、0.35 m 和 0.40 m 的 C15 缺陷和空洞,如图 3 所示. 图 4 和图 5 给出了 321.86 μs 时刻声波经过不同竖向尺寸的 C15 缺陷和空洞的应力云图.

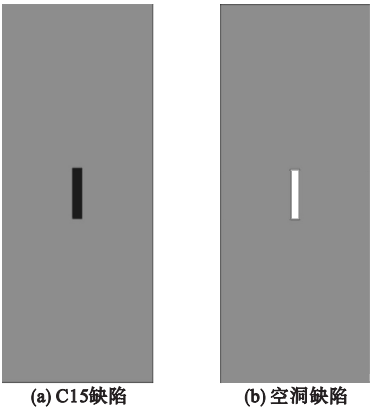


图 3 缺陷桩基模型

Fig. 3 Defective pile foundation model

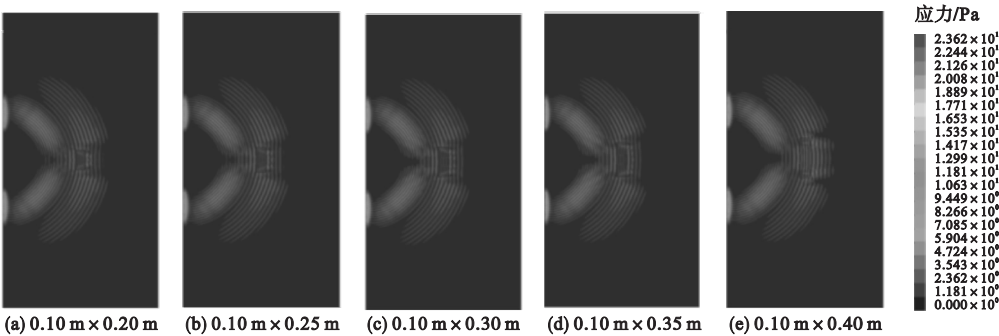


图 4 声波在 321.86 μs 时刻经过 C15 缺陷时的应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of sound wave passing through C15 defect at 321.86 μs

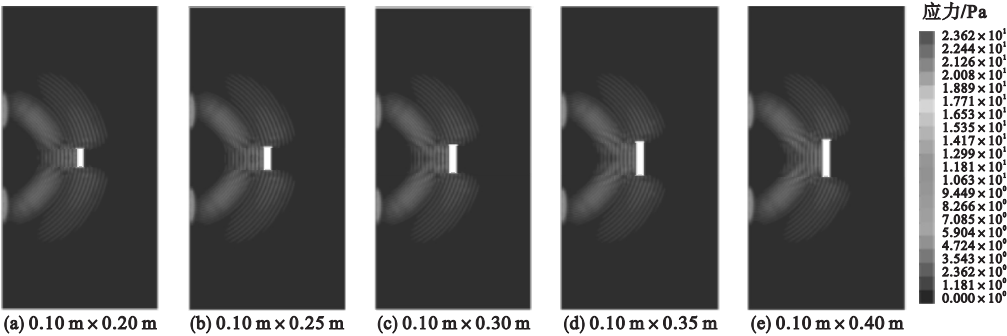


图5 声波在321.86μs时刻经过空洞时的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of sound waves passing through voids at 321.86 μs

由图可知;C15 缺陷左侧有明显应力集中现象,分析认为这是由缺陷界面产生的反射波与后续波叠加而导致的应力增大.缺陷右侧部分声波透过缺陷产生了透射波,与绕射波相比,透射波应力明显较小.随着 C15 缺陷竖向尺寸增大,透射波范围变大.空洞左侧应力集中程度比 C15 缺陷更为明显,说明声波经过空洞界面所产生的反射波比经过 C15 缺陷界面所产生的反射波的能量大,反射波与后续波叠加产生应力集中现象更为突出.空洞右侧界面中心位置无应力,说明声波无法穿过声阻抗大的空洞,表现为空洞右侧界面无透射波,只有绕射波.

在缺陷桩接收点提取到的声波纵波速度波形与完整桩接收到的声波信号相比,缺陷桩的速度波形发生了明显的畸变,缺陷桩的速度波包幅值随缺陷竖向尺寸的增加而减小.空洞桩基速度波形的后续波波幅震荡明显,且畸变程度比 C15 缺陷桩的要大,说明声波在空洞中的传播比在低强度混凝土中的传播更为复杂.

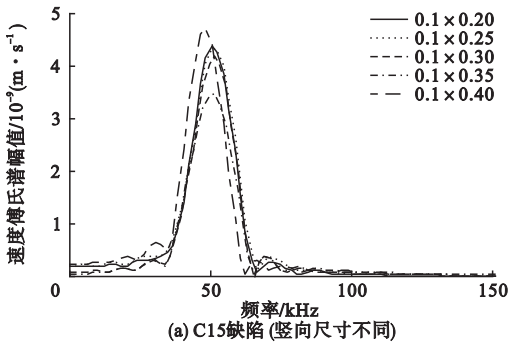
当 C15 缺陷竖向尺寸小于等于 0.35 m 时,波速和首波峰值随竖向尺寸增大而逐渐减小,说明声波绕射过缺陷传播中路径延长及能量衰减增大,绕射波先到达接收点.当竖向尺寸增大到 0.40 m 时,波速略小于在竖向尺寸为 0.35 m 缺陷中的传播速度,首波峰值却比缺陷竖向尺寸在 0.20 ~ 0.35 m 内的相应值大,分析认为这是当缺陷竖向尺寸达到 0.40 m 时,声波经过缺陷时产生的透射波先于绕射波到达接收点.

表 2 给出了不同竖向尺寸的 C15 缺陷和空洞的声波波速和首波峰值.图 6(a) ~ (e)分别为不同竖向尺寸、不同水平尺寸下 C15 缺陷和空洞的频谱图.

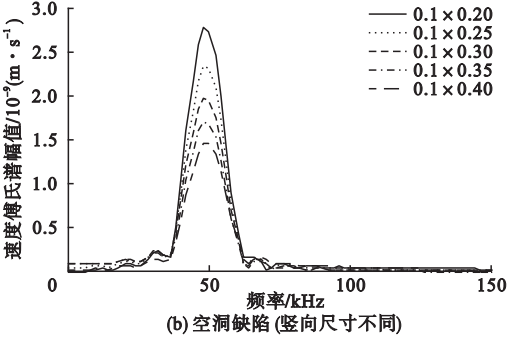
表 2 不同缺陷类型及竖向尺寸对应的波速和首波峰值

Table 2 The wave velocity and initial wave peak value of different defect types and vertical dimensions

竖向尺寸/ m	波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		首波峰值/ $10^{-10}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	C15 缺陷	空洞	C15 缺陷	空洞
0.20	4 037	4 038	5.08	4.80
0.25	4 015	4 015	4.07	3.98
0.30	3 993	4 004	3.20	3.09
0.35	3 963	3 970	2.56	2.43
0.40	3 958	3 949	8.71	1.86



(a) C15缺陷 (竖向尺寸不同)



(b) 空洞缺陷 (竖向尺寸不同)

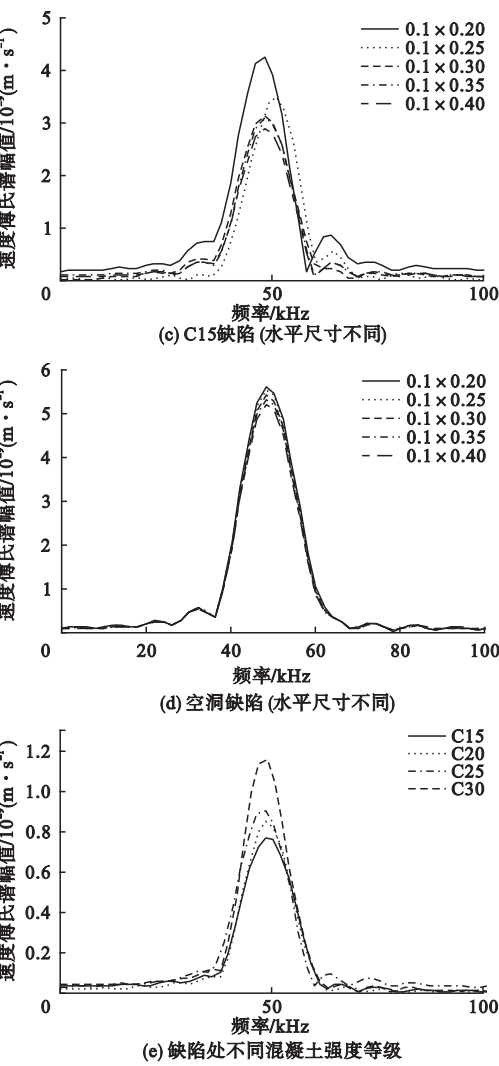


图6 缺陷桩基检测信号频谱对比图

Fig. 6 Comparison of signal spectrum of defective pile foundation test

由表2可知,波速和首波波峰幅随空洞竖向尺寸增大而逐渐减小,说明声波主要绕射过空洞缺陷,随尺寸增加绕射路径增大,所以到达信号接收点皆为绕射波.声波速度受缺陷类型影响不大,不论缺陷为何种介质,竖向尺寸相同时声波波速相差不大;但缺陷类型对首波波峰有影响,当竖向尺寸在0.35m范围内时,空洞和C15混凝土缺陷的首波波峰值衰减趋势大致相同,但空洞首波波峰的衰减程度比C15混凝土缺陷大,分析认为,声波绕射时在竖向界面发生了反射,空洞界面反射能力强于C15缺陷界面,导致声波能量

衰减相对较大,所以C15缺陷桩基接收首波峰值大于空洞缺陷桩基首波峰值.

由图6(a)和(b)可知,当C15缺陷竖向尺寸在0.20~0.35m时,主频值大致保持不变,主频幅值随尺寸增大而减小;当C15缺陷竖向尺寸为0.4m时主频向低频漂移,主频幅值达到最大,分析认为这是因到达接收点的声波信号为透射波,透射波在C15缺陷内部传播高频部分衰减较大,导致主频漂移,低频衰减相对较慢,导致主频幅值相对较高.随空洞竖向尺寸增加主频向低频漂移,但漂移量不明显,因声波信号主频带较窄,能量集中;空洞主频幅值小于C15缺陷的值,因声波在缺陷界面反射能力较强,声波在绕射空洞时高频能量衰减较大.

2.2 水平向尺寸改变对声波检测信号的影响分析

在桩体中心区分别设置边长为0.20m×0.10m、0.25m×0.10m、0.30m×0.10m、0.35m×0.10m、0.40m×0.10m的C15混凝土缺陷和空洞缺陷.声波在308.64μs时刻经过C15缺陷及空洞时的应力云图如图7、图8所示.从图7和图8可以看出:声波遇到C15缺陷后发生绕射和透射,其中绕射波传播速度明显快于透射波;声波经过空洞时主要以绕射方式传播,绕射路径与同尺寸C15缺陷大致相同;但声波在空洞界面所产生的反射波比C15缺陷更明显.缺陷桩基的检测信号与完整桩基检测信号相比,C15缺陷桩基的检测信号波形发生了明显的畸变和衰减,且畸变的程度随缺陷水平尺寸的增大而增大;空洞的波形也发生了明显的畸变,但随空洞水平尺寸的增大波形未发生明显变化.

不同缺陷类型及水平尺寸对应的声波波速和首波峰值如表3所示.由表3可知,缺陷水平尺寸的改变对声波波速的影响不大,但首波波幅会随水平尺寸的增大而减小.说明绕射波传播路径并未随水平尺寸的改变而变化.

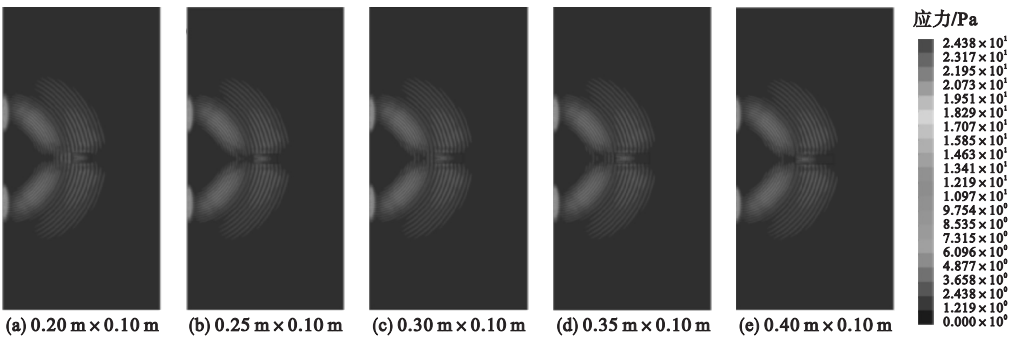


图 7 声波经过 C15 缺陷

Fig. 7 Sound wave passing through C15 defect

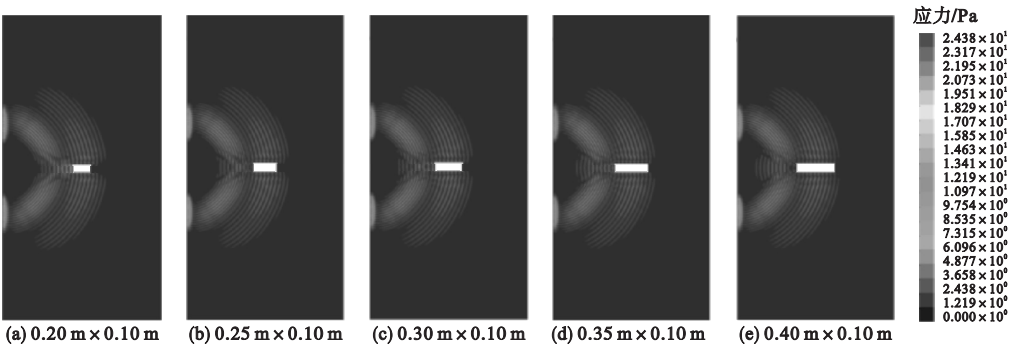


图 8 声波经过空洞

Fig. 8 Sound waves passing through voids

表 3 不同缺陷类型及水平尺寸对应的声波波速和首波峰值

Table 3 Sound wave velocity and initial wave peak value corresponding to different defect types and horizontal dimensions

水平尺寸/m	波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		首波峰值/ $10^{-10}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	C15 缺陷	空洞	C15 缺陷	空洞
0.20	4 060	4 061	7.05	8.09
0.25	4 058	4 058	6.52	7.94
0.30	4 058	4 058	6.02	7.78
0.35	4 056	4 055	5.56	7.60
0.40	4 056	4 055	5.22	7.41

相比较来说,C15 缺陷的首波波幅受水平尺寸的影响较空洞的首波波幅大,C15 缺陷的首波波峰衰减程度及速度比空洞缺陷大,说明 C15 缺陷水平尺寸的改变对绕射波能量会产生一定影响.而空洞水平尺寸变化对绕射波能量的影响较小.

由图 6(c)和(d)可知,C15 缺陷水平尺

寸改变对主频影响不大,但主频幅值将随缺陷水平尺寸的增大而减小,说明声波在不同水平尺寸的 C15 缺陷中传播时衰减较大.随空洞水平尺寸的增大,主频向低频略微漂移,但主频幅值并未呈现明显的减小趋势,说明声波沿空洞界面传播时,其界面并未使声波能量发生明显衰减.

2.3 材料参数影响分析

当 C15 缺陷竖向尺寸达到 0.4 m 时,透射波穿透缺陷最先到达信号接收点,因此为研究声波穿透不同材料缺陷时的波动特性及信号特征,桩基内部缺陷的材料分别设置为 C15、C20、C25 及 C30,材料参数见表 1 所示,缺陷尺寸均为 0.3 m×0.6 m.

声波遇到低强度缺陷时会发生明显的绕射和透射现象,且透射波先于绕射波到达观测点.对比 4 种不同材料缺陷桩基

330.68μs 时刻的应力云图如图 9 所示.由图可以看出,透射波的传播速度随混凝土强度等级的增大而变快;且随缺陷混凝土强度的降低,缺陷右侧发射波和后续波产生的干涉现象更加明显.声波信号波形图对比分析发现,低强度缺陷桩基声波波形发生明显畸变,声波振幅随缺陷强度的降低而减小,当缺陷混凝土强度从 C20 降低到 C15 时声波振幅衰减幅度最大(见表 4).

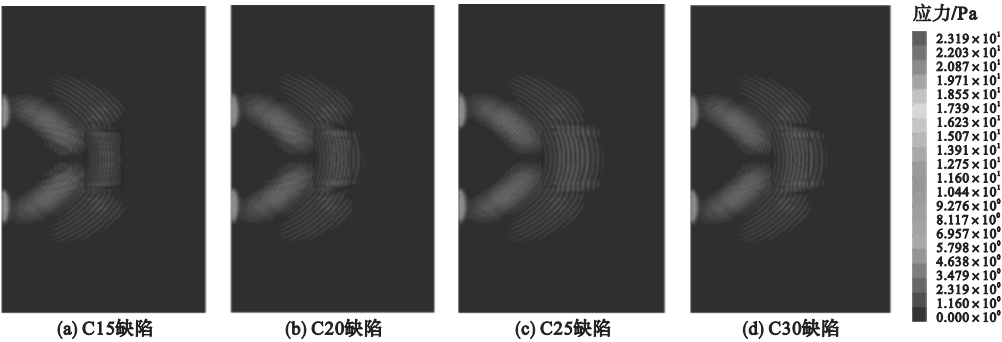


图 9 330.68 μs 时刻声波在不同强度等级混凝土缺陷桩基传播应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of sound waves passing through defective pile foundation with different strength grade at 330.68 μs

表 4 声波在不同混凝土强度等级缺陷桩中传播的波速和首波波峰幅值

Table 4 Propagation velocity and initial wave peak amplitude of sound waves in defective piles with different concrete strength levels

缺陷桩混凝土 强度等级	波速/ (m·s ⁻¹)	首波峰值/ 10 ⁻¹⁰ (m·s ⁻¹)
C15	3 628	2.86
C20	3 772	6.03
C25	3 874	8.56
C30	3 949	10.41

由表 4 可知,声波在缺陷桩基内传播波速和首波峰值随缺陷混凝土强度降低而明显减小,说明低强度缺陷对声波的传播速度影响较大,声波在低强度混凝土中传播时能量衰减较大.

从图 6(e)可见,与缺陷混凝土强度等级

C15、C20、C25、C30 对应主频分别为 48 000 Hz、48 700 Hz、48 860 Hz、48 900 Hz,其主频幅值分别为 7.68×10^{-9} 、 8.46×10^{-9} 、 9.03×10^{-9} 、 10.5×10^{-9} ,主频向低频漂移较小,缺陷混凝土强度的降低没有对主频产生大的影响.但主频幅值表现出与缺陷混凝土强度等级间有较好相关性,主频幅值随着缺陷混凝土强度等级降低而减小.当缺陷混凝土强度从 C30 降低到 C25,其主频幅值有大幅度减小,当缺陷混凝土强度从 C25 降低到 C15,其主频幅值逐步地小幅下降.

3 桩基声波 CT 成像分析

3.1 反演成像算法

目前桩基层析成像反演计算中大部分使用 ART 算法^[13].ART 算法的基本思想是:先给被重建的区域一个初始值,然后将得到的

走时残差一个个沿其射线方向均匀地反投影回去,同时不断地对重建图像进行修正直到满足计算精度为止. ART 算法计算内存少,计算速度快,受噪音干扰小,便于现场实时检测.

3.2 观测方式对桩基声波 CT 成像的影响分析

观测系统是指在被测混凝土结构或区域周围布置声波发射点与接收点,根据现场条件及被测混凝土尺寸、形状来布置发射点与接收点之间的空间位置关系,并确定各信号

发射点及接收点之间的间距^[12]. 在进行混凝土声波 CT 检测时,选择合适的观测系统对声波初至时间的精确判读及混凝土内部缺陷的准确成像显得特别重要,文中采用两侧观测系统来实现对桩基内部缺陷的成像. 两侧观测系统是在待测混凝土剖面两侧布置测点,单边分别发射对边同时接收的检测系统,两侧观测系统又分为平测(见图 10(a)所示发射点和接收点位置在高度上相一致)和斜侧(见图 10(b)所示发射点与接收点之间存在一定的高度差).

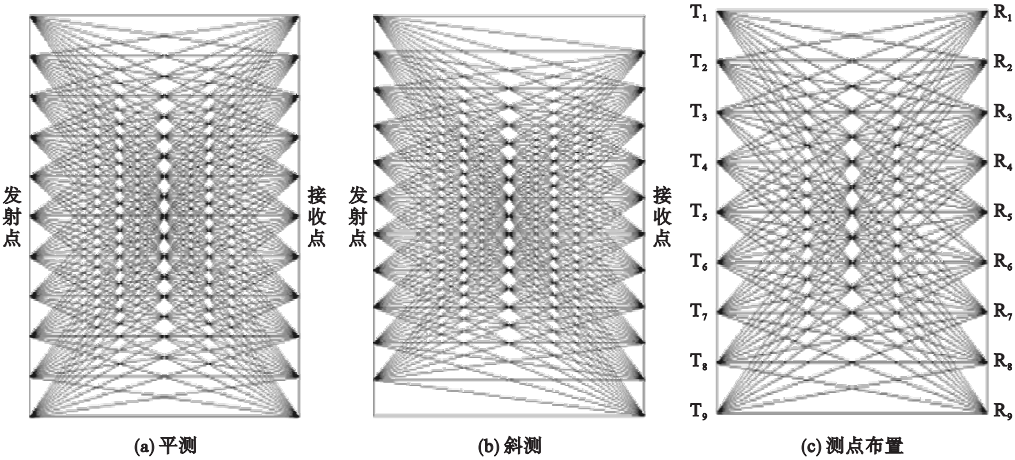


图 10 两侧观测系统及测点布置图

Fig. 10 Observation system of both sides and layout of measuring points

桩基内设置 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 、 $0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 、 $0.6\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 、 $0.8\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 四种不同尺寸的空洞,用于探讨平测和斜测两种不同的两侧观测系统对成像效果的影响. 利用 ANSYS/LS - DYNA 有限元软件模拟声波在缺陷桩基内部传播,在接收点提取速度时程曲线即波形数据,然后人工拾取声波初至波波峰时间,计算初至波波峰与震源首波波峰时间之差,得到声波在桩基中的走时数据^[14-17]. 利用声波的走时数据进行成像反演分析.

图 11(a) 中正常波速区的波速在 $4\,080\text{ m/s}$ 以上;图中小矩形框内及其周边为声速

异常区,声速在 $3\,952 \sim 4\,020\text{ m/s}$,声速异常区的分布情况与黑色框所示的实际缺陷大小相接近,四角较突出,图示结果较为准确地反映了缺陷位置和大小. 图 11(b) 中的深蓝色及浅绿色区大致呈平行四边形,声速范围为 $3\,952 \sim 4\,020\text{ m/s}$,中心低速区能大致反映缺陷位置,其形状虽不能准确反映缺陷实际大小,但可大概判断缺陷范围. 对比图 11(a) 和 (b) 可知,当空洞尺寸为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 时,平测法声波 CT 对缺陷的成像精度明显高于斜测法,虽然所呈现的伪像较斜测法多,但不影响对缺陷判断.

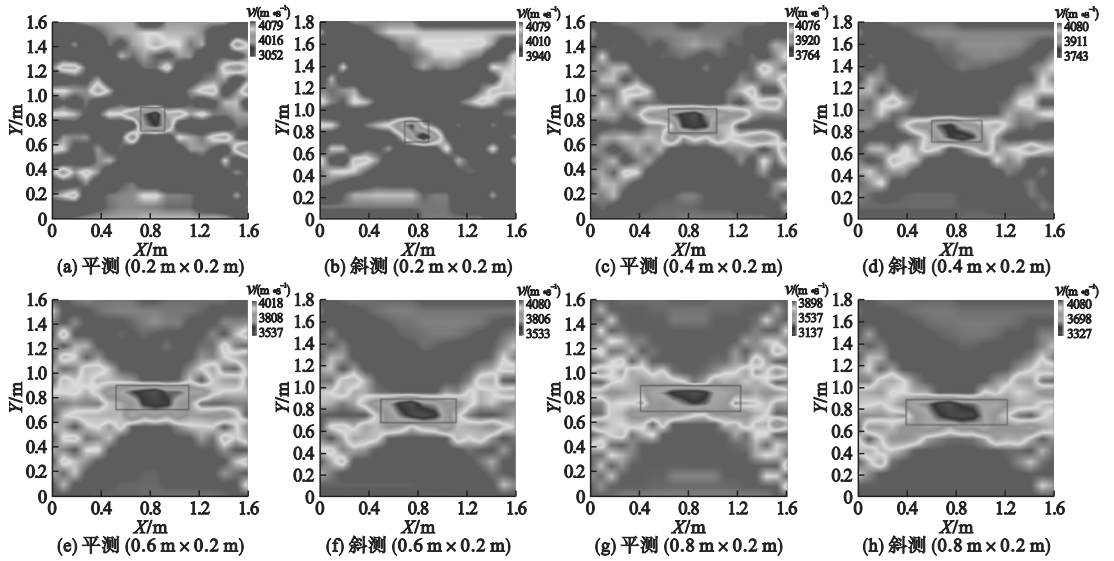


图 11 不同缺陷尺寸和观测方式下的桩基声波层析成像结果图

Fig. 11 Results of acoustic tomography of pile foundation with different defects size and observation mode

从图 11(c)、(d) 两图中心处浅绿色及深蓝色声速异常区域的声速范围在 3 750 ~ 4 020 m/s, 形状大致类似矩形, 与黑色框所示的实际缺陷面积相比稍大, 同时两图两侧都明显存在伪像; 图 11(c) 中心深蓝色声速异常区面积较图 11(d) 大, 波速大致在 3 900 m/s 以下, 说明平测法声波 CT 对空洞的反映比斜测法灵敏, 平测法声波 CT 图中的伪像比斜测法图多, 说明当空洞尺寸为 0.4 m × 0.2 m 时, 平测法声波 CT 成像效果比斜测法声波 CT 好。

图 11(e)、(f)、(g)、(h) 这 4 张图的中心声速异常区域为小矩形框内及其周边, 声速在大致在 4 000 m/s 以下, 该区域外围轮廓线与黑色矩形框区域所示的实际缺陷相比较, 只能模糊判断缺陷的位置; 中心缺陷两侧都存在较严重的伪像, 两侧零散分布的浅绿色伪像与中心缺陷低速区相连, 说明伪像已经影响对缺陷位置及形状的判断。对比分析可知, 当缺陷尺寸增大到 0.6 m × 0.2 m 和 0.8 m × 0.2 m 时, 斜测法声波 CT 成像图中的伪像相对较少, 与平测法声波 CT 相比成像精度较高。

通过对两套观测系统声波 CT 成像图的

对比分析可知: 当矩形缺陷竖向尺寸一定, 水平方向尺寸在 0.4 m 以内时, 采用平测法的声波 CT 成像精度高于斜测法; 但随着缺陷水平方向尺寸的增大, 斜测法成像效果比平测法稍好, 说明当缺陷水平方向尺寸大于 0.4 m 时, 宜采用斜测法进行声波 CT 成像。随着缺陷水平方向尺寸的增大, 两种观测方式的声波 CT 成像图的伪像均更为严重。斜测的结果比平测的结果的伪像较少, 即斜测的声波 CT 成像图中伪像对判断缺陷大小及位置的干扰较小。

分析认为出现伪像的原因可能是因缺陷形状为矩形, 其直角对声波传播造成散射或不规则的反射, 导致声波走时偏移; 也可能随着缺陷尺寸的增大, 缺陷对声波能量的衰减也變得越来越大, 使得声波初至波发生严重的衰减或畸变, 从而导致声波走时无法进行准确的拾取; 还可能由于射线密度不够所造成的, 所以对测点宜采用加密方式布置, 从而增大射线对成像区域的覆盖密度。

3.3 震源频率对桩基声波 CT 成像的影响分析

根据实际桩基工程中常用桩径, 选取 1.7 m、1.5 m、1.2 m 及 1 m 四种桩径的桩基

开展震源频率分别为 50 kHz 和 100 kHz 的声波成像效果分析. 有限元模型高度统一为 3.2 m, 并在桩基内部中心处设置了直径为 0.2 m 的孔洞缺陷, 桩基剖面成像范围在桩深 0.8 m ~ 2.4 m 处, 混凝土强度等级为 C40. 采取局部扇形扫测方案进行声波 CT 检测, 如图 10(c) 所示, 扫测高度 1.6 m, 在桩基左侧每隔 20 cm 布置 9 个发射点, 发射点分别为 $T_1 \sim T_9$, 同样在右侧每隔 20 cm 布置 9 个信号接收点分别为 $R_1 \sim R_9$ 号. 扇形扫测方式为 T_1 点发射声波信号, $R_1 \sim R_9$ 号同时采集到 9 组声波信号, 发射点由 T_1 到

T_9 依次发射信号 9 次, 总共采集 81 组声波数据.

图 12 中心黑色圆圈为实际孔洞大小及位置. 由图 12(a) 和(b) 中结果可以明显看出: 小圈内及其周边低速区的位置和形状与实际模型所设置的缺陷基本一致, 但图 12(a) 中低速区所呈现的形态相对于图 12(b) 较好, 说明在桩径为 1 m 时 100 kHz 频率的声波 CT 成像效果好于 50 kHz 频率. 虽然在图 12(a) 和(b) 两侧存着在较小面积且零散的声速低速区, 但不影响对缺陷的判断.

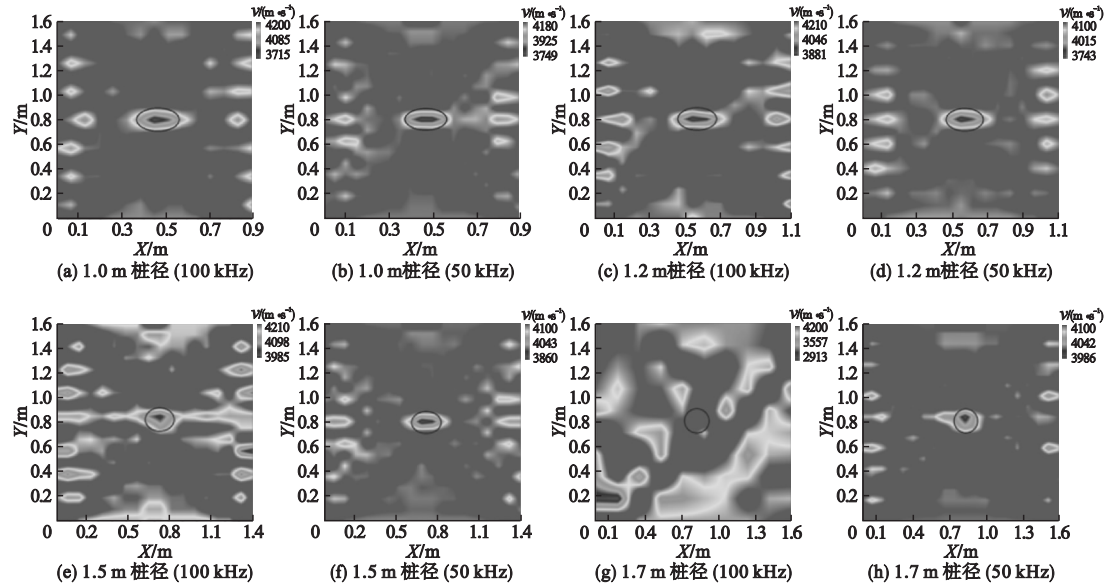


图 12 不同桩径和声波频率对应的声波层析成像效果图

Fig. 12 Effect diagram of acoustic tomography with different pile diameter and sound frequency

图 12(c) 中心低速区的位置和形态与实际缺陷大致类似, 但边缘轮廓弧度不够圆滑存在凸出区, 两侧分布着较多低速区. 相较于图 12(c), 图 12(d) 中的中心低速区形态较为圆滑, 两侧的伪像分布较少, 说明桩径为 1.2 m 时 50 kHz 频率的声波 CT 成像效果好于 100 kHz 频率.

从震源频率为 100 kHz 的声波 CT 图 12(e) 可见, 中心低速区位置与实际缺陷位置相一致, 但形态为不规则形状, 与黑色框中的实际剖面的孔洞形状有着较大差距; 同时两

侧区域和上下区域明显地分布着较多的低速区, 且分布范围较广, 对缺陷的判断产生较大的干扰. 从图 12(f) 震源频率为 50 kHz 声波 CT 图中浅绿色和深蓝色区域形状及位置与实际缺陷基本相似, 两侧较少零散低速区, 成像效果较好, 基本可以准确反映缺陷的实际情况.

从图 12(g) 和(h) 来看, 声波频率为 100 kHz 成像图中浅绿色及深蓝色分布十分混乱, 低速区已无法真实反映桩基内部缺陷的大小及位置. 而 50 kHz CT 图中中心低速区

位置和实际缺陷基本一致,中心低速区域面积比实际孔洞面积要大一些,但基本可以判断缺陷实际情况。

由上述可知,当桩径为 1 m 时,两种不同震源频率的声波 CT 图成像效果都能准确反映桩基内部实际情况,震源频率为 100 kHz 的声波 CT 成像效果比 50 kHz 的成像效果更为精确,这是由于当声波传播路径较小时,高频声波衰减较小,高频声波分辨率比低频声波分辨率高。但是随着桩径的增大,即声波传播距离的增大,声波频率为 100 kHz 的 CT 成像效果变得越来越差,且两侧伪像分布变得越复杂,对缺陷的判别干扰也越大。当桩径达到 1.7 m 时,基本无法真实反映实际桩基内部情况。这是由于随着传播距离的增大,100 kHz 频率声波能量衰减越快,以致声波初至时间无法准确判读。而声波频率为 50 kHz 的 CT 图中的伪像并未随着桩径的增大而增多,伪像对缺陷判别干扰较小,中心声速异常区随着桩径的增大而逐渐扩大,但扩大程度较小仍能准确反映实际缺陷大小和位置。50 kHz 频率的声波能量衰减程度与 100 kHz 衰减程度相比较小,说明 50 kHz 频率声波比较适合大直径桩基声波 CT 成像。

4 结 论

(1)混凝土桩基内部空洞缺陷的存在会使得声波传播变得更为复杂,波形发生明显畸变,后续波波幅震荡明显;声波检测信号的波速、首波波峰幅值和主频幅值均随缺陷竖向尺寸的增大以及缺陷混凝土强度的降低而发生明显的衰减,主频略向低频漂移;缺陷水平向尺寸的变化对声波波速和主频影响不大,但对声波能量衰减有一定的影响。

(2)对于桩径小于 1 m 的桩基建议采用 100 kHz 的声波检测,桩径大于 1 m 的桩基则建议采用 50 kHz 或者更低频率的声波;建

议采用平测法对水平尺寸小于 0.4 m 的缺陷进行桩基声波 CT 成像分析;当缺陷水平尺寸大于 0.4 m 时建议采用斜测法。

参考文献

- [1] 罗骥先,王五平. 桩基工程检测手册[M]. 北京:人民交通出版社,2010:263-273.
(LUO Qixian, WANG Wuping. Pile foundation test manual [M]. Beijing: China Communication Press, 2010: 263-273.)
- [2] 吴佳晔,安雪晖,田北平. 混凝土无损检测技术的现状和进展[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2009, 22(4): 4-7.
(WU Jiaye, AN Xuehui, TIAN Beiping. Status and progress of non-destructive test method in concrete [J]. Journal of Sichuan university of science & engineering (natural science), 2009, 22(4): 4-7.)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [4] 包龙生,赵宁,于玲,等. GM(1,1)模型在桩基超声波检测中应用分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 1022-1028.
(BAO Longsheng, ZHAO Ning, YU Ling, et al. Application of the grey model GM(1,1) in ultrasonic testing for pile foundation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 1022-1028.)
- [5] 李廷,徐振华,罗俊. 基桩声波透射法检测判据评判体系研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3165-3172.
(LI Ting, XU Zhenhua, LUO Jun. Study of a analysis method for collected data of integrity testing of piles by ultrasonic cross hole testing [J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(10): 3165-3172.)
- [6] 王述红,张鑫,赵振东,等. 声波透射法检测大直径灌注桩试验研究[J]. 东北大学学报

- (自然科学版),2011,32(6):868-870.
- (WANG Shuhong, ZHANG Xin, ZHAO Zhendong, et al. Study on cross-hole sonic logging detecting pouring piles of large-diameter [J]. Journal of northeastern university (natural science), 2011, 32(6): 868-870.)
- [7] 张献民,吕耀志. 声波透射法桩基检测中声测管斜弯小波分析[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 649-654.
- (ZHANG Xianmin, LU Yaozhi. Wavelet analysis for bend of pipes in acoustic penetrating test of pile foundation[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2012, 32(4): 649-654.)
- [8] 郭峰,杨勇,孙锐,等. 声波 CT 技术在混凝土结构中的运用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 256-258.
- (GUO Feng, YANG Yong, SUN Rui, et al. The application of sonic computed tomography on concrete structure internal defects[J]. Chinese journal of engineering geophysics, 2013, 10(2): 256-258.)
- [9] 张永乐,唐德高. 超声波层析成像在桩身结构完整性诊断中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3548-3552.
- (ZHANG Yongle, TANG Degao. Application of ultrasonic computerized tomography to diagnosis of pile construction integrity [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(11): 3548-3552.)
- [10] 刘润泽,田清伟,于师建,等. 结构混凝土三角网声波层析成像检测技术[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1907-1913.
- (LIU Runze, TIAN Qingwei, YU Shijian, et al. Triangular grid sonic computerized tomography for structural concrete [J]. Progress in geophysics, 2014, 29(4): 1907-1913.)
- [11] 崔军娥. 配筋率对混凝土声波 CT 反演精度的影响[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.
- (CUI Jun'e. Influence of steel ratio on the acoustic wave CT inversion accuracy of concrete structure [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.)
- [12] 朱正. 基桩超声波检测频域分析的应用研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- (ZHU Zheng. Application of spectrum analysis of ultrasonic testing in pile [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.)
- [13] 赵明阶,汪魁,彭爱红,等. 混凝土结构隐伏缺陷的超声波成像识别技术及其应用[M]. 北京:人民交通出版社,2016.
- (ZHAO Mingjie, WANG Kui, PENG Aihong, et al. Identification technology with ultrasound imaging for hidden defects of concrete structure and its application [M]. Beijing: China Communication Press, 2016.)
- [14] 张建清,刘润泽,李张明. 水工混凝土声波检测关键技术与实践[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- (ZHANG Jianqing, LIU Runze, LI Zhangming. Key technology and practice of acoustic wave test on hydraulic concrete [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [15] 郭峰,杨勇,孙锐,等. 声波 CT 技术在混凝土结构中的运用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 256-258.
- (GUO Feng, YANG Yong, SUN Rui, et al. The application of sonic computed tomography on concrete structure internal defects [J]. Chinese journal of engineering geophysics. 2013, 10(2): 256-258.)
- [16] DOBRZANSKI L A, TOMICZEK A E, DZIAKIEWICZ G. FEM modeling of magnetostrictive composite materials [J]. Archives of materials science, 2012, 53(1): 46-52.
- [17] LI Wang, WANG Bowen, ZHI Hua, et al. Magneto-thermo-mechanical characterization of giant magnetostrictive materials [J]. Rare metal, 2013, 37(5): 486-489.