

# 基于低应变法的桩基完整性检测方法研究

车小兵, 姚多喜

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: 705854809@qq.com

收稿日期: 2021年6月23日; 录用日期: 2021年7月7日; 发布日期: 2021年7月23日

## 摘要

桩基础对保证建构筑物的安全具有重要意义, 桩基的质量检测是工程建设过程中至关重要的一个环节, 已发展为一项重要课题, 大量学者对其开展了研究, 并取得了显著的成果。文章基于前人所做的工作, 对基于低应变反射波法确定桩基完整性的相关研究进行了阐述, 介绍了桩侧激振法、双速度法、超震波法、弯曲波法四种桩基完整性检测方法, 系统地梳理了四种方法的原理、优缺点及在桩基完整性检测方面的应用, 旨在能够为相关研究提供一定的参考。

## 关键词

桩基完整性检测, 低应变反射波法, 桩侧激振法, 双速度法, 超震波法, 弯曲波法

# Study on Pile Integrity Inspection Method Based on Low Strain Method

Xiaobing Che, Duoxi Yao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui  
Email: 705854809@qq.com

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Jul. 7<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

The pile foundation is of great significance to ensure the safety of the building. The quality inspection of the pile foundation is a vital link in the process of engineering construction. It has developed into an important subject. A large number of scholars have carried out research on it and achieved remarkable results. Based on the work done by the predecessors, this article describes the related research on the determination of the integrity of the pile foundation based on the low-strain reflected wave method, and introduces four types of piles: detection of pile foundation

**integrity, double velocity method, Ultra-seismic, and Bending waves. The principles, advantages and disadvantages of the four methods and their applications in pile foundation integrity detection are systematically sorted out, aiming to provide a certain reference for related research.**

## Keywords

**Detection of Pile Foundation Integrity, Low Strain Reflected Wave Method, Pile Side Excitation Method, Double Velocity Method, Ultra-Seismic, Bending Waves**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

桩基础凭借承载力高、强度和刚度大、工后沉降小、适应范围广、耐久性好等优点,在现代土木工程尤其是高层建筑、桥梁、港口码头等重要工程中得到广泛应用,已经成为最常见的一种基础形式。桩基础对于保证建构筑物的安全具有重要意义,桩基的质量检测是工程建设过程中至关重要的一个环节,已发展为一项重要课题。针对桩基的质量检测这一课题,大量学者进行了研究,取得了许多成果,如提出采用钻芯法[1][2][3][4]、声波透射法[1][5][6][7][8]、低应变反射波法[1][4][6]-[12]、高应变反射波法[13][14][15][16]等方法来检测桩基质量。目前,最常见的桩基检测方法为低应变反射波法,该方法具有快捷、经济、无损等优点。但在工程实践过程中逐渐发现:在桩顶自由的情况下,采用低应变反射波法对桩基进行完整性检测较为理想,但桩顶上部有结构存在时,该方法并不适用,存在一定的局限性,为解决这一问题,部分学者在低应变反射波法的基础上进行改进,提出采用桩侧激振法、双速度法、超震波法、弯曲波法等方法检测桩基的完整性。本文在已有研究成果的基础上,通过对基于低应变反射波法确定桩基完整性的相关研究进行了阐述,包括桩侧激振法、双速度法、超震波法和弯曲波法,系统地梳理了各种研究方法的基本原理及前人所作的工作,旨在能够为相关研究提供一定的参考。

## 2. 低应变反射波法

### 2.1. 低应变反射波法基本原理

低应变反射波法基于应力波理论,以一维弹性杆平面应力波的波动理论为基础。当在桩顶施加一瞬时动力冲击后,就有弹性波以速度  $c$  沿桩身向下传播。当桩身的波阻抗  $Z$  发生明显变化时,如桩身断裂、夹泥、缩颈、扩径、离析、桩底等,应力波将会产生反射向上传播。采用加速度传感器进行响应信号接收,在计算机上对接收的信号分析处理,识别来自桩身不同部位的反射信号,进而评价桩身完整性,判定桩身缺陷的程度及位置,低应变反射波法示意图如图 1 所示。

缺陷位置按公式(1)或公式(2)计算:

$$x = \frac{1}{2000} \times \Delta t_x \times c \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{2} \times \frac{c}{\Delta f'} \quad (2)$$

式中:  $x$  为桩身缺陷至传感器安装点的距离(m);  $\Delta t_x$  为速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差(ms);  $c$  为受检桩身波速(m/s),无法确定时用  $c_m$  值替代;  $\Delta f'$  为幅频信号曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差(Hz)。

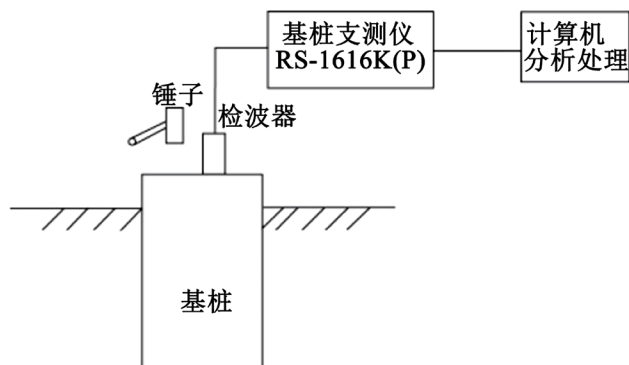


Figure 1. Schematic diagram of low strain reflected wave method  
图 1. 低应变反射波法示意图

## 2.2. 低应变反射波法的改进

### 2.2.1. 桩侧激振法

桩侧激振法, 就是采用低能量瞬态激振方式在桩身侧面激振, 实测桩身侧面的速度时程曲线, 通过波动理论分析, 对桩身完整性进行判定的检测方法, 是 JTJ249-2001《港口工程桩基动力检测规程》中针对上部有承台的桩的检测推荐的一种方法。该方法理论基础仍为一维弹性应力波理论, 但是激振方式与传统的反射波法不同, 是在桩侧竖向激振。同时, 传感器不是安装在桩顶面, 而是安装在桩身侧面。

通过在桩侧施加一纵向冲击力, 使桩身产生应变, 并以波动的形式传播, 遇到桩身阻抗差异界面后, 产生反射信号, 为安装在激振源附近的传感器所接收、记录。根据现场采集的时域曲线进行时域和频域分析, 以此判定桩的完整性, 侧向激振测试系统如图 2 所示。

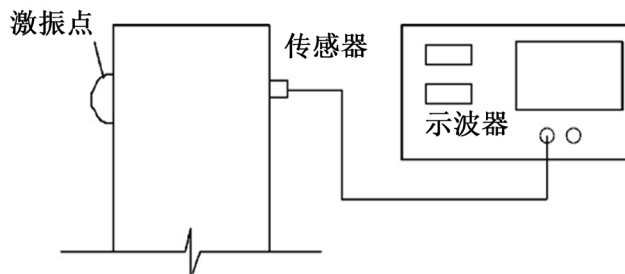


Figure 2. Diagram of lateral excitation test system  
图 2. 侧向激振测试系统图

高飞[17]运用桩侧激振接收法, 结合众多实际工程经验, 采用高黏结强度的耦合剂进行耦合, 同时采用敲击膨胀螺栓的方式进行激振, 对位于黄浦江西侧的上海吴泾某造船码头 90 根基桩进行完整性检测, 实验结果表明: 桩侧激振接收法可以较好地进行既有结构下基桩完整性检测, 为相关工程技术人员提供参考。苗永红等[18]对混凝土桩采用侧向激振, 分析其反射波形特征。以钢筋混凝土梁试件作为模型桩进行室内模拟试验, 同时将桩侧激振法应用于工程实例中, 结合传统弹性反射波法结果来进行比较分析, 最终试验结果验证了桩侧激振法的有效性。采用桩侧激振法, 结合时域法分析波形不失为一种有效的无损检测方法, 该方法操作简单、迅速, 适应于桩顶为非自由端的桩或旧有建筑物的原有桩基检测。姜卫方等[19]对采用桩侧激振法, 分别对一高桩码头基桩和由于船舶撞击事故而断裂的桩基进行完整性检测, 试验结果表明: 该方法的检测结果与理论分析、动测结论取得了良好的一致性, 从而验证了该方法的有效性。

### 2.2.2. 双速度法

双速度测试方法原理上仍是一种反射波法, 使用双速度法检测桩基时, 在桩顶平台上沿桩轴线施加激振信号产生应力波, 沿桩侧安装两个加速度传感器, 同时采集两个加速度曲线, 根据两个传感器的距离及响应的的时间差可以确定两个传感器间桩身的平均波速, 并从实测曲线中分离出有效的上行应力波, 进而判断桩身完整性。

如图 3 所示, 在桩的侧面, 采用两个加速度计  $A_1$  和  $A_2$ , 分别安装在距桩顶深度为  $z_1$  和  $z_2$  处。测试时在  $A_1$  之上某一位置(一般为桩顶)冲击桩身, 可得  $A_1$  和  $A_2$  的速度信号。 $A_1$  和  $A_2$  的记录中包含了上行波和下行波速度, 如图 1。图 1 显示了应力波的传播途径及对  $A_1$  和  $A_2$  的影响, 以及示意了两个记录随时间的变化。时间  $t_1$  和  $t_2$  分别是  $A_1$  和  $A_2$  下行应力波的到达时间, 而  $t_3$  和  $t_4$  分别是  $A_2$  和  $A_1$  上行应力波(桩底反射波)的到达时间,  $A_x$  为缺陷部位[20]。

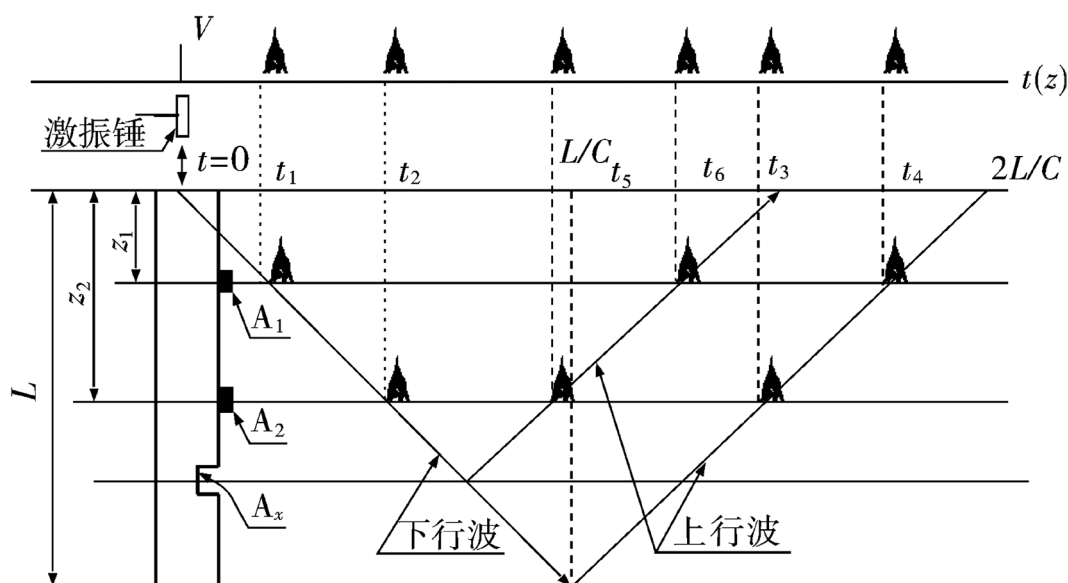


Figure 3. Schematic diagram of the two-velocity method stress wave propagation and velocity-time change  
图 3. 双速度法应力波传播及速度 - 时间变化示意图

利用双速度传感器所测得的两个曲线的时间差, 可由式(3)计算桩身波速

$$c = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3)$$

式中  $\Delta z$  为加速度计  $A_1$  和  $A_2$  之间的已知距离( $z_2 - z_1$ );  $\Delta t$  为到达  $A_1$  和  $A_2$  时间差( $t_2 - t_1$  或  $t_4 - t_3$ )。

桩身波速确定后, 就可得到桩的实际长度, 核验了桩长。在图 4 中, 沿桩身两个不同位置实测两个加速度信号, 可求出位置  $A_x$  和桩底  $L/c$  处上下行波速度分量。通过这些信号可判断桩阻抗的变化以及桩底反射, 由式(4)计算出缺陷的位置。

$$L(A_x) = \frac{(t_6 - t_1)c}{2} + z_1 \text{ 或 } L(A_x) = \frac{(t_5 - t_2)c}{2} + z_2 \quad (4)$$

式中  $L(A_x)$  为桩身缺陷位置。

蔡以智[21]先对双速度法的波速和方向滤波进行了理论计算, 再采用双速度法进行现场测试, 验证了双速度法的可行性。韩亮[22]详细介绍了双速度法的基本原理, 通过实例验证了双速度法测试既有基础下基桩的完整性是可行的。黎凯旻等[23]基于双速度法思想, 解析出了只含有桩基信息的上行应力波; 然后

对茂名地区输电铁塔的桩基进行现场测量, 结果表明: 双速度法可用于检测输电铁塔桩基完整性, 但检测结果的准确性受敲击桩基的力度、敲击点的选择及敲击手锤材料的选择等影响, 还需继续深入研究。赵冉等[24]对室内制作的带承台模型桩进行双速度测试研究, 分析该方法的可行性。通过实际现场检测, 验证了该成套的双速度测试技术完全可以用于现场带承台基桩的无损完整性检测, 方向滤波后的上行波清晰, 可以准确判断缺陷位置及大小、桩底位置等。

相对于传统低应变反射波法, 双速度法具有以下特点: a) 在桩长未知情况下, 可利用实测的两个波速计算桩身纵波波速, 从而核验桩长; b) 对于有承台桩, 由于传感器安装在承台之下的桩身, 减少了承台反射波的干扰; c) 后期处理可排除次生反射波影响, 得到含有桩基信息的上行应力波。但该方法也有其局限性, 如检测过程中, 基桩要有 $\geq 1.5$  m 的出露段用来安装传感器, 增加了工时和成本, 在无承台的条件下优势不明显。

### 2.2.3. 超震波法

超震波法的基本原理与常规反射波法类似, 其测试原理是利用一系列传感器接收测点的应力波, 并通过信号分析处理实现滤除噪声和上下行波分离, 根据上下行波的交汇, 可以确定反射截面的位置[25]。

如图 4 所示, 接收器以等距离的方式放置于基桩外露部分的侧边, 在冲击锤敲击桩顶的瞬间, 同时启动接收器接收其所在位置之质点速度或位移的时间历时曲线, 接收器所记录者, 通常为平行于基桩轴线方向上之质点振动速度。再变换接收器的位置, 重复操作得到多组数据, 以进行下一步的资料处理工作。当位在不同深度的接收器收集到完整数据后, 便可从每条速度历时曲线上判读直达应力波与桩底反射波到达该接收器之时间, 将各接收器之深度对其直达波与反射波到达时间作图, 即可得到深度与波的时间关系图。根据图中直达波对应的数据点之直线与反射波所对应的数据点形成之直线, 两直线之交点深度即为基桩底部或缺陷处之深度[26]。

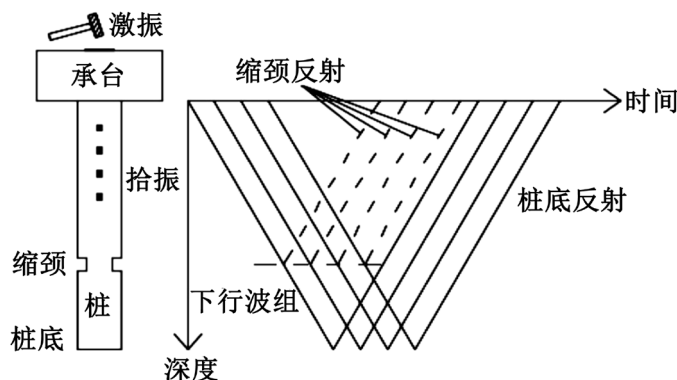


Figure 4. Schematic diagram of super shock wave test  
图 4. 超震波法测试原理图

超震波法已多次应用到实际桥梁或码头的桩基检测中。宁波某两座桥有 20 多年历史, 采用超震波法对两座桥 35 根桩进行检测, 检测出其中 6 根桩水面以下存在缺陷[27]。该方法的主要问题在于需要较大的桩身暴露长度才能安置多组传感器, 实际工程中可能无法满足: 由于长时间海水侵蚀和水生生物附着, 码头桩基的表面通常无法满足要求的平顺程度, 会大大降低超震波法检测的可靠性[28]。

### 2.2.4. 弯曲波法

弯曲波法是在桩侧水平向敲击产生一个弯曲波(剪切波), 而不是常规低应变检测用的纵波(压缩波)。在桩侧水平向激振产生弯曲波向同时上、下传播。弯曲波被安装在桩顶下方附近位于桩身同一侧的两个

相距不远的加速度计所记录。两个加速度计与激振点位于桩同侧的同一平面内。该方法的理论基础是不同脉宽的脉冲激励以后桩身弯曲波能量的频散[26]。我国 JGJ/T93-95《基桩低应变动力检测规程》[29]中也规定: 判别桩身浅部缺陷可同时采用横向激振和水平速度型传感器接收进行辅助判定。弯曲波法示意图如图 5 所示。

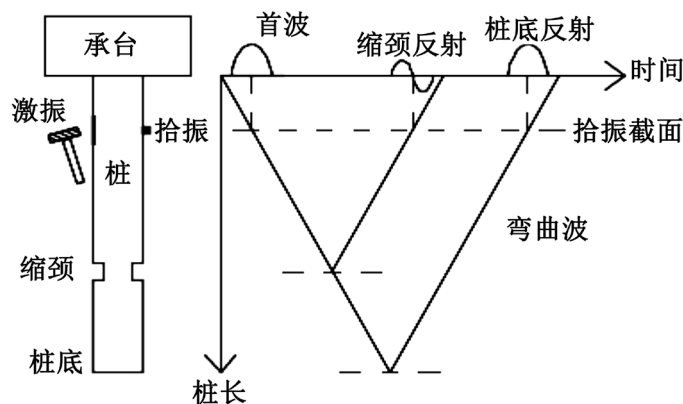


Figure 5. Schematic diagram of bending wave method test  
图 5. 弯曲波法测试原理图

弯曲波法检测技术主要应用在国外, 在国内的研究相对较少。季勇志博士[30]采用数值模拟分别对比了完整桩、断裂桩、缩颈桩、扩颈桩的横波与纵波检测效果, 结果表明弯曲波法较纵波法有缺陷敏感度高、确定缺陷位置精度高等优越性, 但弯曲波法也有沿桩身传播过程中衰减速度快的缺点, 因此不适用于深部缺陷检测。

### 3. 结论

1) 随着传统低应变反射波法的广泛应用, 其自身的局限性也越来越突出。为了满足生产实践的需要, 一些专家学者在传统低应变反射波的基础上, 针对不同工况, 提出了新的检测桩基完整性方法, 如桩侧激振法、双速度法、超震波法、弯曲波法等, 使得桩基完整性检测方法更加多元化, 检测结果也更加准确。

2) 传统低应变反射波法的四种改进方法都有其各自的优缺点和适用范围, 在生产实践过程中, 应根据实际工况选择合理的测试方法或激振接收方式。如双速度法可对无承台桩和有承台桩进行完整性的测试, 通过分离, 可得到和缺陷信息紧密相关的上行速度波, 从而一定程度上减少上部结构的次生反射带来的影响, 降低判读的难度。操作相对容易, 费用低廉。但是该方法要求桩身要有一定的出露距离以安装传感器。此外, 两个传感器之间的安装距离一般较近, 试验取得的计算桩身缺陷或长度的弹性波波速与实际的波速具有较大的偏差, 这将会直接影响对桩基完整性的评定。超震波法对于单基础测量效果较理想, 比传统低应变反射波法可信度高, 但桩身需要较大的暴露距离以安置多组传感器。

3) 桩基质量检测是一个重要课题, 未来桩基质量检测技术的发展, 正朝着软硬件工程、信号处理和信号分析的方向发展。

### 参考文献

- [1] 吴辉琴, 马瑞彦, 黄柳云, 彭杰, 陈晓黎. 多种检测方法在工程基桩中的综合应用与分析[J]. 混凝土, 2012(4): 119-121.
- [2] 俞先江, 顾章川. 综合评分法在水泥搅拌桩质量评定中的应用[J]. 铁道建筑, 2013(7): 92-94.

- [3] 吕列民, 崔德密, 王宁, 高修. 钻芯法检测结构混凝土强度合格性评定分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 21-23.
- [4] 李火榆, 严学开. 灌注桩低应变反射波法与钻芯法检测结果比较[J]. 人民长江, 2005(4): 30-31.
- [5] 赵洪波, 王新. 超声波透射法基桩完整性在吉林省高速公路检测及判定[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(6): 170-171.
- [6] 段文旭. 低应变法和声波透射法在桩基检测中的综合应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [7] 余安, 汤洪志, 刘朋梅, 张亮, 周阳权. 声波透射法和反射波法在混凝土灌注桩缺陷检测中的对比研究[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 111-116.
- [8] 雷永裕, 吴晓寒, 邹桂高. 声波透射法和低应变反射波法联合检测在北京新机场中的应用[J]. 土工基础, 2020, 34(1): 84-88.
- [9] 侯鹏, 韩华, 陈跃武. 用反射波法进行桩基无损检测[J]. 中国安全科学学报, 2003(4): 38-40.
- [10] 方聪, 卢博瑶, 张浩. 低应变反射波法在建设工程桩基检测中的运用[J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 868-870.
- [11] 范晓东. 低应变反射波法在矿山桩基岩土工程勘察中的应用[J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 170-173.
- [12] 王春庆, 陈辉. 低应变反射波法检测桩基浅部缺陷的效果分析[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 259-263.
- [13] 张雄水. 大直径灌注桩高应变和静载试验对比分析[J]. 工程勘察, 2016, 44(3): 75-78.
- [14] 戚桂宾, 郑朝辉, 岳扬, 谷仓勇. 高应变动力测试 CASE 法分析嵌岩桩的承载特性[J]. 工程勘察, 2018, 46(11): 24-30.
- [15] 张龙. 高应变法测预应力管桩承载力的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北地质大学, 2018.
- [16] 刘士伟. 高应变法测承载力在预应力管桩检测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [17] 高飞. 既有结构下基桩完整性检测的桩侧激振接收法[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 29-31.
- [18] 苗永红, 刘松玉, 顾建祖. 侧向激振下桩身完整性试验新方法探讨[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 141-144.
- [19] 姜卫方, 王培军, 李熹, 孙晖. 桩顶非自由端低应变动测法应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2006(1): 16-21.
- [20] 唐勇. 双速度法检测基桩完整性试验研究[J]. 路基工程, 2012(6): 115-117, 121.
- [21] 蔡以智. 桩基低应变完整性测试的双速度分析[J]. 中国测试技术, 2004(2): 27-28.
- [22] 韩亮. 既有基础下基桩完整性双速度测试技术[J]. 建筑结构, 2007, 37(S1): 268-270.
- [23] 黎凯旻, 马键, 郭兆华, 杨芒生, 杨永. 双速度法在铁塔基础结构完整性检测中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 482-488.
- [24] 赵冉, 苏林王, 刘培鸽, 应宗权, 林美鸿. 基于双速度法的在役基桩完整性检测[J]. 水运工程, 2014(8): 153-158.
- [25] 张磊, 杨炎华, 刘建波. 在役桩基完整性检测技术研究进展[J]. 工程建设, 2019, 51(10): 56-60.
- [26] 高飞, 姜卫方. 在役结构基桩完整性检测新技术[J]. 水运工程, 2010(5): 37-40, 46.
- [27] 蒋辉, 逯平平, 孙天奇, 等. 宁波姚江桥与孔浦桥 PST 检测报告[R]. 北京: 北京同度工程物探技术有限公司, 2017: 20-21.
- [28] 邵帅, 王元战, 黄长虹. 在役高桩码头桩基完整性无损检测技术研究的进展[J]. 港工技术, 2011, 48(6): 45-49.
- [29] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国地矿部. JGJ/T 93-95 基桩低应变动力检测规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [30] 季勇志. 基于三维导波理论的码头桩基无损检测方法的数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.