

# 声波透射法测桩波形畸变系数计算与分析\*

魏奎焯<sup>1,2</sup>, 张宏兵<sup>1</sup>, 宋新江<sup>2</sup>, 朱士彬<sup>2</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院 南京, 211100)

(2. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院 蚌埠, 233000)

**摘要** 声波透射法主要采用声学参数和波形畸变程度来判断基桩完整性,但是波形畸变系数无法定量计算,难以精确判定其畸变程度。通过频率域测点能量统计法计算波形畸变系数及畸变系数临界值,使用频谱及小波包分析技术探讨了完整波形和畸变波形(桩底沉渣测点、低强度不密实测点、断桩测点)的特征,并基于 3 层小波包分解信号的频带能量构造特征向量。结果表明:桩底沉渣测点的谱函数呈台阶状,断桩测点频谱能量主要分布在低频部分;完整测点的特征向量值最大,断桩测点的特征向量值最小,低强度不密实测点的特征向量值具有 1 个上凸拐点。

**关键词** 声波透射法; 小波包分析; 特征向量; 波形畸变系数; 频率域测点能量统计法

**中图分类号** TH762; TU473.1

## 引言

目前,灌注桩的完整性检测方法主要有钻芯法、低应变法、高应变法及声波透射法<sup>[1-2]</sup>。钻芯法只能反映钻孔部位混凝土质量。低应变法受激振能量的限制,对深部及桩底缺陷反映不灵敏,并且当桩身存在多个缺陷时,反射波相互叠加,形成复合波,难以准确判断桩身缺陷的类型、程度及位置<sup>[2]</sup>。高应变法通常只能判定出接近桩顶的第 1 个缺陷,对其他缺陷较难以判别<sup>[3]</sup>。声波透射法不受桩径桩长的限制,具有可对基桩全长范围内的桩体混凝土缺陷、均匀性及强度等进行检测的优势,在钻孔灌注桩完整性检测中有着广泛的应用<sup>[4-9]</sup>。声波透射法采用声学参数(声速、首波振幅、频率及声时-深度曲线上相邻两点连线的斜率与声时差的乘积)来反映桩身混凝土的缺陷、均匀性及强度。随着分类标准量化研究的深入,学者提出采用相对能量解释方法和三维层析成像分析技术判别方法进行判断<sup>[7,10-13]</sup>。针对大体积混凝土,部分学者提出波形畸变法<sup>[14]</sup>及小波包分析法<sup>[15]</sup>来判别混凝土缺陷。

笔者针对灌注桩完整性检测中波形的畸变程度目前只能定性分为波形完整、轻微畸变、明显畸变及严重畸变 4 类,尚无定量计算方法的问题,基于频率域测点能量统计法计算了波形畸变系数,为灌注桩的波形畸变程度定量判断提供依据,使用频谱分析

及小波包分析技术探讨了完整测点、桩底沉渣测点、断桩测点及低强度不密实测点的频谱特征和频带能量分布,并构造了其特征向量。

## 1 声波透射法波形畸变计算及分析

### 1.1 频率域测点能量统计法

混凝土为集结型复合材料,由于砂浆与骨料及各种缺陷的存在,使混凝土中具有广泛的异质界面,当混凝土中存在缺陷时,散射损失将增大,并且产生频漂(高频成分衰减快,低频成分衰减慢,主频向低频端移动),进而产生波形畸变。从本质上讲,散射损失所造成的波形畸变是高频能量被缺陷吸收所引起。由于现场进行完整性检测时,一般按照一定的测点间距采样,每个实测剖面具有多个测点,因此可计算每个测点的能量(为了便于计算,可在频率域中进行),并统计实测剖面中各测点的能量,进而从能量的角度去分析波形畸变。笔者将该方法称为频率域测点能量统计法,具体内容如下。

首先,将各测点的数据进行傅里叶变换,设频率域中频谱函数为  $F(f)$ ,则各测点的总能量为

$$E = \int_{f_1}^{f_2} F^2(f) df \quad (1)$$

若采集数据中共有  $M$  个测点,每个测点采样长度为  $N$ ,则各测点总能量  $E$  离散形式为

\* 国家自然科学基金资助项目(41674113, 41374116)  
收稿日期:2017-11-19;修回日期:2018-02-01

$$E = \sum_{n=1}^N |F^2(f_n)| \quad (2)$$

其次,为了判定波形有无畸变,取  $E_c$  为能量异常判断临界值,其值可按下式计算

$$E_c = E_m - 2s \quad (3)$$

其中: $E_m$  为所有测点能量的平均值; $s$  为测点能量标准差。

当测点能量  $E \geq E_c$  时,判断为无波形畸变测点,测点频谱能量用  $E_n$  表示;否则,判断为波形畸变测点。

最后,用波形畸变系数(无量纲)来表示波形的畸变程度,考虑到每根测试桩的差异性,采用无波形畸变测点的能量平均值进行计算,以突显波形畸变程度,其计算公式为

$$D = \frac{E}{E_n} \quad (4)$$

其中: $E_n$  为无波形畸变各测点频谱中各频率成分能量之和的平均值。

### 1.2 畸变点特征向量构造

为了对灌注桩中常见的桩底沉渣、低强度不密实桩及断桩的畸变波形进行深层次的分析,首先采用小波包分析技术对各测点信号进行小波包分解,进而计算各频带信号总能量,最后根据各频带能量构造出各测点的特征向量。

将各测点信号进行 3 层小波包分解并重构小波包分解系数,记为  $S_{30}, S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36}$  及  $S_{37}$ ,则各频带信号总能量为

$$E_{3j} = \int_0^{t_1} |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{n=1}^N |X_{jn}|^2 \quad (5)$$

其中: $E_{3j}$  为第  $j$  个分解信号的总能量; $X_{jk}$  ( $j=0 \sim 7; k=1 \sim N$ ) 为重构信号  $S_{3j}$  的离散幅值; $k$  为采样点数。

归一化处理后特征向量可以表示为

$$T = \left[ \frac{E_{30}}{E}, \frac{E_{31}}{E}, \frac{E_{32}}{E}, \frac{E_{33}}{E}, \frac{E_{34}}{E}, \frac{E_{35}}{E}, \frac{E_{36}}{E}, \frac{E_{37}}{E} \right] \quad (6)$$

其中: $E$  为各分解信号能量的总和。

## 2 透射波波形畸变程度判定

图 1 为某工地桩底沉渣缺陷桩的部分波列图。数据由 SY8 基桩超声波 CT 成像测试仪采集,测点间距为 0.2 m。可以看出,49.75 m~48.75 m 的各测点(依次为测点 1~6)存在不同程度的波形畸变,按照定性分类,可将测点 1,2 定为明显畸变波形,测点 3,4 定为严重畸变波形,测点 5 定为轻微畸变波形,测点 6,7,8 为无畸变波形。

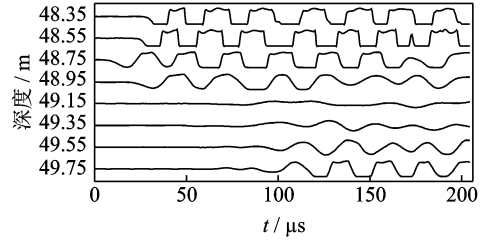


图 1 桩底沉渣缺陷桩部分波列

Fig. 1 Part wave train graph of the defect pile at the bottom

为了定量分析波形畸变程度,对整根桩(共有 249 个测点)使用频率域测点能量统计法计算波形畸变系数  $D$ 。图 2 为图 1 中桩底沉渣缺陷桩测点-波形畸变系数关系图。可以看出,波形畸变系数临界值为 0.676 9,测点 1~8 的波形畸变系数分别为 0.614 8,0.329 6,0.114 1,0.054 2,0.705 9,1.213,1.398 及 1.285。通过比较可知,测点 1~4 均为畸变波形,且畸变程度可根据畸变系数进一步划分。

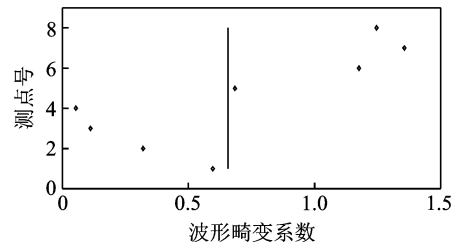
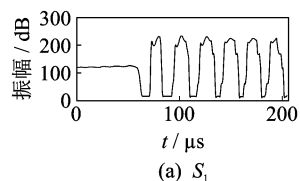


图 2 桩底沉渣缺陷桩测点-波形畸变系数关系图

Fig. 2 Measuring point-waveform distortion coefficient relation graph of the defect pile with bottom sediment

## 3 波形畸变分析及特征向量构造

图 3~6 分别为完整测点、桩底沉渣测点、低强度不密实测点及断桩测点的原始信号(信号均为某工地现场采集)和进行 3 层小波包分解后的信号(采用 db1 小波基)。可以发现,完整测点与低强度不密实测点的频谱能量较集中,主频均为 48.83 kHz,但完整测点的幅度峰值较大,约为低强度密实测点的 3.7 倍,桩底沉渣测点频谱函数呈阶梯状,断桩的频谱能量较为分散。将 4 种类型信号的高频截止频率统一定为 90 kHz,则每个频带范围为  $90/2^3 = 11.25$  kHz,小波包分析中每个信号对应的频带范围如表 1 所示。在现场检测过程中,采用 RSM-DCT(W) 钻孔电视测试仪对上述 4 种情况进行了验证,验证情况如图 7 所示。



(a)  $S_1$

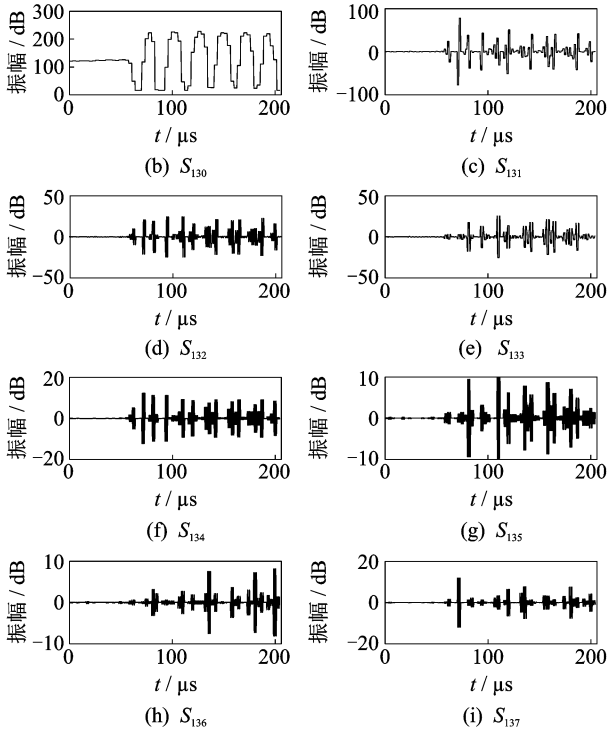


图 3 完整测点信号小波包分解

Fig. 3 Normal measuring point signal by wavelet packet decomposition

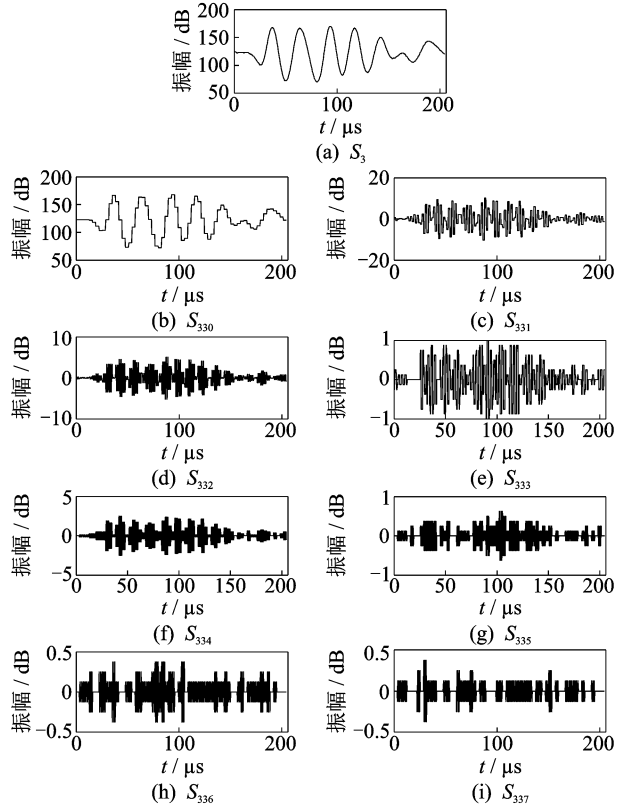


图 5 低强度不密集信号小波包分解

Fig. 5 Low intensity and non dense measuring point signal by wavelet packet decomposition

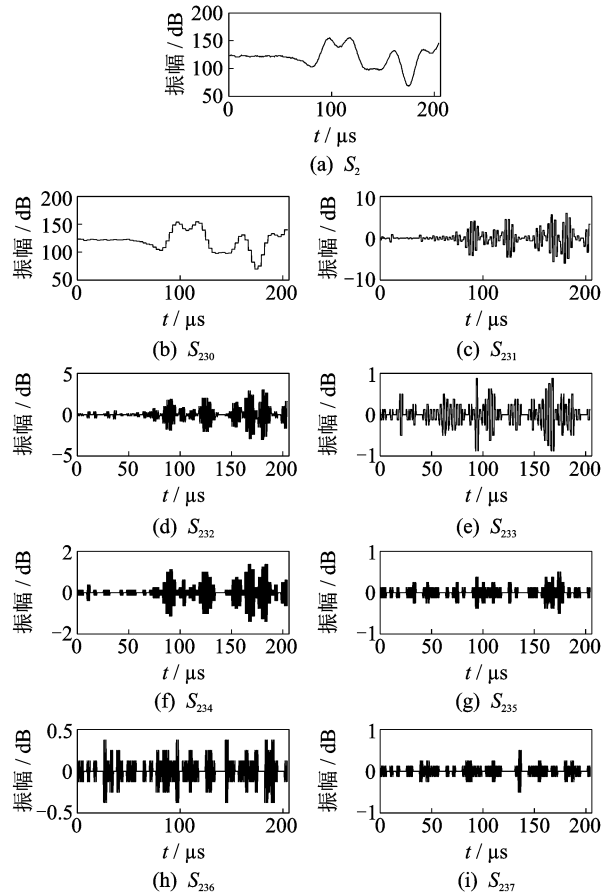


图 4 桩底沉渣信号小波包分解

Fig. 4 Defect pile of bottom sedimen measuring point signal by wavelet packet decomposition

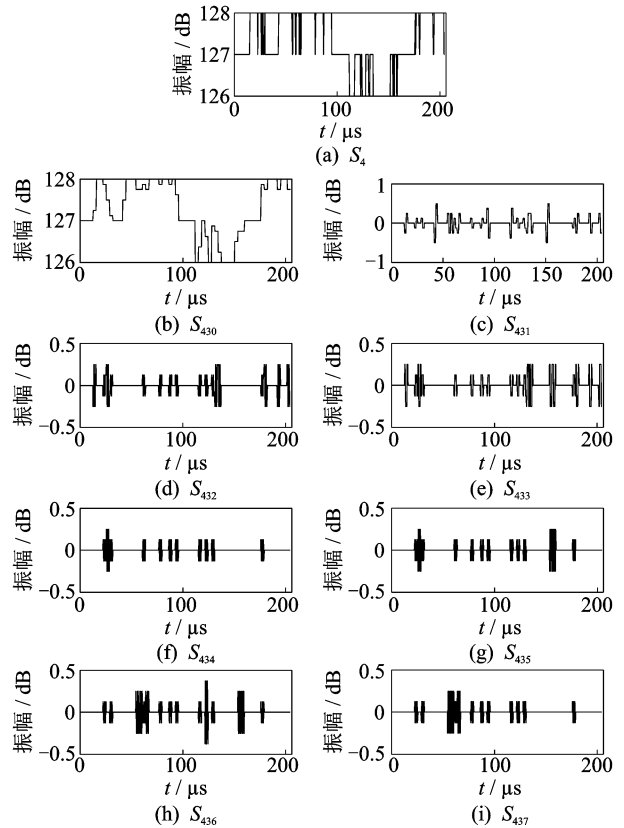


图 6 断桩信号小波包分解

Fig. 6 Broken pile measuring point signal by wavelet packet decomposition

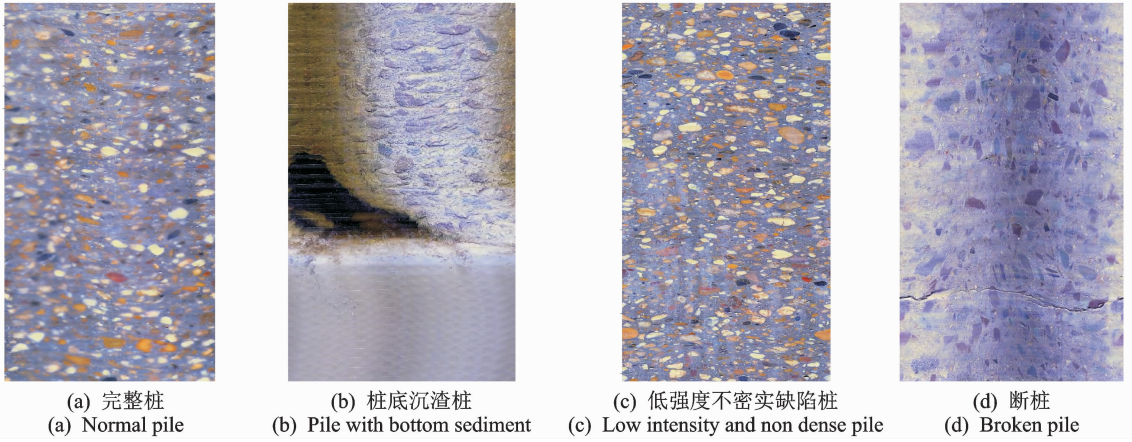


图 7 钻孔电视图

Fig. 7 Drilling TV graph

表 1 小波包分解各信号频带范围

Tab. 1 Signal band range of wavelet packet decomposition

信号	S <sub>30</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>34</sub>	S <sub>35</sub>	S <sub>36</sub>	S <sub>37</sub>
频带范围/kHz	0~11.25	11.25~22.50	22.50~33.75	33.75~45.00	45.00~56.25	56.25~67.50	67.50~78.75	78.75~90.00

图 8 分别为完整测点、桩底沉渣测点、低强度不密实测点及断桩测点频谱。可以看出,桩底沉渣测点的谱函数呈台阶状,断桩测点的频谱能量主要分

布在低频部分,完整测点与低强度不密实测点频谱特征较相似。通过式(5)计算各分解信号的能量,得到各测点的特征向量如表 2 所示。

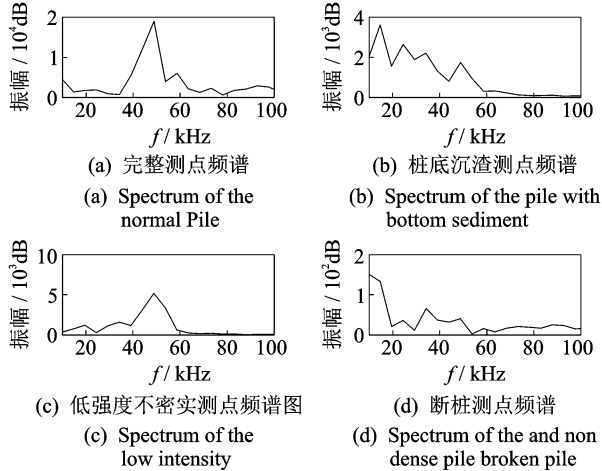


图 8 测点频谱

Fig. 8 Spectrum of measuring points

图 9 为频带与特征向量的关系。可以发现,完整测点的特征向量值最大,断桩测点的特征向量值最小,低强度不密实测点与桩底沉渣测点的趋势一致,频带 3,5 出现上凸拐点,但低强度不密实测点的特征向量值大于桩底沉渣测点。

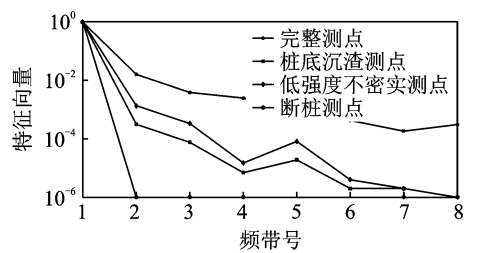


图 9 频带-特征向量关系

Fig. 9 Frequency band-eigenvector relation graph

表 2 各测点特征向量

Tab. 2 Eigenvector of each measuring point

缺陷类型	特征向量
正常测点	(9.758×10 <sup>-1</sup> , 1.605×10 <sup>-2</sup> , 3.858×10 <sup>-3</sup> , 2.469×10 <sup>-3</sup> , 8.82×10 <sup>-4</sup> , 4.23×10 <sup>-4</sup> , 1.84×10 <sup>-4</sup> , 3.04×10 <sup>-4</sup> )
低强度不密实点	(9.982×10 <sup>-1</sup> , 1.342×10 <sup>-3</sup> , 1.5×10 <sup>-5</sup> , 8.1×10 <sup>-5</sup> , 4×10 <sup>-6</sup> , 2×10 <sup>-6</sup> , 1×10 <sup>-6</sup> )
桩底沉渣测点	(9.999×10 <sup>-1</sup> , 3.14×10 <sup>-4</sup> , 7.5×10 <sup>-5</sup> , 7×10 <sup>-6</sup> , 1.9×10 <sup>-5</sup> , 2×10 <sup>-6</sup> , 2×10 <sup>-6</sup> , 1×10 <sup>-6</sup> )
断桩	(9.999×10 <sup>-1</sup> , 1×10 <sup>-6</sup> , 1×10 <sup>-6</sup> , 0, 0, 1×10 <sup>-6</sup> , 0)

## 4 结 论

1) 通过频率域测点能量统计法计算了波形畸

变系数及波形畸变系数临界值,通过两者相互比较即可判断出波形的畸变程度。

2) 桩底沉渣测点的谱函数呈台阶状,断桩测点的频谱能量主要分布在低频部分,完整测点与低强

度不密实测点频谱特征较相似。

3) 完整测点的特征向量值最大,断桩测点的特征向量值最小,低强度不密实测点与桩底沉渣测点的趋势一致,频带5出现上凸拐点,但低强度不密实测点的特征向量值要大于桩底沉渣测点。

### 参 考 文 献

- [1] 张宏,鲍树峰,马晔. 基于声波透射法的大直径超长桩的完整性分析[J]. 路基工程,2007(5):45-47.  
Zhang Hong, Bao Shufeng, Ma Ye. Integrity analysis of large diameter and super long pile based on acoustic wave transmission method[J]. Subgrade Engineering, 2007(5): 45-47. (in Chinese)
- [2] 陈国平,钟正强,刘志林. 大直径超长桩桩身缺陷的超声波透射法检测研究[J]. 中外公路,2006,26(6):13-16.  
Chen Guoping, Zhong Zhengqiang, Liu Zhilin. Study on the ultrasonic transmission method of large diameter and super long pile defects[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(6): 13-16. (in Chinese)
- [3] 韩亮,王正成. 声波透射法新技术在桥梁灌注桩检测中的应用[J]. 铁道建筑,2006(10):1-4.  
Han Liang, Wang Zhengcheng. The application of the new technique of acoustic wave transmission method in the detection of bridge pile [J]. Railway Engineering, 2006(10):1-4. (in Chinese)
- [4] 肖春喜. 超声波透射法在检测大直径灌注桩完整性中的应用[J]. 岩土力学,2003,24(S1):169-171.  
Xiao Chunxi. Application of ultrasonic transmission method to detecting integrity of large-diameter bored cast-in-place piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1):169-171. (in Chinese)
- [5] 胡在良,李晋平,张佰战,等. 基桩声波透射法检测技术的应用研究[J]. 铁道建筑,2007(12):20-22.  
Hu Zailiang, Li Jinping, Zhang Baizhan, et al. Study on application of detection technology of foundation pile by ultrasonic transmission method [J]. Railway Engineering, 2007(12):20-22. (in Chinese)
- [6] 褚广辉,许锡斌,吴同情. 声波透射法在打入桩无损检测中的应用[J]. 水运工程,2010(7):31-34.  
Chu Guanghui, Xu Xibin, Wu Tongqing. Application of acoustic transmission method in nondestructive testing of driven pile [J]. Port and Waterway Engineering, 2010(7): 31-34. (in Chinese)
- [7] 韩亮. 基桩声波透射法检测新技术及其应用[J]. 工程力学,2007,24(S1):141-145.  
Han Liang. New technology and application of cross-hole sonic logging on piles[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(S1): 141-145. (in Chinese)
- [8] 郑明燕,孙杨波. 声波透射法在灌注基桩完整性检测中的应用研究[J]. 铁道建筑,2010(10):137-139.  
Zheng Mingyan, Sun Yangbo. Study on application of acoustic transmission method in grouting in pile integrity test [J]. Railway Engineering, 2010 (10): 137-

139. (in Chinese)

- [9] 张献民,吕耀志. 声波透射法桩基检测中声测管弯斜小波分析[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(4):649-654.  
Zhang Xianmin, Lü Yaozhi. Wavelet analysis of acoustic tube bending in the detection of pile foundation by acoustic penetrating test method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 649-654. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 孟军涛,颜胜才,陈辉,等. 混凝土灌注桩桩身质量缺陷超声波透射法检测分析[J]. 铁道建筑,2014(6):57-59.  
Meng Juntao, Yan Shengcai, Chen Hui, et al. Detection and analysis of bored concrete pile quality defect of acoustic transmission method [J]. Railway Engineering, 2014(6):57-59. (in Chinese)
- [12] 黄柳云,王家全,吴辉琴,等. 基于声透法和钻芯法建立桩基混凝土测强曲线的研究[J]. 混凝土,2013(1):135-138.  
Huang Liuyun, Wang Jiaquan, Wu Huiqin, et al. Research on the concrete strength of percussion drilling pile tested by crosshole sonic logging [J]. Concrete, 2013(1):135-138. (in Chinese)
- [13] 董承全,李晋平,熊昌盛,等. 声波透射法桩身完整性检测分类标准量化初探[J]. 铁道建筑,2010(4):66-68.  
Dong Chengquan, Li Jinping, Xiong Changsheng, et al. Quantitative study on the classification standard of pile completeness by acoustic transmission method[J]. Railway Engineering, 2010(4):66-68. (in Chinese)
- [14] 单远铭,吴耀,吴慧敏. 超声波频谱畸变系数在混凝土缺陷区的变化[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1999,26(1):88-91.  
Shan Yuanming, Wu Yao, Wu Huimin. Variation of ultrasonic frequency spectrum distortion coefficient in concrete defect area [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 1999, 26(1):88-91. (in Chinese)
- [15] 张小琼,林维正. 小波包分析在混凝土检测中的应用[J]. 声学技术,2002,21(3):134-136.  
Zhang Xiaoqiong, Lin Weizheng. Wavelet packets analysis in the application of concrete detecting[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(3):134-136. (in Chinese)



**第一作者简介:**魏奎焱,男,1984年12月生,博士、工程师。主要研究方向为工程物探及岩土工程检测等。曾发表《道路碎石垫层异常缺陷的探地雷达响应特征》《河海大学学报:自然科学版》2015年第43卷第2期等论文。  
E-mail:weikuaiye@126.com