

DOI: 10.11779/CJGE201709023

基桩反射波法三维干扰成因与最佳采样方法研究

荣垂强¹, 赵晓华^{*1, 2}

(1. 汕头大学土木工程系, 广东 汕头 515063; 2. 广东省高等学校结构与风洞重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘要: 研究了基桩反射波法三维干扰信号的成因和消除三维干扰的最佳采样方法。通过模态叠加法, 发现三维干扰主要来源于使桩顶表面产生非均匀轴向运动的轴对称径向振动模态, 桩顶表面的模态位移零点即为三维干扰最小点。通过参数分析, 提出了三维干扰最小点位置的函数表达式, 从而修正了现有基桩检测规范推荐的采样位置。基于上述模态在桩顶面位移零点两侧位移反向的特点, 提出了双速度平均法, 该方法利用双通道仪的两个探头在干扰最小点两侧采样并平均以达到消除三维干扰的目的。与干扰最小点采样法相比, 该方法测点选择范围更大, 信号质量更优。工程实测数据和数值模拟结果证明了上述结论的正确性。

关键词: 基桩; 反射波法; 模态; 三维干扰最小点; 双速度平均法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1731-08

作者简介: 荣垂强(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事结构工程检测研究工作。E-mail: imrcq@126.com。

Three-dimensional interference sources and optimal sampling location of piles utilizing reflected wave method

RONG Chui-qiang¹, ZHAO Xiao-hua^{1, 2}

(1. Department of Civil Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Key Laboratory of Structure and Wind Tunnel of

Guangdong Higher Education Institutes, Shantou 515063, China)

Abstract: When utilizing the reflected wave method for integrity testing of piles, signals are usually biased due to the three-dimensional (3D) wave motion of the piles. In order to reduce the signal bias, both the 3D interference sources and the optimal sampling positions are studied. By means of the mode superposition, it is observed that the interference sources are mainly from a specific kind of vibration modes, in which the top plane of a pile will deform non-uniformly in the axial direction. There exist stationary points on the top plane where the interference signal is the minimum. They are called 3D interference minimum points, the optimal positions for signal sampling. Through parameter analysis, a mathematical expression is derived for determination of the 3D interference minimum points. This expression reflects the effect of pile materials, and may be regarded as a modification of the existing code method. Based on the fact that the displacements at both sides of an interference minimum point are adverse, a double-speed average method is proposed, by measuring and averaging the signals of two corresponding points at both sides. Using this method, the sampling location can be chosen in a wide range, while the signal quality is much higher than that of the 3D interference minimum point sampling method. The accuracy of the proposed method is further checked through both the in-situ tests and the numerical simulations.

Key words: pile; reflected wave method; vibration mode; three-dimensional interference minimum point; double-speed average method

0 引言

基桩反射波法的理论基础一直是基于一维弹性杆的纵波理论^[1-3]。然而实际工程中, 基桩并不是严格意义上的一维弹性杆。确切地说, 所有基桩的几何特征都是三维的, 因而实测信号和一维纵波理论相比, 总是存在不同程度的偏离, 即三维干扰信号。近年来, 大直径桩被广泛应用。随着桩直径的加大, 三维干扰信号愈加显著。如果仍然直接采用一维纵波理论, 势

必会产生误判, 得出错误的检测结论。因此, 充分认识三维干扰信号的产生机理, 减少或消除三维干扰信号, 是基桩反射波法正确应用的关键之一。

三维干扰信号的成因迄今有两个不同方面的解释。一方面是从弹性波传播的角度, 认为三维干扰信

收稿日期: 2016-06-16

*通讯作者 (E-mail: xzhao@stu.edu.cn)

号是桩顶表面波与剪切波的耦合作用结果^[4],或表面波在桩顶面的来回反射所致^[5-6]。另一方面是从振动的角度,认为三维干扰信号起因于某一系列的振动模态^[7-8],中国的基桩检测规范^[9-10]也认为三维干扰可能来自于某一振动模态。波动分析考察质点的运动,只能进行定性分析。模态则反映整体结构的运动,即结构的全面特性。

在建基桩的低应变完整性测试中,目前主要利用单个探头在三维干扰最小的位置进行竖向采样,力求最大限度地减少三维干扰信号。根据参数分析,陈凡等^[4]提出三维干扰最小点位于 $0.67R$ 处,中国相关的基桩检测规范^[9-10]也规定检测点宜在 $0.67R$ 处。柯宅邦等^[5]、卢志堂等^[6]位于 $0.55R$ 处,而 Chow 等^[11]提出位于 $0.5R$ 处。上述研究给出的三维干扰最小点位置都是相对确定不变的,而且不同研究者给出的点位不同。郑长杰等^[7]基于其简化的半解析模型,提出三维干扰最小点介于 $0.5R \sim 0.7R$,但也未建立桩身相关参数与三维干扰最小点位置的关系。

双速度信号的应用方面,常见的低应变“双速度法”是在桩侧不同深度处安装两个探头,用于测试探头之间桩身混凝土的纵波波速;或根据分离出的上行波帮助评判在役结构下部基桩的桩身完整性^[12]。但未见到双速度平均信号在消除三维干扰方面的研究报道。

本文基于工程实测和三维数值分析,通过模态叠加法解释了三维干扰信号的成因。给出了基于桩身物理参数的三维干扰最小点位置的表达式。利用低应变双通道仪,提出并实现了可有效消除三维干扰信号的“双速度平均法”。

1 三维干扰成因

桩顶表面某一点的竖向位移,通过模态叠加法可表示为

$$U_z(t, r/R) = \eta_1(t)U_{z1}(r/R) + \eta_2(t)U_{z2}(r/R) + \dots + \eta_i(t)U_{zi}(r/R) + \dots + \eta_n(t)U_{zn}(r/R), \quad (1)$$

式中, $U_z(t, r/R)$ 为桩顶面某一测点的竖向位移值, $U_{zi}(r/R)$ 为第 i 阶模态在该点的竖向位移值, $\eta_i(t)$ 为第 i 阶模态的模态参与系数(又称为模态坐标)。 R 为基桩半径, r/R 表示该测点在基桩顶面半径上的相对位置。

首先,利用ANSYS有限元方法,对直径2.9 m, 桩长25 m, 混凝土密度 2.45 g/cm^3 , 弹性模量 40.2 GPa 即一维纵波波速 4050 m/s 、泊松比 0.28 (各参数与图10中工程基桩5-0的参数一致)的纯桩模型进行模态分析。单元尺寸分析表明,当单元的尺寸小于 10 cm 时,计算曲线趋于收敛。本文桩身网格径向尺寸为 5 cm , 轴向尺寸 5 cm , 环向 120 等分。

cm, 轴向尺寸 5 cm , 环向 120 等分。

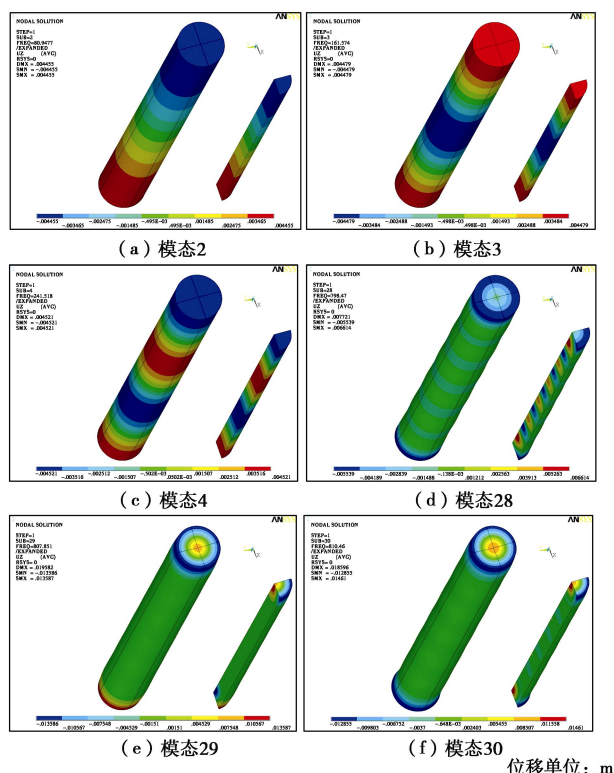


图1 部分模态的 u_z 位移云图

Fig. 1 Displacement nephogram of vibration modes

在实际工程中,基桩低应变检测通常采用桩顶中心敲击,因此荷载和结构构成轴对称体系。此时,轴对称模态被激发,而非轴对称模态被抑制,因此不需要考虑。轴对称模态可分为两类,一类为轴向振动模态,典型模态如图1(c)~(d)所示。一类为径向振动模态,经过大量的计算发现,仅有两个此种模态,如图1(e)、(f)所示。它们有如下特点:

(1) 低阶的轴向振动模态在桩顶面的竖向位移接近平面,见图1(a)~(c)。桩顶面的运动接近于平动,并不带来径向各测点的位移(速度)差异,这部分模态是一维纵波理论的主要贡献部分。随着频率的增大,高阶轴向振动模态中会出现逐渐明显的径向位移差,见图1(d)。

(2) 对于轴对称径向振动模态,桩顶表面的运动呈凹凸变化。它们在桩顶表面直径上的位移近似为抛物线,可带来径向各测点的明显速度差异。

进一步对上述模型开展桩顶表面中心敲击下的模态叠加分析,荷载采用升余弦函数,表示为

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{t_0} \right) & (0 \leq t \leq t_0) \\ 0 & (t \geq t_0) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $F_0 = 10 \text{ kN}$, $t_0 = 1.6 \text{ ms}$ 。

图2是图1各个模态随时间变化的参与系数

$\eta_i(t)$ 。荷载结束后, 它们随时间呈简谐函数的周期性变化, 变化频率等于各自的自振频率。

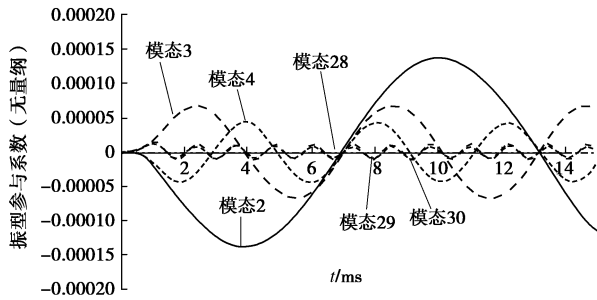


图2 部分模式的参与系数 $\eta_i(t)$

Fig. 2 $\eta_i(t)$ of vibration modes

从图2可以看出:

(1) 低阶轴向振动模式的参与系数显著大于高阶模式, 说明它们是构成测试信号的主要贡献者; 而高阶轴向振动模式的参与系数较小, 如模式28的参与系数几乎为零。从而说明, 尽管高阶轴向振动模式在桩顶面存在径向位移差, 但是由于参与系数小, 其贡献较小。

(2) 轴对称径向振动模式的参与系数相对较大。因此它们会导致桩顶面产生明显的位移(速度)差异。

图3是轴向振动模式2和3在0.67R处的竖向叠加加速度曲线。可以看出, 两者叠加后明显地加强了入射信号和桩底反射信号, 但显著地减弱了位于桩身中部的信号, 这源于两个模式之间的正交性。

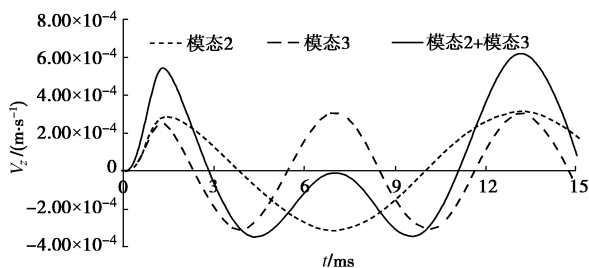


图3 模式2与模式3在0.67R处的叠加速度

Fig. 3 Velocity summation of vibration mode 2 and vibration mode 3 at 0.67R

图4是不同数量的轴向振动模式叠加后的速度信号对比, 如曲线模式1~200-模式(29+30)代表前200阶模式剔除轴对称径向振动模式29和30之后, 共198个模式的叠加速度。图4中的速度信号仅来源于轴向振动。

图4表明, 尽管轴向振动模式也会产生干扰信号(见图中的模式2+模式3曲线), 由于模式之间的正交性, 随着参与叠加的模式数量增加, 轴向振动模式对三维干扰信号的贡献被逐渐抵消, 如曲线模式1~200-模式(29+30)。最终, 轴向振动模式对三维干扰

信号贡献很小。而且, 由于高阶轴向振动模式的模式坐标较小, 轴向振动模式对桩顶面不同测点之间信号差异的贡献同样较小。因此, 轴向振动模式主要对入射信号和桩底反射信号产生显著贡献, 这与一维纵向振动理论是基本一致的。

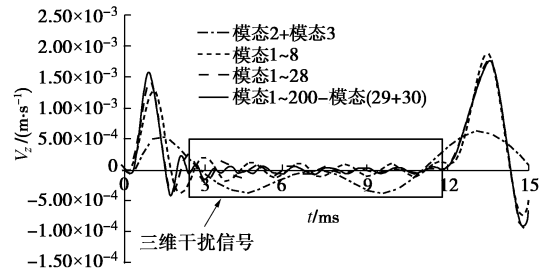


图4 0.67R处不同数量轴向振动模式叠加后的速度信号对比

Fig. 4 Comparison of V_z velocities at 0.67R after summation of axial vibration modes with various quantities

图5是三维干扰信号来源分析图, 信号采集自0.67R处。其中, 模式1~200的计算曲线和ANSYS LS-DYNA瞬态分析计算曲线(包含无穷个模式)两者几乎一致, 说明前200阶模式叠加时计算精度是足够的。

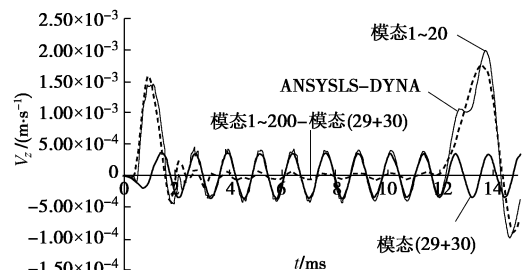


图5 三维干扰信号来源的模式叠加法解释

Fig. 5 Illustration of 3D interference sources through mode superposition

图5表明: 常见荷载脉宽下, 轴对称径向振动模式的叠加速度曲线, 与瞬态计算曲线和模式1~200的叠加计算曲线中的三维干扰速度信号几乎重合, 这从能量上说明了三维干扰信号主要来自于轴对称径向振动模式, 它们对应于桩顶面的凹凸运动, 是不同测点之间速度差异的主要来源。

从前面的分析可知, 三维干扰主要来源于轴对称径向振动模式, 而轴向振动模式贡献很小。因此, 本例参数下, 桩顶面三维干扰的位移表达式可表示为

$$U_z(t, r/R)_{\text{三维干扰}} \approx \eta_{29}(t)U_{z29}(r/R) + \eta_{30}(t)U_{z30}(r/R). \quad (3)$$

三维干扰速度可由式3求导数得到, 有

$$V_z(t, r/R)_{\text{三维干扰}} \approx \eta'_{29}(t)U_{z29}(r/R) + \eta'_{30}(t)U_{z30}(r/R). \quad (4)$$

为验证上述结论, 进一步对不同波速、不同泊松

比和不同桩径的情况进行了分析, 图 6 是不同参数组合下前 200 阶模态与相应的两个轴对称径向振动模态所产生的合速度信号。它同样表明, 不同参数组合下, 三维干扰信号均主要来自于两个轴对称径向振动模态。

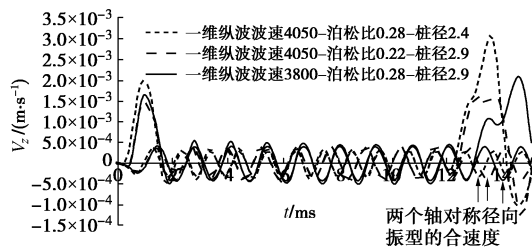


图 6 不同参数组合下的 0.67R 处计算 V_z 曲线

Fig. 6 Calculated signal curves under combination of different parameters

表 1 不同参数组合下剪切波和表面波往返频率与径向振动模态频率的对比

Table 1 Comparison of frequencies under various parameters					
一维纵波波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	泊松比	桩径 d/m	剪切波往返频率/Hz	表面波往返频率/Hz	径向振动模态自振频率/Hz
4050	0.28	2.9	873	807	809
4050	0.28	2.4	1055	975	976
4050	0.22	2.9	894	817	795
3800	0.28	2.9	819	757	760

注: 剪切波(表面波)往返频率是指剪切波(表面波)在桩顶半径上一次往返时间的倒数, 由基桩直径除以三维弹性体的剪切波速和表面波速得到。

表 1 中列出了图 5, 6 参数组合下剪切波与表面波往返频率及径向振动模态自振频率。常见混凝土泊松比之下, 表面波在桩顶面往返频率和轴对称径向振动模态的自振频率十分接近。这说明类似于共振, 表面波放大了轴对称径向振动模态的速度贡献。

2 消除三维干扰的采样方法

2.1 理论基础

在图 5 曲线所示的 8.864 ms (峰值) 和 9.481 ms (谷值) 时刻, 整个桩顶面测点的竖向速度近似同时达到凸向分布和凹向分布的峰值, 提取此时桩顶面各点的竖向速度, 将它们作为图 7 中两条近似的竖向速度振幅包络线^[4], 振幅包络线的交汇点便是三维干扰速度最小点。图 7 中的 MOED29 曲线是将图 1 中径向振动模态 29 在桩顶面的位移曲线与速度包络线做归一化处理之后的结果 (MODE30 与之类似)。

图 7 表明, 桩顶表面竖向速度包络线与轴对称径

向振动模态在桩顶面的竖向位移曲线的形状近似一致, 三维干扰速度最小点位置与轴对称径向振动模态在桩顶面的模态位移零点几乎重合。这说明三维干扰最小点具有较为明确的几何意义, 通过参数分析得到其位置的变化规律可以修正规范推荐的采样点位。其次, 三维干扰最小点两侧的速度反向, 它源于轴对称径向振动模态在桩顶位移零点的两侧位移反向, 基于这一特点, 提出了新的消除三维干扰的采样方法——“双速度平均法”。

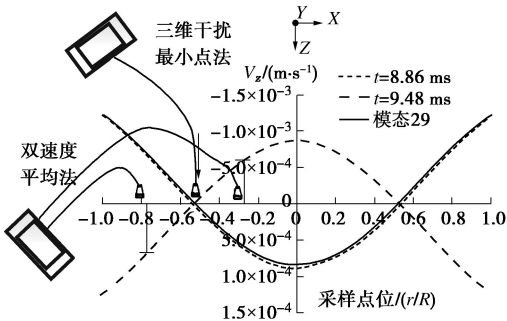


图 7 桩顶的三维干扰速度振幅包络线

Fig. 7 Envelope curves of speed amplitude versus r/R

2.2 参数修正的三维干扰最小点采样法

中国现有规范规定的采样点位是 0.67R 处^[9-10]。图 8 显示三维干扰最小点的相对位置 r/R 随桩身混凝土泊松比 ν 的变化而不同, 而且参数分析表明, 其它桩土参数的影响较小 (已另文论述), 这与三维干扰主要来自于径向振动模态有关。

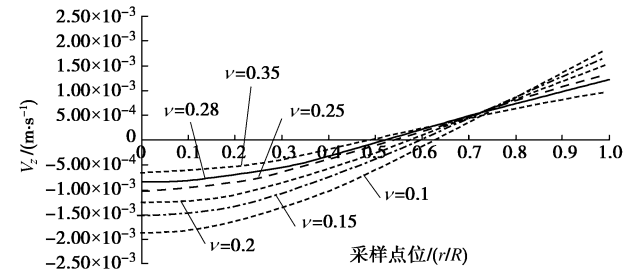


图 8 桩身混凝土泊松比变化时的速度振幅包络线

Fig. 8 Envelope curves of velocity amplitude versus variation of Poisson's ratio of pile concrete

图 9 表明在泊松比 0.1~0.35 范围内, 三维干扰最小点受桩身混凝土泊松比的修正表达式为

$$r/R = -0.5\nu + 0.67 \quad (5)$$

在得到准确的混凝土泊松比的条件下, 可以按照式 (5) 对现有规范推荐的采样点位 0.67R 进行修正。如, 泊松比等于 0.15 时, 三维干扰最小点在 0.6R 处, 与文献[7]一致。泊松比等于 0.28 时, 三维干扰最小点在 0.53R 处, 与文献[5]近似一致。

式 (5) 表明, 当泊松比在 0.10~0.35 范围内 (常

见混凝土泊松比), 干扰最小点位于 $0.50R \sim 0.62R$ 之间, 都未达到 $0.67R$ 。当减去钢筋笼保护层厚度, 钢筋笼半径的 $2/3$ 处将比桩径的 $2/3$ 处更接近实际的三维干扰最小点。所以, 对于混凝土泊松比未知的基桩, 建议将钢筋笼半径的 $2/3$ 处作为采样点位, 这同时可以便于工人更直观地定位测点打磨位置。

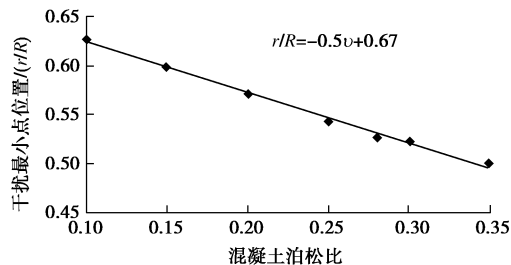


图 9 三维干扰最小点位置和泊松比的函数关系

Fig. 9 Relationship between 3D interference minimum point location and Poisson's ratio of pile concrete

2.3 双速度平均法

图 7 表明, 在干扰最小点附近的两侧, 必定存在多对近似等距离的两点, 它们的干扰速度大小相等, 方向相反。故而, 当在三维干扰最小点(或钢筋笼半径 $2/3$ 处)的两侧附近布置两个测点, 同时采样并平均, 通过两个探头的移动搜索, 在两个探头间距不同的情况下, 可得到多个三维干扰较小的平均信号, 这便是图 7 所示的“双速度平均法”。为确保两个测点信号的首波延时和三维干扰信号相位差的准确性, 采样时必须使用低应变双通道检测仪同时采集两点信号。

3 方法验证

分别从工程实测信号和数值模拟两方面对本文方法进行验证。

3.1 工程实测信号分析

工程基桩 5-0, 桩长 25 m, 因打入钢护筒, 实际桩径在桩顶以下 $0 \sim 5$ m 的范围内为 2.9 m, 5 m~桩底范围内由 2.9 m 渐变至 2.6 m。声波透射法和抽芯检测方法都表明, 桩底 2 m 范围内存在混凝土缺陷。

测试设备采用美国 PIT 双通道基桩反射波测试仪, 该仪器可兼顾单通道和双通道(双速度)信号的采集。力锤为自制的 13 kg 铁锤, 锤头材料为尼龙, 桩中心敲击。实测荷载脉宽 $t_0=1.6$ ms, 在半径上采集了 19 个测点信号。

工程基桩 5-0 的泊松比为 0.28。图 10 表明, 由桩中心向 $0.53R$, 三维干扰的强度逐渐减弱, 由 $0.53R$ 向桩最外侧, 干扰强度逐渐增大, 因此 $0.53R$ 处近似为三维干扰最小点。以 $0.53R$ 处的信号为界, 同侧的测点, 三维干扰信号同相位, 而两侧的测点, 三维干

扰信号反相位。各实测曲线的干扰信号频率均约为 815 Hz, 与同参数的纯桩模型图 1 中径向振动模态 29 和 30 的自振频率 809 Hz 近似一致。

三维干扰信号的强度和相位的变化规律及频率都表明, 三维干扰主要来源于轴对称径向振动模态在桩顶面的竖向位移, 土层的影响并不大, 相关参数分析也证明了这一现象。

图 10 同时表明, $0.53R$ 处近似为三维干扰最小点, 这与式 (5) 在泊松比 0.28 时的计算结果一致, 从而验证了式 (5) 的正确性。图 11 表明, 基桩 5-0 在 $0.53R$ 处的三维干扰信号弱于规范推荐的 $0.67R$ 处, 说明在修正后的三维干扰最小点处采样, 测试效果更好。

同时采集三维干扰最小点 $0.53R$ 处左右两侧等距离的两点—— $0.39R$ 处和 $0.67R$ 处的信号, 信号平均前后的对比如图 12 (a) 所示。可以看出, 双速度平均信号的三维干扰强度较 $0.39R$ 和 $0.67R$ 处信号有显著的减弱。

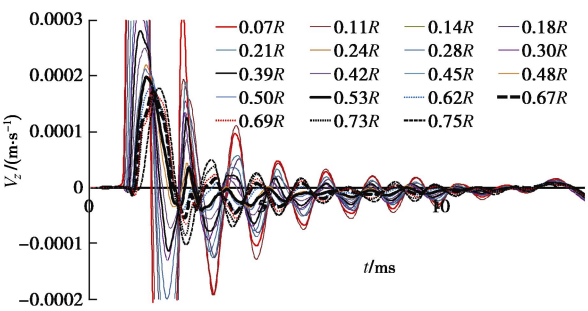


图 10 实测信号汇总图

Fig. 10 Curves of measured velocities at various points

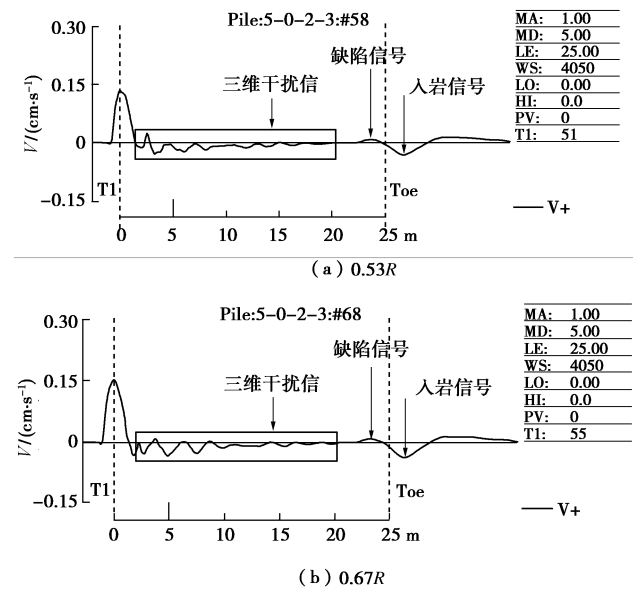


图 11 $0.53R$ 与 $0.67R$ 处测点信号

Fig. 11 Curves of measured velocities at $0.53R$ and $0.67R$

图 12 (b) 为实测的 $0.39R$ 和 $0.67R$ 处的双速度平

均信号与三维干扰最小点 $0.53R$ 处信号的对比。两者在信号的中后段近似一致，在信号的前段，双速度平均信号的干扰强度有进一步的削弱。

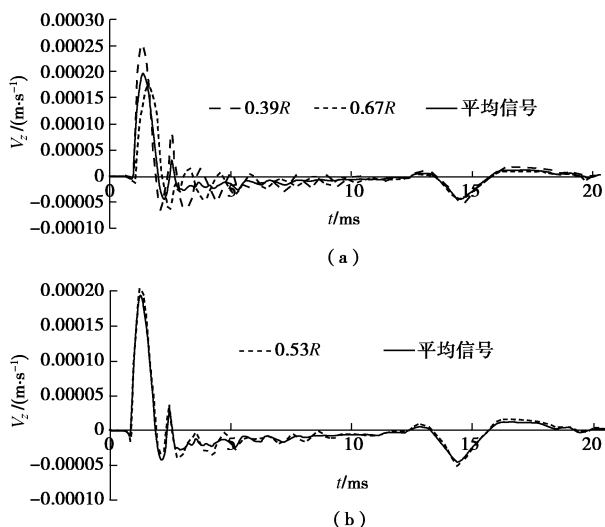


图 12 $0.39R$ 与 $0.67R$ 处实测的双速度信号

Fig. 12 Comparison of measured double-speed average signal curves at $0.39R$ and $0.67R$

图 13 为 $0.53R$ 处左右两侧等距离的两点— $0.3R$ 和 $0.75R$ 处实测的双速度平均信号的相关对比，它与图 12 体现了同样的规律。

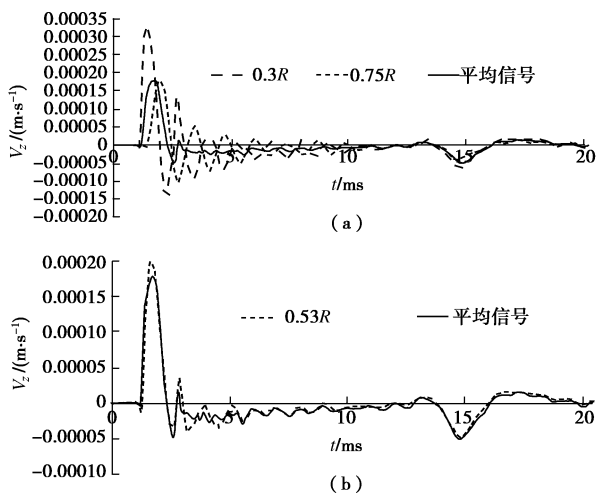


图 13 $0.3R$ 与 $0.75R$ 处实测的双速度信号

Fig. 13 Comparison of measured double-speed average signal curves at $0.3R$ and $0.75R$

结合图 12 和图 13 可知，干扰最小点附近两侧近似等距离的两点均可作为双速度平均法的采样点位置。

3.2 数值模拟分析

基桩 5-0 的数值模型见图 14。桩身网格径向尺寸为 5 cm ，高度 5 cm ，环向 120 等分，土层网格高度 5 cm ，环向 120 等分，径向尺寸为 $2.5\sim 20\text{ cm}$ ，由内向外逐渐增大。在桩土之间设置了厚 2.5

cm 连续的实体薄夹层模拟“泥皮层”。共 350 万个单元。由于低应变的冲击能量较小，模型中桩土界面共用节点，即桩土界面力与位移连续。在土层最外侧和底部设置了无反射边界。

桩身混凝土相关参数通过实验室预留试件结合抽芯芯样及现场敲击试验确定，混凝土密度 2.45 g/cm^3 ，弹性模量 40.2 GPa （一维纵波波速 4050 m/s ），泊松比 0.28 。桩底缺陷混凝土弹性模量为 14.0 GPa ，泊松比约为 0.32 ，密度为 2.00 g/cm^3 。桩周土共 7 层，参数通过野外现场试验确定，剪切波速取值范围为 $350\sim 1500\text{ m/s}$ ，相应泊松比变化范围为 $0.36\sim 0.25$ 。采集自桩顶以下约 3 m 处桩侧泥皮层的剪切波速近似为 300 m/s ，泊松比取 0.38 。荷载形式见式 (2)，荷载脉宽 $t_0=1.6\text{ ms}$ 。

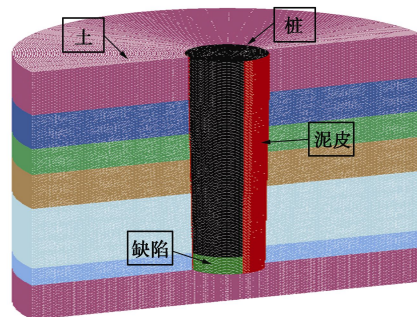


图 14 桩土模型

Fig. 14 Pile-soil model

图 15 是对应图 10 中各实测测点位置的计算曲线。图 15 表现出与图 10 完全一致的特征，三维干扰最小点同样位于 $0.53R$ 处，这表明式 (5) 对现有规范推荐的采样点位具有较好的修正作用。

需指出的是，计算表明，工程基桩 5-0 桩径的极轻微渐缩和桩底缺陷对三维干扰信号都几乎没有影响。

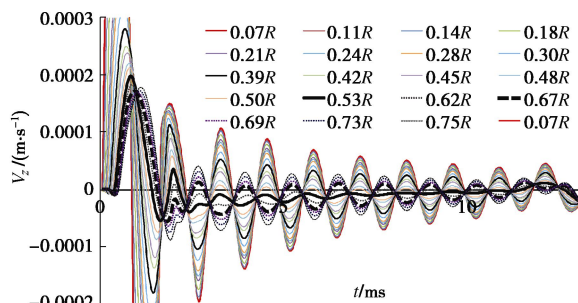


图 15 桩顶不同测点处的计算速度曲线

Fig. 15 Curves of simulated velocities at various points

图 16 (a) 为 $0.39R$ 和 $0.67R$ 处的计算曲线及它们的平均信号。同样可以看出，双速度平均信号的三维干扰强度较 $0.39R$ 和 $0.67R$ 处信号显著减弱。

图 16 (b) 为 $0.39R$ 和 $0.67R$ 处拟合的双速度平均

信号与干扰最小点 $0.53R$ 处的拟合信号对比。与实测信号的规律相同, 它们在信号的中后段近似一致, 在信号的前段, 平均信号的干扰强度有进一步的削弱。

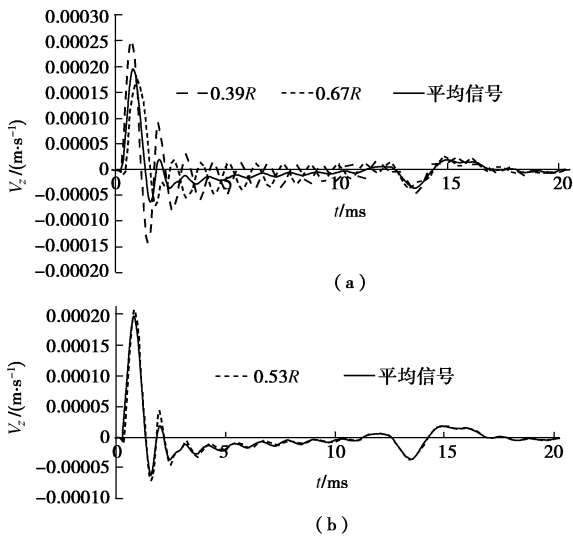


图 16 $0.39R$ 与 $0.67R$ 拟合双速度信号相关对比

Fig. 16 Comparison of simulated double-speed average signal curves at $0.39R$ and $0.67R$

图 17 为 $0.3R$ 和 $0.75R$ 处拟合的双速度平均信号的相关对比, 与图 16 具有同样的规律。

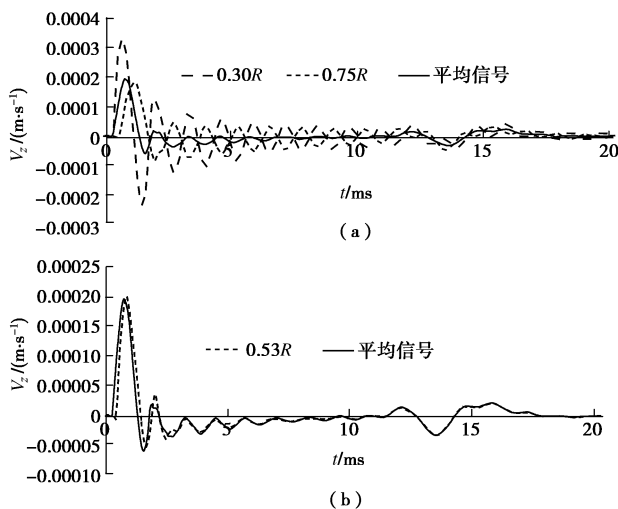


图 17 $0.3R$ 与 $0.75R$ 拟合双速度信号相关对比

Fig. 17 Comparison of simulated double-speed average signal curves at $0.3R$ and $0.75R$

上述实测和拟合信号都表明: 与现有规范推荐的 $0.67R$ 处相比, 在经过桩身混凝土泊松比修正后的三维干扰最小点处采样, 可降低三维干扰信号的强度。双速度平均信号优于三维干扰最小点处的单点测试信号, 并且显著地扩大了测点的选择范围。

需要说明的是, 双速度平均法只是消除了桩顶面的三维干扰信号, 而对桩周土、桩身中下部混凝土缺陷的反射信号不会产生不当的消除, 这是因为它们的

反射信号在桩顶接近平面波。对于浅部的非轴对称局部缺陷或轴对称缺陷, 由于两个采样点相距较近, 此时两个测点处信号反向的可能性非常低, 故也几乎不存在不当消除的问题。该方法不仅可以扩大测点的选择范围, 也降低了对次生干扰源的敏感性, 如减小了测点混凝土平整度较差带来的次生振荡信号。在实际检测中, 双速度平均法可通过低应变双通道仪简单地实现。

4 结论与建议

基于模态叠加法, 将信号分解为不同模态的速度贡献, 定量分析了三维干扰的成因。结合工程实测和数值分析, 提出了基桩反射波法消除三维干扰的最佳采样方法。所得结论与建议如下:

(1) 中心敲击时, 只激发轴对称的轴向和径向振动模态。入射和桩底信号主要来源于轴对称轴向振动模态, 而三维干扰信号主要来源于轴对称径向振动模态。轴对称径向振动模态在桩顶面的位移零点为三维干扰最小点。

(2) 给出了基于桩身混凝土泊松比的三维干扰最小点相对位置的数学表达式, 它可对现有规范推荐的采样点位 $0.67R$ 进行合理的修正。这一表达式简单、方便于工程实用。在混凝土泊松比未知的条件下, 建议在钢筋笼半径的 $2/3$ 处采样。

(3) 提出了一种新的消除三维干扰的采样方法——双速度平均法。这一方法利用低应变双通道仪, 在干扰最小点两侧, 通过两个探头的移动搜索, 可得到多个三维干扰较小的平均信号。与三维干扰最小点处的单点采样法相比, 双速度平均法不仅信号质量更优, 而且测点选择范围更大、抗次生干扰的能力也更强。

参考文献:

- [1] 陈凡, 徐天平, 陈久照, 等. 基桩质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 2-3. (CHEN Fan, XU Tian-ping, CHEN Jiu-zhao, et al. Pile quality testing technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 2-3. (in Chinese))
- [2] 王雪峰, 吴世明. 基桩动测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 30-34. (WANG Xue-feng, WU Shi-ming. Dynamic measurement techniques of foundation piles[M]. Beijing: Science Press, 2001: 30-34. (in Chinese))
- [3] RAUSCHE F, LIKINS G, SHEN R K. Pile integrity testing and analysis[C]// Memories Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Wave

- Theory to Piles. Netherlands, 1992: 613 - 7.
- [4] 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. (CHEN Fan, WANG Ren-jun. Dimension effect on low strain integrity testing of piles[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 92 - 96. (in Chinese))
- [5] 柯宅邦, 刘东甲. 低应变反射波法测桩的轴对称问题数值计算[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2111 - 2115. (KE Zhai-bang, LIU Dong-jia. Numerical computation of axisymmetric problems in low strain integrity tests on piles[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2111 - 2115. (in Chinese))
- [6] 卢志堂, 刘东甲, 龙丽丽, 等. 基桩低应变检测三维问题的数值计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, **34**(6): 905 - 909. (LU Zhi-tang, LIU Dong-jia, LONG Li-li, et al. 3-D numerical computation for low strain integrity testing of piles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, **34**(6): 905 - 909. (in Chinese))
- [7] ZHENG C J, GEORGE P K, DING X M, et al. Three dimensional effects in low strain integrity testing of piles analytical solution[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **53**(2): 225 - 235.
- [8] 郑长杰, 丁选明, 刘汉龙, 等. 饱和均质土中PCC桩纵向振动响应简化解析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 1087 - 1090. (ZHENG Chang-jie, DING Xuan-ming, LIU Han-long, et al. Simplified analytical solution for vertical vibration of PCC piles in saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1087 - 1090. (in Chinese))
- [9] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 2014. (JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2014. (in Chinese))
- [10] JTG/T F81—01—2004 公路工程基桩动测技术规程[S]. 2004. (JTG/T F81—01—2004 Technical specification of dynamic pile tests for highway engineering[S]. 2004. (in Chinese))
- [11] CHOW Y K, PHOON K K, CHOW W F, et al. Low strain integrity testing of piles three-dimensional effects[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2003, **129**(11): 1057 - 1062.
- [12] 赵冉, 苏林王. 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. (ZHAO Ran, SU Lin-wang. Integrity testing of in-service piles based on double-velocity test method[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(8): 153 - 158. (in Chinese))

本期广告索引

- 封2 南京嘉兆仪器设备有限公司
封3 南瑞集团水利水电技术分公司
封4 北京理正软件股份有限公司
后插1 济南普业机电技术有限公司
后插2 重庆地质仪器厂