



## 基于双速度法的在役基桩完整性检测

赵冉, 苏林王, 刘培鸽, 应宗权, 林美鸿

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 双速度法是为解决带上部结构基桩完整性检测而产生的。介绍双速度测试的基本原理与方法; 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, 形成了成套的双速度测试技术: 包括敲击模式选择, 敲击点与传感器之间、传感器与传感器之间、承台-桩界面与敲击点之间的合理布置等; 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。

**关键词:** 在役基桩; 完整性检测; 双速度法; 室内试验; 工程实测试验

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0153-06

### Integrity testing of in-service piles based on double-velocity test method

ZHAO Ran, SU Lin-wang, LIU Pei-ge, YING Zong-quan, LIN Mei-hong

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** To solve the pile upper structure's integrity testing problem, the double-velocity test method is brought about. Firstly, we describe the basic principles and methods of double-velocity test method; Secondly, based on the double-velocity test on the laboratory cap pile model, we analyze the feasibility of the method, and form a set of double-velocity testing technique including tapping mode selection, reasonable arrangement between tapping point and the sensor, between the sensor and the sensor and between tapping point and pile-caps interface; At last, by actual field testing, we prove that the set of double-velocity test techniques can be used on the pile with the upper structure integrity testing, and after the directional filtering, the up going wave is clear, so it is accurate to determine the location and size of the defect.

**Key words:** piles in service; integrity testing; double-velocity test method; laboratory test; project test and verification

双速度法是低应变的一种改进方法, 为 PIT 公司最先提出, 最初主要用于准确确定桩身波速方面, 后来逐渐研发了双速度方向滤波技术, 研究者尝试将其应用于带上部结构的在役结构的检测方面。目前在基桩完整性检测时, 主要采用低应变法, 该方法将桩简化成一维杆件, 桩土相互作用用阻尼壶来模拟, 根据一维应力波理论, 可由反射波的相位识别出波阻抗变化(增大或缩

小), 可由幅值确定波阻抗变化程度, 目前在新建基桩检测时较为准确, 获得了较大的成功。但在已经投入使用的在役工程中, 基桩并不是单独存在的, 基桩上部存在桩帽、梁、板等上部结构, 由于这些上部构件的存在, 低应变的一维弹性波理论不再适用, 上部的多个反射面使得应力波在在役基桩及其上部结构中的传播十分复杂, 实测波形识别非常困难, 基桩完整性检测在在役结构

收稿日期: 2013-12-09

作者简介: 赵冉(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水运工程检测、评估与维修加固的研究。

中的应用面临很大难题<sup>[1-2]</sup>。

在双速度研究方面，韩亮<sup>[3]</sup>针对既有建筑物的基桩检测难题，介绍了双速度法的测试原理，并通过实例论证了双速度法的可行性；赵建夏等<sup>[4]</sup>采用理论模型对双速度法进行了分析，确认双速度可以较好地得到桩身的精确波速；蔡以智<sup>[5]</sup>对双速度法的波速计算与方向滤波进行了理论计算，分析了双速度法的应用可行性；唐勇<sup>[6]</sup>分别采用低应变与双速度法，在工程现场对 16 根带承台与不带承台的基桩进行了测试，对 2 种方法进行了比较验证，认为双速度法可以用于基桩检测。

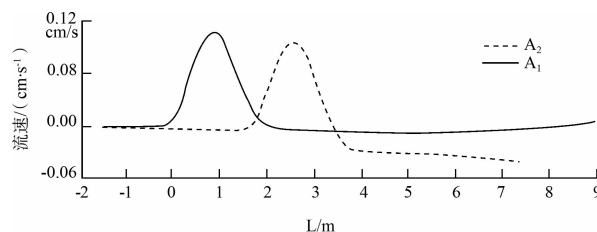
以上研究可以看出，目前在双速度研究方面，有些学者从理论方面进行了分析，有些学者在工程现场进行了实测，取得了一些实质性的进展。然而针对带上部结构的在役基桩完整性检测，目前的研究还没有确定性的研究结果表明，双速度与缺陷及桩底反射的关系，且较少涉及具体的检测操作要点及适用范围。这主要是在役基桩处于水下或泥下，下部有没有出现损伤破坏并不清楚，无法对双速度检测结果进行验证，且在上部结构影响下的所测波形杂乱，滤除后的上行波不能很好地判断缺陷位置。因此，本文在试验室浇筑了大比尺带承台缺陷基桩，对其进行了实测验证，分析了该方法的可行性，确定了合理的敲击模式，并探讨了敲击点与传感器之间、传感器与传感器之间、承台-桩界面与敲击点之间的合理布置等一系列操作要点；并采用室内试验研究成果，在某高桩码头结构工程现场进行了现场检测，验证了双速度在现场检测的可行性。

### 1 基本原理

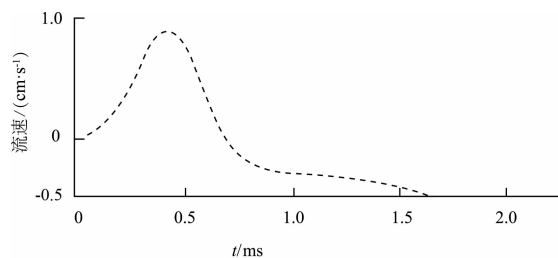
采用双速度法测试时，常利用互相关分析方法计算桩身平均波速。如图 1a) 所示，固定 A2 速度曲线（虚线曲线），沿时间轴移动 A1 速度曲线（实线曲线），直到找到与 A2 速度脉冲最佳匹配的时间  $\Delta t$ ，如图 1b) 所示，然后利用式(1)计算波速<sup>[3]</sup>。

$$C = \frac{\Delta z}{\Delta t} \tag{1}$$

式中： $C$  为桩身应力波波速（m/s）； $\Delta z$  为加速度传感器 A1 和 A2 之间的已知距离（m）； $\Delta t$  为到达加速度传感器 A1 和 A2 的时间差（ms），可由时域波形图上读取。



a) 实测速度曲线



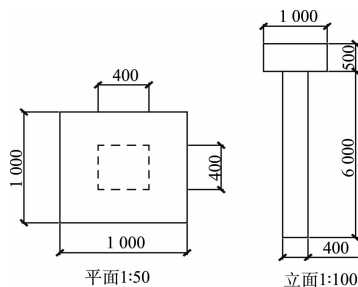
b) 互相关曲线

图 1 互相关分析确定平均波速

## 2 试验研究

### 2.1 试验桩设计与制作

根据试验目的，制作的具有缺陷的试验桩情况如图 2 和图 3 所示。桩身配筋率除满足最小配筋率要求外，也应满足抗弯要求（桩身吊装时桩身横置）。试验桩采用 C40 混凝土浇筑成型，桩身缺陷采用预埋木环的方式嵌入指定缺陷位置，进而浇筑成型，如图 4 和图 5 所示。



a) 一桩一承台尺寸

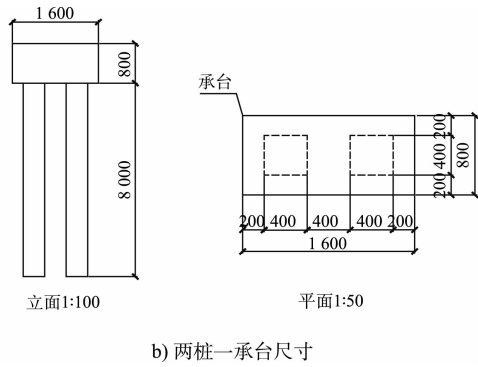


图 2 桩与承台的尺寸

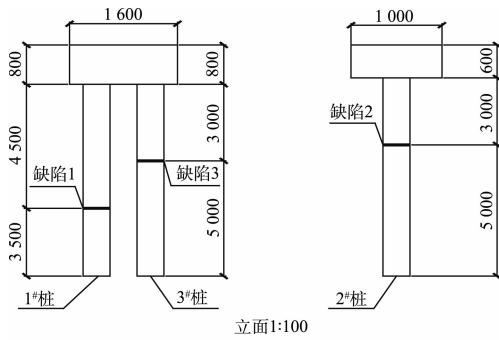


图 3 试验桩的缺陷位置

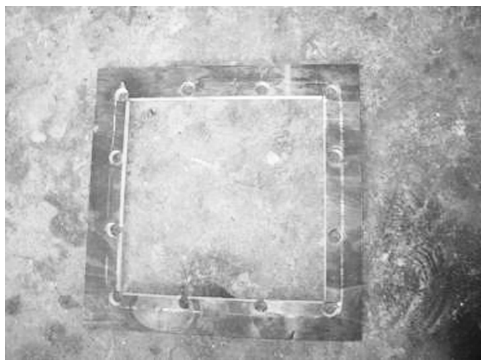


图 4 缺陷制作



图 5 浇筑成型后的试验桩

## 2.2 试验桩测试

### 2.2.1 测试方案

对 1# 基桩 (图 5 中最左侧基桩) 进行双速度法测试, 为研究较为合理的传感器安装与激振方式, 测试时主要考察以下 3 种方式:

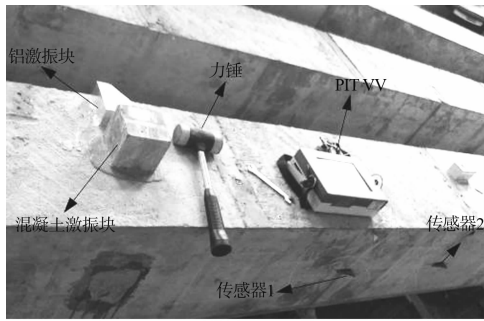
1) 在桩帽顶面上进行激振操作, 2 个传感器均安装于侧面, 其中第 1 个传感器位于桩帽底面 1.3 m 处, 第 2 个位于桩帽底面 2.3 m 处。

2) 制作混凝土小试块 (100 mm × 100 mm × 100 mm) 作为激振块, 并粘贴于桩身上, 在激振块上进行激振操作, 激振块与传感器安装于同一个桩身侧面, 三点基本位于一条线上; 其中激振块顶面距离桩帽底部为 0.8 m, 第 1 个传感器位于桩帽底面 1.3 m 处, 第 2 个位于桩帽底面 2.3 m 处, 如图 6a) 所示。

3) 采用激振块, 激振块与传感器安装于相互垂直的 2 个桩身侧面, 三点不在同一条线, 其中激振块顶面距离桩帽底部为 0.8 m, 第 1 个传感器位于桩帽底面 1.3 m 处, 第 2 个位于桩帽底面 2.3 m 处, 如图 6b) 所示。



a) 传感器与敲击点同一平面

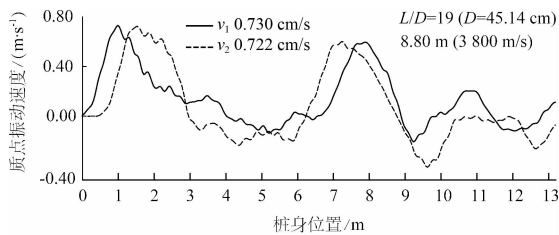


b) 传感器与敲击点不同平面

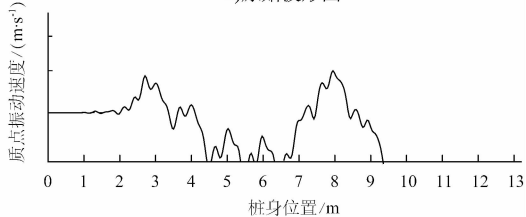
图6 传感器位置与敲击位置

### 2.2.2 测试结果

图7为在桩帽上进行激振、在桩身上接收的测试结果；图8为采用激振块，激振块与传感器安装于同一个平面上的测试结果；图9为采用激振块，激振块与传感器安装于不同平面上的测试结果。

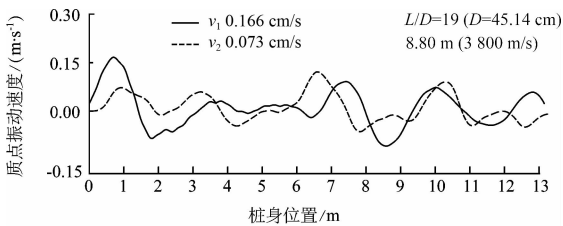


a) 原始波形图

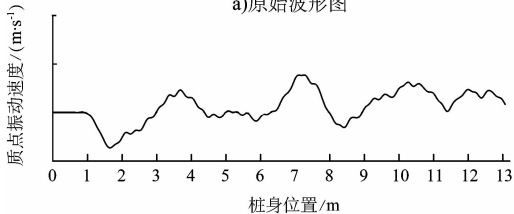


b) 上行波滤波图

图7 在桩帽顶部激振、桩身接收的测试结果

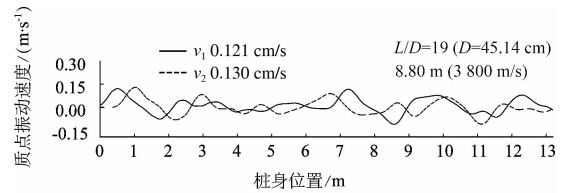


a) 原始波形图

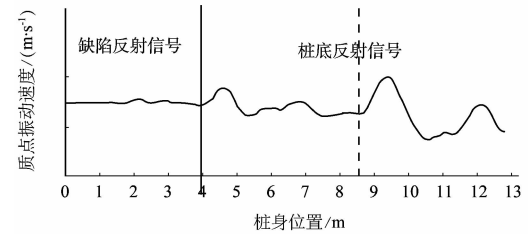


b) 上行波滤波图

图8 传感器与激振块在同一个平面的测试结果



a) 原始波形图



b) 上行波滤波图

图9 传感器与激振块不在同一个平面的测试结果

从图7可以看出，从桩帽进行激振，所测波形较为杂乱，无法通过双速度滤波对波速及缺陷位置进行判断。

图8与图9进行比对可以得出，敲击点与传感器安装位置不在一条线上时，测得的结果易识别缺陷位置、桩底位置等；3点在同一条线上时，测得的结果只可识别桩底位置，不能判断缺陷位置。

此外，对试验桩2<sup>#</sup>与3<sup>#</sup>的测试结果与试验桩1<sup>#</sup>的测试结果基本相同，在此不再赘述。

### 2.2.3 激振位置及传感器位置

同时对试验桩进行多次激振位置与传感器位置之间的间距选择试验测试，得到激振位置及传感器位置的布置原则，具体如下：

1) 激振点与承台底部之间的距离应大于激振点与第1个传感器测点之间的距离，避免承台界面反射信号的干扰。

2) 激振点与第1个传感器测点之间的距离不能过小，否则两个传感器接收到的信号峰值不一致，宜大于0.5 m，以此接收到同样的激振信号。

3) 敲击点与传感器之间的距离应适当，宜布置在不同平面内，避免桩身应力波三维效应的影响。

4) 2 个传感器测点之间的距离宜 0.5 ~ 1.0 m, 过大则不容易区分两传感器接收到的波形信号, 难以找出对应关系; 过小则不容易识别反射波到达的先后顺序, 不利于上下行波的分离。

### 3 现场验证

#### 3.1 工程概况

珠海巨涛码头位于高栏港, 地理位置如图 10 所示。码头主体为高桩墩台式结构, 由 50 m × 15 m 独立平台和 4 个 6 m × 8 m 的系缆墩台组成, 基桩为 PHC 桩和钻孔灌注桩。2013 年 5 月 28 日, 码头工作平台受到驳船撞击, 事故直接导致平台边角混凝土受损, 钢筋大量外露, 为了解船舶碰撞事故对码头基桩的损害程度, 采用双速度法对码头基桩进行检测。通过本次检测, 主要检验双速度测试方法的在工程现场的测试能力, 以验证上述研究成果中关于激振方式、激振及传感器安装位置的可靠性。



a) 码头地理位置



b) 码头全景

图 10 码头地理位置及全景

#### 3.2 测试过程及结果

激振块及传感器现场安装情况如下:

1) 混凝土激振块黏贴于桩承台底面下方

0.7 m 处。如图 11a) 所示。



a) 安装混凝土激振块



b) 安装两个传感器



c) 数据采集

图 11 双速度法测试现场

2) 第 1 个传感器位于激振块以下 0.5 m 处, 第 2 个传感器位于第一个传感器以下 0.5 m 处, 其中 2 个传感器间距 0.5 m, 图 9 为双速度法测试现场。

此外,为了得到双速度测试的传感器安装位置、敲击位置对双速度分析结果的影响,布置了不同的敲击位置,包括传感器与激振块同平面(传感器在敲击块的正下方)、传感器与激振块斜对面(在环向有一定距离,不在敲击块正下方)。现场测试得到曲线及滤波处理如图12~13所示。

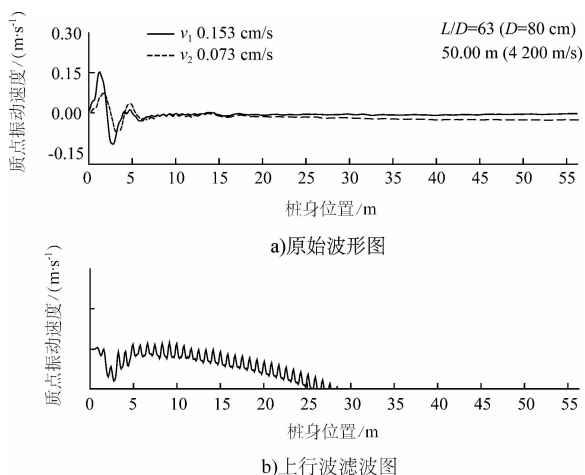


图12 传感器与混凝土块同平面安装敲击结果

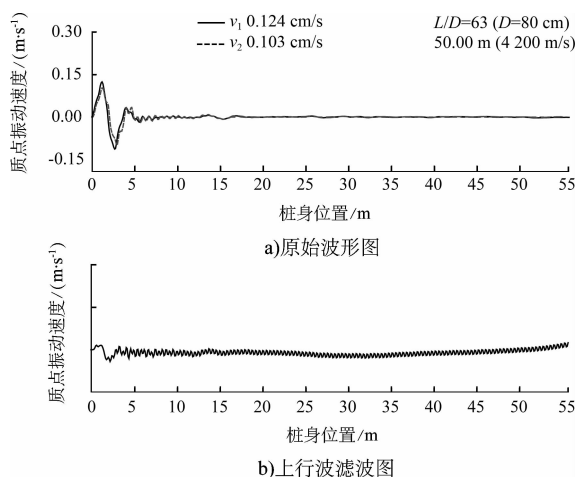


图13 传感器与混凝土块不同平面安装敲击结果

从现场测试结果可以看出:

1) 通过分析上行波可以发现,基桩没有缺陷,看不到桩底反射。采用潜水员水下探摸,发现泥面以上没有缺陷。结合工程经验,判断该桩为一类桩,与测试结果吻合。

2) 传感器安装在不同平面,方向滤波后上行波清晰,与室内试验吻合。

3) 现场测试由于水面以上露出基桩长度条件所限,2个传感器的安装距离仅为0.5 m,相比于

50 m的桩长来说,传感器相位差较小,对方向滤波不利。

4) 由于低应变激振锤能量限制,与单速度测试一样,双速度测试也不能对50 m桩长的桩底位置进行有效检测。

#### 4 结论

1) 采用低应变法的室内试验表明,检测时宜在桩身上粘贴一个100 mm立方的小型混凝土块,在激振块上进行激振操作,测试波形相对于在桩帽上进行激振操作要清晰得多,可以作为新的测试方法进行推广。

2) 采用双速度法的室内完整性测试试验表明,在桩侧粘贴混凝土激振块,并在不同平面上安装侧向传感器,在激振块位置、传感器间距与位置安装合理的条件下,可以得到清晰的两条波形,可以计算得到准确波速;通过方向滤波,可以得到缺陷位置、大小及桩底反射。

3) 根据双速度法的现场检测结果,发现在桩侧粘贴混凝土激振块,可以得到相对较清晰的检测波形,通过两者相位差可以计算得到波速与缺陷位置等信息;同时双速度现场测试要求承台底面以下、水面以上要有一定的出露桩长及操作空间,以使2个传感器保持一定距离便于方向滤波。

#### 参考文献:

- [1] 柴华友,刘明贵,白世伟,等.应力波在承台-桩系统中传播数值分析[J].岩土工程学报,2003,25(5):624-628.
- [2] 柴华友,刘明贵,李祺,等.应力波在平台-桩系统中传播的实验研究[J].岩土力学,2002,23(4):459-464.
- [3] 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(S1):37-39.
- [4] 赵建夏,胡晓泉.桩基低应变完整性测试的双速度分析[J].岩土工程界,2001(6):34-36.
- [5] 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(3):26-27.
- [6] 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.