

# 预应力管桩低应变反射波法检测时的尺寸效应研究

## Dimension effect on low strain integrity testing of prestressed pipe piles

陈 凡, 罗文章

(中国建筑科学研究院 地基基础研究所, 北京 100013)

**摘 要:**通过数值计算与实验速度曲线的对比分析研究, 提出了计算不同点激励速度峰值时间差的关系式, 并从振型的角度解释了管桩顶面不同测点处高频干扰随加载脉冲变宽时的衰减现象。本文还对缺陷管桩波形变化进行了一些研究。

**关键词:**管桩; 应力波; 高频干扰

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2004)03-0353-04

**作者简介:** 陈 凡(1957-), 男, 硕士, 研究员, 从事桩基动测研究。

CHEN Fan, LUO Wen-zhang

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In this paper, based on the comparison and analysis of velocity curves got from tests or numerical calculation, a formula is obtained for time difference among the initial velocity signals at different points. From the viewpoint of vibration mode, the fact is explained that high frequency disturbing signals at different points are weakened and changed when the load impulse changes. At last some signals from defect pipe piles are studied.

**Key words:** pipe pile; stress wave; high frequency disturbing signal

## 0 前 言

近十年来, 预应力管桩在我国华南、华东等沿海地区得到广泛应用。目前为检测其桩身完整性应用最多的方法是低应变反射波法, 其理论基础为一维弹性杆纵波理论。采用一维弹性杆纵波理论需两方面的要求: ①入射波的波长必须足够大。一般要求其与桩直径的比值大于 10, 此时可忽略桩的同一横截面上不同质点间运动状态的差异, 而认为各质点的运动状态完全一致, 这就是通常所说的平截面假设。②波长与桩长的比值又必须足够小, 否则桩身的运动状态更接近刚体, 波动性状不明显, 不利于较浅部缺陷的定位。显然桩的横向、纵向尺寸和激励脉冲波长的关系本身就是矛盾。这种尺寸效应对不同横截面尺寸桩的影响需要研究。笔者等利用有限单元法对匀质自由圆柱体并结合实验进行了以下研究: ①桩顶各点激励速度峰值时刻随其与圆心敲击点距离不同而相应有一些滞后; ②高频干扰波为桩顶圆心与周边间来回反射的剪切波并可能包含瑞利波成分, 波速介于二者间; ③激励力脉冲宽度、桩径大小和传感器安装位置等直接影响高频干扰波的强弱; ④桩的浅部有严重缺陷且激励脉冲较宽时, 缺陷以上桩身段波形传播性状不明显, 波形主要表现出二阶单自由度质量-弹簧系统运动, 即大振幅、低频宽幅摆动性状<sup>[1,2]</sup>。

(1) 不考虑桩土相互影响, 管桩为一不受任何约束的匀质圆环柱体;

(2) 动力学基本方程中不考虑重力的影响;

(3) 忽略材料阻尼作用;

(4) 在脉冲荷载作用下, 整个计算域内一直为弹性状态。

对于本文而言, 采用大小相对均匀的单元更能反应应力波在本模型结构中的传播特性。我们利用四节点四面体常应变单元对其空间域进行离散, 其顶面单元划分形式如图 1, 并利用 Newmark 方法求解相应运动方程。

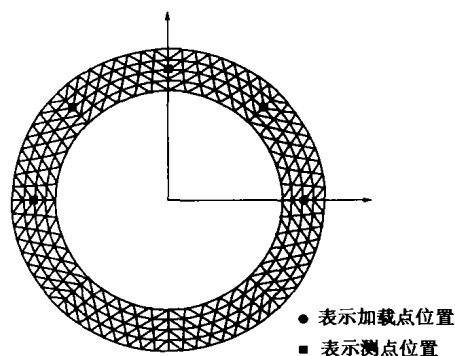


图 1 顶面单元划分形式

Fig. 1 FEM mesh of pipe pile head

本文计算采用钟形力脉冲, 我们把钟形力脉冲曲线上幅度为该脉冲最大幅度的 10% 的两点之间的时间差定义为该钟形力脉冲的宽度  $T_p$ 。

## 1 基本假设与计算模型

对于本文中的管桩, 作如下假定:

收稿日期: 2003-05-20

本程序首先以桩顶面受到面加载之情形进行了验证,此时桩底反射速度峰幅值为初始激励速度峰幅值的两倍。但在本文后续计算中只研究点加载的情形,为衰减掉因多边形代替圆周这种边界的改变而产生的额外的高频干扰,故采用了数值阻尼。当然,这对其它高频干扰波和桩底反射峰值也有部分衰减作用。

## 2 应力波在管桩顶面的传播及其影响

文献[1]指出,在实心桩桩心实施敲击后,桩顶面沿径向各点的起始速度峰幅值各异且不是同时达到最大值,而是随着与敲击点的径向距离  $r$  变化有一个时间差  $\Delta t = r/C_R$  (式中  $C_R$  为表面波波速),但经过  $2L/C$  时间反射回桩顶面各点的速度峰不仅同幅,而且同时,见图 2。所以按入射峰-桩底反射峰确定的波速比实际的高,按“正确的波速”确定缺陷位置将比实际的浅。

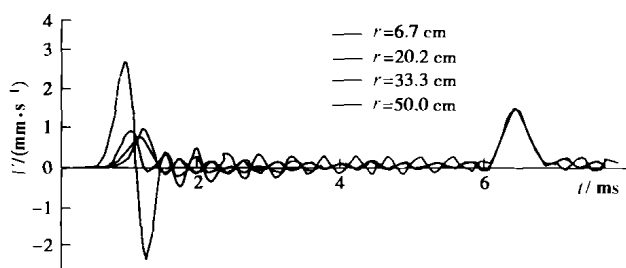


图 2 1.0 m 直径实心桩不同半径上的计算速度曲线 ( $L = 10.0$  m)

Fig.2 Computed velocity curve along radial distance of a pile with  $\phi 1.0$  m ( $L = 10.0$  m)

对于无限弹性固体中传播的两种波,即膨胀波和畸变波,当其中任何一种波入射到两种介质的交界面上时,同时将产生反射和折射,一般的情况下将产生四种不同的波<sup>[3]</sup>。对于管桩,由于内外两个侧面的存在,受敲击后所产生的应力波(包括压缩波、剪切波、瑞利波等)在内外环的两个边界面上有复杂的反射现象。我们实际所能测试到的速度峰值将是由激励所产生的应力波和边界反射波的叠加结果。图 3 为  $T_p = 0.6$  ms 时的计算结果,它表明对于管桩,其结论和文献[1]中关于实心桩的相应研究结果相似。

笔者通过对顶面所有点的计算结果分析发现,除了加载点附近一定范围外,其它同角度的外侧点的激励速度峰值时刻相对于内侧点而言有滞后,形式上表现为波在沿环向传播的同时,也从内侧向外侧传播。它表明应力波在管桩表面的传播总体表现为其在沿环中心线外侧的某个圆弧向前传播。由于各种波的波速并不相同,当较慢的应力波从一侧环向还未传播到 180°点时,通过另一侧环向传播的速度较快的应力波

已经通过 180°点传过来。因而在 180°点附近的一定范围内,各种应力波的叠加现象将更为复杂<sup>[4]</sup>。这是导致在 90°点或略大于 90°的位置激励速度峰值最小,而远离加载点的 180°点处激励速度峰值反而又偏大的原因。实验中,由于管桩端头板的影响、边界条件的改变、计算与实验中泊松比  $\nu$  (本文中为 0.2) 的差别以及实验时数据采样时间间隔并非足够小等原因,叠加后的波沿管桩环向的传播表现为匀速。

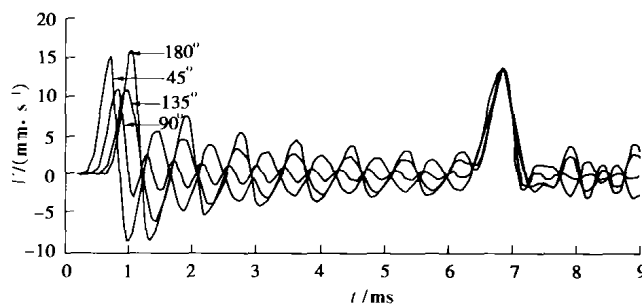


图 3  $\phi 800 \times 110$  mm 管桩各测点处计算速度曲线 ( $L = 13.0$  m)

Fig.3 Computed velocity curve at different points of a pipe pile with  $\phi 800 \times 110$  mm ( $L = 13.0$  m)

## 3 传感器安装位置与加载脉冲宽度对高频干扰波的影响

一般我们均知道桩在受激励后有纵向振动,其振动对应频率为:

$$f_n = \frac{nC}{2L} \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中  $C$  和  $L$  分别表示桩身纵波波速和桩长。实际上,在管桩产生纵向振动的同时,也会产生径向振动、扭转振动、弯曲振动等,这些振动均有自己对应的振型。所有被激励的振型均会对实测的速度时域曲线及其频谱产生影响,而这些振型的叠加将导致管桩顶面不同位置受到的高频干扰不同。

文献[1]指出,对于实心桩,当桩顶圆心在集中力脉冲的作用下时,距桩心不同距离的点上所感受的高频干扰的频率一样,但速度振幅不同(见图 2),高频干扰振幅的最小点约在距桩心  $2R/3$  处,而对于同一位置激励脉冲变宽,高频干扰减弱。

对于管桩,根据实际经验及有关试算结果,作者选择的用作对比的测点见图 1。 $\phi 800 \times 110$  mm 管桩的有限元计算结果见图 3,由该图可以看出,各测点处高频干扰波振幅也不同,同时 45°、135°和 180°三点的频率基本相同,而 90°点处的频率相对于它们三点而言高出约一倍,图 4 为 90°和 135°点处的相应速度曲线频谱。图 5 为  $\phi 800 \times 110$  mm 管桩在两测点的实验速度曲线

及相应频谱。由于数值阻尼的影响,图4中仅出现一个高频共振峰。从振型的角度理解,作者认为,纵向振动的振型决定其频谱中的基频,如图4中所示为162 Hz,这与实心桩情况相同。在已知桩长的情况下,可利用基频及公式(1)推算纵波波速  $C$ 。至于对高频干扰的影响,在径向振动(可能还有其它形式振动的叠加)振型作用下,管桩90°点在叠加后的第一阶振型处表现为驻点,而其它三点均受第一阶振型影响,因而在90°点更容易消除或减弱高频干扰。在实际检测中一般采用较宽的激励脉冲,以使所有振型均不被激励出来。图6与图7为同一根管桩的实测结果。在图6中,如上所述,90°点的高频干扰频率显然较45°点更高。当敲击加一层垫时,所有的高频干扰均消失,如图7。若用  $f$  表示第一阶振型对应频率值,作者发现,管桩外径大小对  $f$  值影响较大,管壁厚薄也有影响。外径越大,管壁越薄,  $f$  值越小,亦即在相同脉冲荷载作用下,大口径管桩的第一阶振型更易被激励。这也是实际检测大直径管桩时为减少高频干扰获得更好信号需要加锤垫或用软锤头的原因。需要特别指出的是,各种实际被激励的振型叠加后对实测结果的影响很复杂,管桩的端头板,实验传感器的安装条件,实验时加载是否垂直于管桩顶面以及实际的边界条件等诸多因素对实验结果都会产生一定影响。

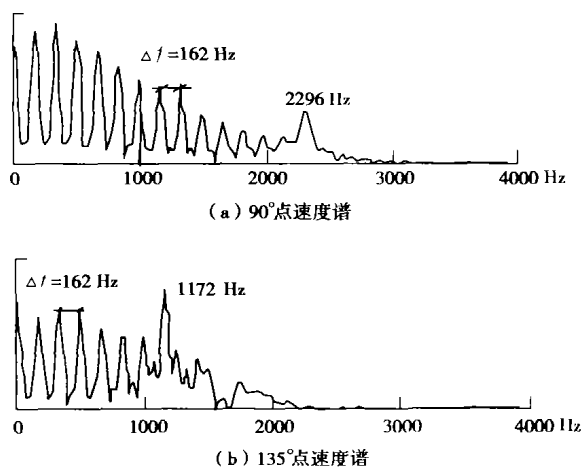


图4  $\phi 800 \times 110$  mm 管桩在90°、135°的计算速度曲线频谱

Fig.4 Frequency spectrum of computed velocity curve at 90° and 135° points of a pipe pile with  $\phi 800 \times 110$  mm

在数值上,利用上述影响高频干扰的第一阶振型所对应的频率  $f$  可求得波沿环外侧传播的总平均速度,它与瑞利波波速相差不大。若忽略速度的径向不均匀性,并且认为波沿管桩环向的传播是匀速的,则管桩不同角度点起始速度峰值时刻可表示为式(3)

$$f = C_R / 2\pi R, \quad (2)$$

$$t = t_0 + (\theta \pi \bar{R} / 180 C_R) = t_0 + (\theta / 360 f), \quad (3)$$

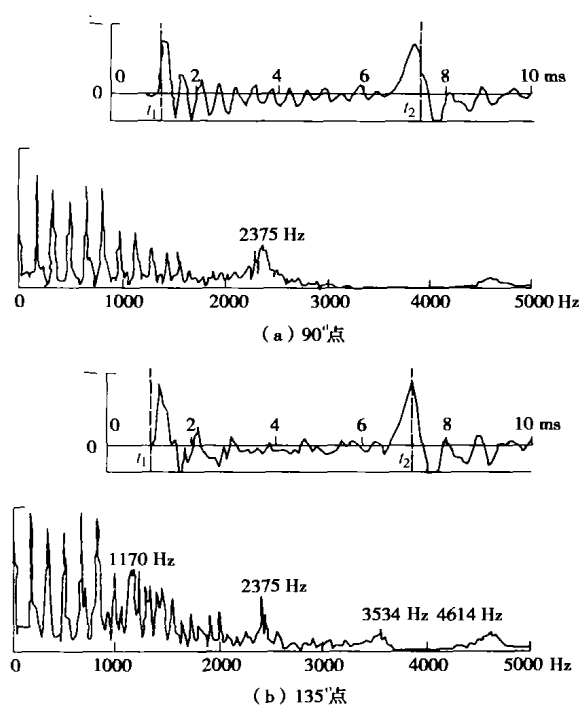


图5  $\phi 800 \times 110$  mm 管桩在不同测点的实验速度曲线及频谱 ( $L = 13.0$  m)

Fig.5 Measured velocity curve and its frequency spectrum at different points of a pipe pile with  $\phi 800 \times 110$  mm ( $L = 13.0$  m)

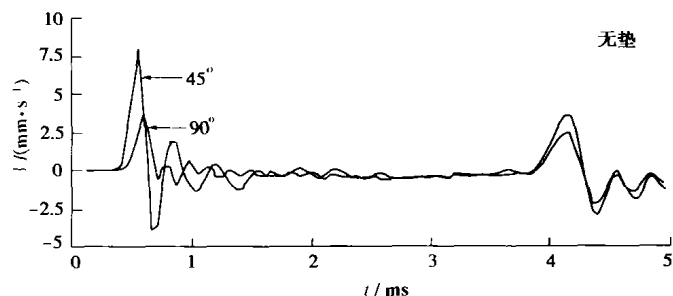


图6  $\phi 400 \times 90$  mm 管桩在45°和90°点的实验速度对比曲线 ( $L = 8.0$  m)

Fig.6 Comparison of measured velocity curves at 45° and 90° points of a pipe pile with  $\phi 400 \times 90$  mm ( $L = 8.0$  m)

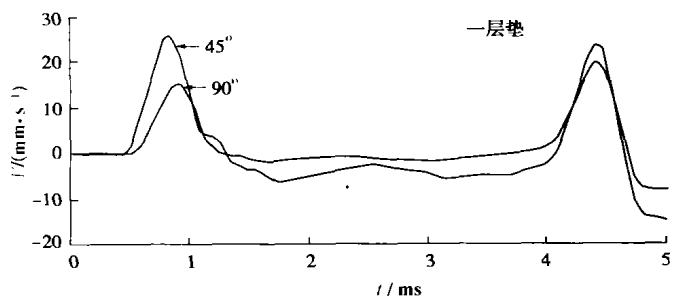


图7  $\phi 400 \times 90$  mm 管桩在45°和90°点的实验速度对比曲线 ( $L = 8.0$  m)

Fig.7 Comparison of measured velocity curves at 45° and 90° points of a pipe pile with  $\phi 400 \times 90$  mm ( $L = 8.0$  m)

式中  $\bar{R} = (R_1 + R_2) / 2$ ;  $t_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\theta$  和  $C_R$  分别表示管桩加载点起始速度峰值时刻、外径、内径、接受点与加载点相应于圆心的夹角和瑞利波波速。对于  $\phi 800 \times$

110 mm 的管桩,取  $f = 1170$  Hz,利用式(3)可算得相距  $90^\circ$  的两点激励速度幅值时刻差为 0.25 ms,实验中管桩  $45^\circ \sim 135^\circ$  两点间实测时间差为 0.25 ms 或 0.30 ms,二者比较吻合。

在实际应用中,我们常利用桩长  $L$  及激励与反射之间的时间差  $\Delta t$ ,根据  $C = 2L/\Delta t$  来计算桩身内一维纵波波速。必要时可利用式(3)对  $\Delta t$  进行修正,以获得更准确的一维纵波波速,尽管实际检测时一般不进行此种修正。

#### 4 桩身缺陷情况下的反射信号变化

我们以  $\phi 800 \times 110$  mm(6.0 m)管桩为例。管桩在 3.0 m 处有缩颈现象,面积减少占总断面面积的 78%,缩颈处长度为 0.20 m。图 8 给出其  $T_p = 0.9$  ms 时  $90^\circ$  处的计算速度曲线和相应完整桩情况的对比。这里需要注意四点:①由于前述的应力波沿管桩顶面环向的传播使  $90^\circ$  处激励峰值相对加载点处而言有滞后,若不进行相应修正,将导致所判缺陷深度偏浅;②若为影响深度范围内的浅部缺陷,正如陈凡等在研究实心桩时指出的那样,此时不能再沿用建立在一维应力波理论基础上的评判准则来计算缺陷位置;③由于缺陷的存在,应力波因为绕行,其传播距离略有延长,故其桩底反射信号相对完整桩时略有滞后,这和文献[1]关于实心桩的相应结果相同;④本文中的数值阻尼对桩底反射峰有一些减弱作用,如图 8 中的完整桩,其  $2L/C$  桩底反射峰值与入射峰值之比并不等于 2,而是偏小。

对于局部缺陷,管桩在 3.0 m 处缺失一半,即面积减少占总断面面积的 50%,缺陷处长度为 0.20 m。我们将敲击点分别定于缺陷正上方、偏  $90^\circ$ 、偏  $180^\circ$  处,通过对距敲击点  $90^\circ$  处的计算速度曲线的分析发现,当选定两点一为敲击点另一为接收点时,无论在哪儿敲击,另一点接收的信号相差不大。敲击点、接收点分别为缺陷正上方、缺陷正上方偏  $90^\circ$  处时,其计算速度曲线和完整桩情况的对比见图 9 曲线 1,而敲击点、接收点分别为缺陷正上方  $90^\circ$ 、缺陷正上方偏  $180^\circ$  处时,则见图 9 曲线 2。前一种情况的缺陷信号更为明显。理论上,检测时可通过变换敲击点和接收点位置的多个信号来对比判断缺陷的方位。当然,实际检测时会受很多因素影响,需要更多的研究和经验积累。

#### 5 结 论

(1)应力波在管桩顶面的传播导致距加载点不同距离的接收点起始激励速度峰值出现相应时间滞后,造成按速度峰-峰值确定的一维纵波波速偏高,可利

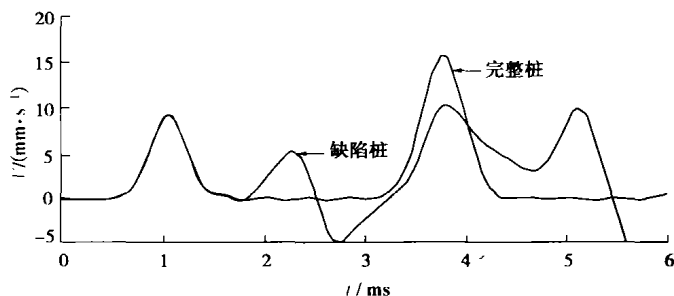


图 8 缺陷桩与完整桩  $90^\circ$  处的计算速度对比曲线 ( $L = 6.0$  m)

Fig. 8 Comparison of computed velocity curves at  $90^\circ$  point between intact and defective piles ( $L = 6.0$  m)

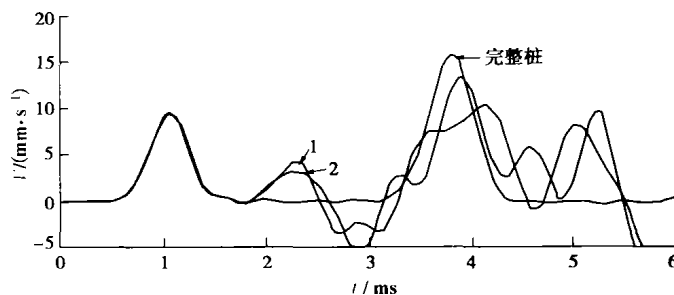


图 9 缺陷桩与完整桩  $90^\circ$  处的计算速度对比曲线 ( $L = 6.0$  m)

Fig. 9 Comparison of computed velocity curves at  $90^\circ$  point between intact and defective piles ( $L = 6.0$  m)

用本文中公式(3)进行相应修正。另外,和桩身存在缺陷或扩径情况的实心桩一样,管桩桩身截面尺寸改变也将导致桩底反射峰值的适当时间滞后,这是应力波因绕行其传播距离略有延长所致。

(2)实验与有限元分析均表明,管桩在点击荷载作用下,被激励的各种径向振动的固有振型的叠加结果是导致管桩顶面不同点处高频干扰强弱不同的最主要原因。 $90^\circ$  点是一阶振型的驻点,所以在实际检测时应采用较宽的加载脉冲以使所有的径向振型至少是一阶以上振型不被激励出来。由于径向振动振型频率随管桩直径增大或管壁变薄而减小,因而更容易受高频干扰的影响。

(3)当敲击点与接收点之一位于缺陷正上方,另一点与其相对圆心夹角为  $90^\circ$  时,缺陷处反射信号更为显著。

#### 参考文献:

- [1] 陈凡,王仁军.尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J].岩土工程学报,1998,20(5):92-96.
- [2] 中国建筑科学研究院地基基础研究所.建筑科学研究报告——低应变反射波法测试分析方法的完善[R].1996.
- [3] 考尔斯基 H 著,王仁,等译.固体中的应力波[M].北京:科学出版社,1958.
- [4] 罗文章.管桩在低应变瞬态集中荷载作用下的速度响应研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2002.