

管桩低应变检测中的三维效应分析

卢志堂^{1,2}, 王志亮¹, 刘东甲², 杨晓峰²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 建立了三维柱坐标下桩土系统瞬态振动的计算模型, 根据弹性动力学方程、边界条件和初始条件, 确立了定解问题. 利用交错网格有限差分法编制了相应计算程序, 得出该定解问题的数值解, 探讨了完整桩在竖向激振力作用下的瞬态动力响应, 给出了桩顶不同位置的速度时程灰度图, 并比较了桩顶与桩底各点竖向速度时程曲线的差别. 基于管桩的低应变完整性测试数据, 验证了该数值算法的可靠性及其反映波在管桩中传播的三维效应的可行性. 在实际检测过程中, 特别是在三维波动方程无法求得解析解的条件下, 该数值计算结果具有一定的指导意义.

关键词: 三维桩土模型; 交错网格; 有限差分法; 三维效应; 实验分析

中图分类号: TU473.16

文献标识码: A

Analysis of 3-D Effects in Low Strain Testing of Pipe Pile

LU Zhitang^{1,2}, WANG Zhiliang¹, LIU Dongjia², YANG Xiaofeng²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A real three dimensional (3-D) pile-soil model under cylindrical coordinate system is established in order to get a deep understanding of low strain integrity testing of pipe pile. According to elastodynamic equations, boundary conditions and initial conditions, the definite solution of this problem can be obtained. Then, based on the staggered grid finite difference method, the transient dynamic responses of a pipe pile subjected to transient vertical loading are discussed. Not only the velocities of different angles at pile top are obtained, but also the testing curves are presented, which directly reflects the 3-D effects of wave propagating in the

pipe pile. Finally, the accuracy and feasibility of the numerical method are verified via comparing with the experimental data. In practice, especially under the conditions that the analytical solution of 3-D elastodynamic equations cannot be derived, the numerical solution has certain guiding significance.

Key words: 3-D pile-soil model; staggered grid; finite difference method; 3-D effects; experimental analysis

长期以来, 低应变反射波法测桩的依据都是一维杆理论, 管桩的检测主要是套用实心桩的检测理论与经验. 对管桩而言, 由于敲击位置在桩顶一侧, 三维效应比较突出. 因此, 运用三维波动理论指导桩基检测工作, 也就成为当前急需解决的课题.

对于三维条件下桩中弹性波传播问题, 由于其复杂性, 只能求助于数值法. 目前, 国内外已有一些采用有限元法得出的成果. 赵振东等^[1]用有限元法初步探索了激振力作用面积和桩身缺陷对桩中应力波的影响. Liao 等^[2]计算了轴对称条件下桩顶加速度、速度响应. 陈凡等^[3-4]研究了尺寸效应对自由桩低应变检测的影响. 肖兰喜等^[5]根据有限元计算的结果, 提出应采用三分量传感器测试. Chow 等^[6]也通过求解, 研究了轴对称桩检测时的三维效应. 黄大治等^[7]探讨了桩顶面不同测点的反射波信号特征及其与桩身裂缝的对应规律. 费康等^[8]通过计算, 分析了 PCC (thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete) 桩低应变检测中的三维效应. 但是, 目前运用有限元法得到的计算结果精度较低, 效果较差, 需要通过滤波等手段处理, 难以反映三维波动的真实细节.

刘东甲等人^[9-11]已将差分法用于基桩低应变检测的研究, 由于网格划分较细, 计算精度更高, 经证

收稿日期: 2011-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61179062); 中央高校基本科研业务费专项; 广东省科技厅科技项目(2009-02-020)

第一作者: 卢志堂(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为岩土动力学, 应力波损伤效应. E-mail: zhitang_lu@163.com

通讯作者: 王志亮(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩石动力与爆破工程, 路基沉降等.

E-mail: cvewzL@tongji.edu.cn

实其效果很好. 柯宅邦^[12]、卢志堂^[13]等对三维条件下桩土振动问题,采用交错网格差分法得出了精度较高的结果,并对桩顶三维效应的来源及如何避免三维干扰提出了相应的对策.

实际中,桩是三维体,桩身缺陷的形状、空间位置也是随机分布的,包括各种非圆形桩、管桩等的不断推广,因此有必要进行真三维条件下桩的低应变检测研究.

1 三维桩土模型及定解问题

如图 1 所示,桩长为 l 的管桩埋入土中,桩顶一侧受纵向激振力 $p(t)$ 的作用. 桩四周以及底部均为均质土,管桩内径范围内没有土. 其中桩土参数如下: ρ_p 为桩身的密度, λ_p 与 μ_p 为桩的拉梅系数. ρ_s 与 ρ_b 分别为桩周土和桩底土的密度, λ_s, μ_s 与 λ_b, μ_b 为桩周土和桩底土的拉梅系数.

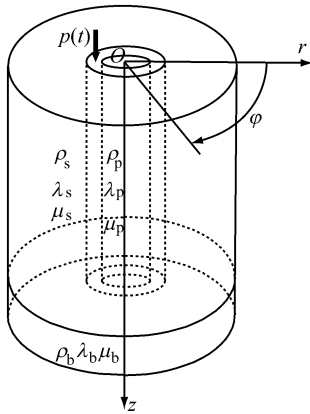


图 1 三维计算模型

Fig.1 3-D computational model

低应变条件下,将管桩与桩周土、桩底土看作是各向同性线弹性体,桩土不分离,并不考虑体力. 根据弹性动力学理论,可以得出如下方程:

$$\rho \dot{v}_r = \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} + \frac{T_{rr} - T_{\varphi\varphi}}{r} \quad (1)$$

$$\rho \dot{v}_\varphi = \frac{\partial T_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial T_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2}{r} T_{r\varphi} \quad (2)$$

$$\rho \dot{v}_z = \frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} T_{rz} \quad (3)$$

$$\dot{T}_{rr} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_r}{\partial r} + \lambda \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\dot{T}_{\varphi\varphi} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) + \lambda \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\dot{T}_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$\dot{T}_{r\varphi} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right) \quad (7)$$

$$\dot{T}_{rz} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\dot{T}_{\varphi z} = \mu \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \right) \quad (9)$$

式(1)~(9)中: v_r, v_φ, v_z 为质点振动的速度分量; $T_{rr}, T_{\varphi\varphi}, T_{zz}, T_{r\varphi}, T_{rz}, T_{\varphi z}$ 为应力分量,同时有 $T_{r\varphi} = T_{\varphi r}, T_{rz} = T_{zr}, T_{\varphi z} = T_{z\varphi}$; ρ 为弹性体的密度; λ 与 μ 为拉梅系数.

初始条件:由于在激振力作用前,桩土系统处于静止状态,所以初始时刻,桩土质点的速度分量和应力分量都为零.

边界条件:对于桩顶和地表所在的平面,边界条件为

$$T_{zz}(r, \varphi, 0, t) = \begin{cases} -\frac{p(t)}{\pi r_0^2}, & r^2 + r_c^2 - 2rr_c \cos(\varphi - \pi) \leq r_0^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{\varphi\varphi}(r, \varphi, 0, t) = T_{\varphi r}(r, \varphi, 0, t) = 0 \quad (11)$$

其中

$$p(t) = \begin{cases} \frac{I}{t_0} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{t_0} \right), & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $r_c = (r_i + r_o)/2$, r_i 和 r_o 分别为管桩内壁半径和外壁半径; r_0 为激振力作用半径; I 和 t_0 分别是激振力冲量和作用时间.

桩土衔接条件:对于桩土交界面,桩土不分离,即应力与速度连续.

以上构成了桩土系统三维振动的定解问题.

2 定解问题的差分离散

具体的空间离散见图 2 所示,通过对应力分量和速度分量进行交错采样,很好地处理了一阶波动方程中应力和速度的耦合关系.

根据图 2,可以将式(1)~(9)表示为以下一阶差分方程组:

$$\rho \dot{v}_r = \frac{(r^{(o)} T_{rr}^{(o)} - r^{(i)} T_{rr}^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{(T_{r\varphi}^{(+)} - T_{r\varphi}^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{(T_{rz}^{(t)} - T_{rz}^{(b)})}{\Delta z} + \frac{T_{rr}^{(o)} + T_{rr}^{(i)} - T_{\varphi\varphi}^{(o)} - T_{\varphi\varphi}^{(i)}}{2r^{(c)}} \quad (13)$$

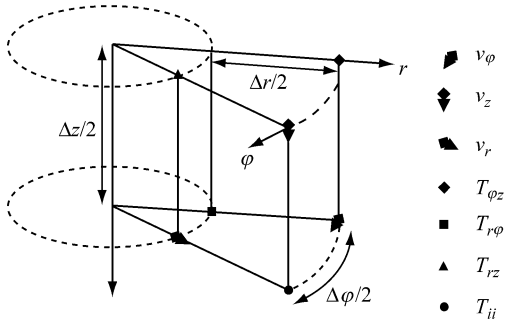


图 2 交错差分离散单元

Fig.2 Computational cell for staggered difference

$$\rho \dot{v}_z = \frac{(r^{(o)} T_{rz}^{(o)} - r^{(i)} T_{rz}^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{(T_{\varphi z}^{(+)} - T_{\varphi z}^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{(T_{zz}^{(t)} - T_{zz}^{(b)})}{\Delta z} + \frac{T_{rz}^{(o)} + T_{rz}^{(i)}}{2r^{(c)}} \quad (14)$$

$$\rho \dot{v}_\varphi = \frac{(r^{(o)} T_{r\varphi}^{(o)} - r^{(i)} T_{r\varphi}^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{(T_{\varphi\varphi}^{(+)} - T_{\varphi\varphi}^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{(T_{z\varphi}^{(t)} - T_{z\varphi}^{(b)})}{\Delta z} + \frac{T_{r\varphi}^{(o)} + T_{r\varphi}^{(i)}}{r^{(c)}} \quad (15)$$

$$\dot{T}_{rr} = \frac{(\lambda + 2\mu)(r^{(o)} v_r^{(o)} - r^{(i)} v_r^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{\lambda(v_\varphi^{(+)} - v_\varphi^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{\lambda(v_z^{(t)} - v_z^{(b)})}{\Delta z} + \frac{\lambda(v_r^{(o)} + v_r^{(i)})}{2r^{(c)}} \quad (16)$$

$$\dot{T}_{zz} = \frac{(\lambda + 2\mu)(v_z^{(t)} - v_z^{(b)})}{\Delta z} + \frac{\lambda(v_\varphi^{(+)} - v_\varphi^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{\lambda(r^{(o)} v_r^{(o)} - r^{(i)} v_r^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{\lambda(v_r^{(o)} + v_r^{(i)})}{2r^{(c)}} \quad (17)$$

$$\dot{T}_{\varphi\varphi} = \frac{(\lambda + 2\mu)(v_\varphi^{(+)} - v_\varphi^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{\lambda(r^{(o)} v_r^{(o)} - r^{(i)} v_r^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{\lambda(v_z^{(t)} - v_z^{(b)})}{\Delta z} + \frac{(\lambda + 2\mu)(v_r^{(o)} + v_r^{(i)})}{2r^{(c)}} \quad (18)$$

$$\dot{T}_{rz} = \frac{\mu(r^{(o)} v_z^{(o)} - r^{(i)} v_z^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} + \frac{\mu(v_r^{(t)} - v_r^{(b)})}{\Delta z} \quad (19)$$

$$\dot{T}_{r\varphi} = \frac{\mu(v_r^{(+)} - v_r^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} + \frac{\mu(r^{(o)} v_\varphi^{(o)} - r^{(i)} v_\varphi^{(i)})}{r^{(c)} \Delta r} - \frac{\mu(v_\varphi^{(o)} + v_\varphi^{(i)})}{2r^{(c)}} \quad (20)$$

$$\dot{T}_{z\varphi} = \frac{\mu(v_\varphi^{(t)} - v_\varphi^{(b)})}{\Delta z} + \frac{\mu(v_z^{(+)} - v_z^{(-)})}{r^{(c)} \Delta \varphi} \quad (21)$$

式(13)~(21)中: $r^{(c)}$, $r^{(o)}$, $r^{(i)}$ 分别为差分单元中间、外侧、内侧到 z 轴的径向距离; $(+)$, $(-)$ 分别表示差分单元沿 φ 轴的前、后位置; (t) , (b) 分别表示差分单元沿 z 轴的上、下位置。

除了在空间交错采样外,对时间也采用了交错计算的处理,即

$$\begin{cases} v_i^{(n)} = v_i^{(n-1)} + \dot{v}_i^{(n-1/2)} \Delta t \\ T_{ij}^{(n+1/2)} = T_{ij}^{(n-1/2)} + \dot{T}_{ij}^{(n)} \Delta t \end{cases} \quad (22)$$

式中:上标 n 表示时步; Δt 为时间采样间隔。

计算时,需满足 Courant 数值稳定性条件,即时间与空间采样间隔之间应该满足下式:

$$c_p \Delta t \sqrt{1/(\Delta r)^2 + 1/(\Delta z)^2 + 1/(r_i \Delta \varphi)^2} \leq 1 \quad (23)$$

式中: c_p 表示弹性体中最大波速,也就是桩身纵波波速; r_i 表示管桩内壁半径。

对于桩顶边界条件,根据式(6)可得

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\dot{T}_{zz}}{\lambda + 2\mu} - \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \quad (24)$$

其中, $\partial v_r / \partial r$ 与 $\partial v_\varphi / \partial \varphi$ 按照泰勒公式展开得出差分格式。

材料参数 ρ , λ 与 μ 采样位置跟正应力位置一致。对桩土交界面, ρ 和 μ 需采用附近网格点的平均值,具体处理过程见文献[13]。通过调整对应界面处的材料参数值,就可以保证速度和应力连续,且差分格式不变,保持了计算的紧凑性。

由于实际模型区域是无穷大的,考虑波在桩中传播一个回程这段时间内,边界上的反射波尚未到达桩身,就能满足预期要求,据此可以截取桩身之外一定范围的区域,作为人工边界。

计算过程:① 将 $T_{ij}^{(n-1/2)}$ 代入式(13)~(15)求出 $\dot{v}_i^{(n-1/2)}$,根据式(22)中第一式求出 $v_i^{(n)}$;② 将步骤①求出的 $v_i^{(n)}$ 代入式(16)~(21)求出 $\dot{T}_{ij}^{(n)}$,根据式(22)中第二式求出 $T_{ij}^{(n+1/2)}$;③ 重复步骤①和②。初始时刻,应力与速度分量均为零。按照以上步骤就可以实现数值求解。

3 数值计算求解及分析

由上述算法,编制了 Matlab 计算程序,对管桩的瞬态振动问题进行正演计算。

算例参数如下:桩身密度 $\rho = 2450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,桩长 $l = 7.0 \text{ m}$,内径 $D_i = 0.3 \text{ m}$,壁厚 $h = 0.1 \text{ m}$ 。泊松比 $\nu_p = 0.28$,弹性模量 $E = 3.5 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$;桩周土密度、剪切波速及泊松比分别为 $\rho_s = 1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $v_s = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\nu_s = 0.38$;桩底土密度、剪切波速及泊松比分别为 $\rho_b = 1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $v_b = 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\nu_b = 0.35$;激振力参数为 $t_0 = 0.8 \text{ ms}$, $I = 1 \text{ N} \cdot \text{s}$,激振力作用等效半径 $r_0 = 2 \text{ cm}$,作用区域为壁厚中心线 180° 处。计算网格参数为 $\Delta r = 1.4 \text{ cm}$, $\Delta z = 4.5 \text{ cm}$, $\Delta \varphi = 6^\circ$ 。根据波在桩身一个回程时间,确定桩周土距离桩 1.0 m ,桩底土距离桩底 2.0 m 处,作为人工边界,且边界上剪应力以及法向速度为零。为说明人工边界范围对计算结果的影响,文中

给出桩周土距离桩分别为 1.0 m 和 1.5 m 时,桩顶壁厚中线 90°位置速度时程曲线,如图 3 所示.由图 3 可以看出,两者差别很小,从而说明确定的边界尺寸是合理的.

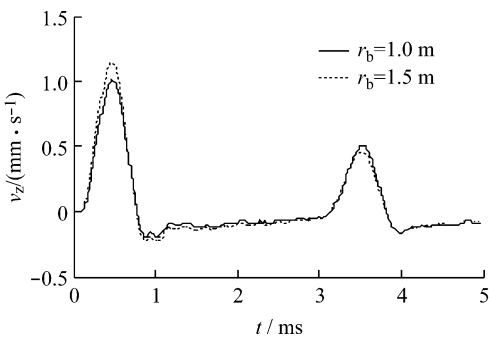


图 3 边界尺寸的影响

Fig.3 Effects of boundary sizes

图 4 给出了沿桩顶壁厚中线不同角度竖向速度时程灰度图.每个角度的振动速度大小以灰度值表示,灰度变化范围见图 4 的灰度条所示.

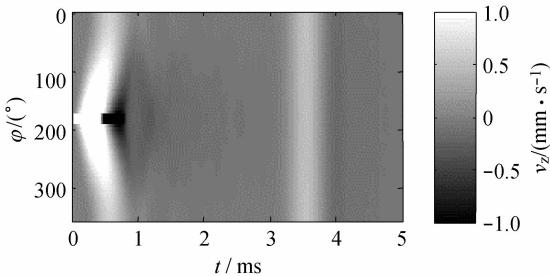


图 4 桩顶各点竖向速度时程灰度图

Fig.4 Gray-level image of velocity histories at pile top

由图 4 可以看出,桩顶在瞬态激振力的作用下,各点竖向振动速度关于 180°位置(激振力作用中心)对称;从 180°到两侧,桩顶入射脉冲到达时间逐渐滞后,振动幅值也逐渐减小;而桩底反射到达的时间基本一致,幅值也无明显差别;从图 4 还能看出,桩顶各点入射和反射之间的振动情况不同,180°附近各点振动变化较大,波动情况复杂.

对低应变检测而言,需要选择合适的拾振位置使得干扰最小,下面选取 0°,90°,150° 3 个位置竖向速度时程曲线进行分析,如图 5 所示.由图 5 可以看出,当拾振位置距激振力位置越来越远时,入射脉冲到达的时间越来越迟,但桩底反射波到达的时间基本相同.这一现象可以解释为:桩中的弹性波在管桩中是以球面的形式传播的,振源附近,球面半径越小,这种三维效应越明显.随着传播距离的增加,球面的半径不断增大,波近乎以平面的形式传播,然后经过桩底反射到达桩顶之后,到达时间几乎一致.三

维条件下,根据峰峰值判断波速时,不同拾振位置得到的速度有差别;而一维模型得到的波速是定值,即为杆波波速.

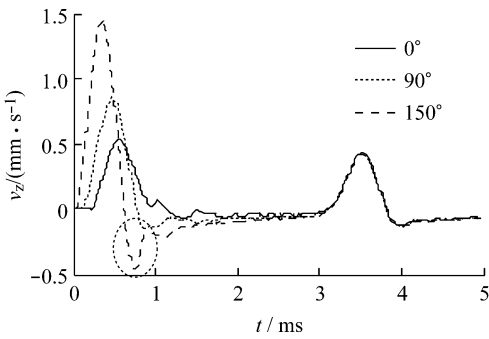


图 5 桩顶测点竖向速度时程曲线

Fig.5 Curves of vertical velocity histories at pile top

从入射及反射的峰值来看,拾振位置距离桩顶中心越来越远,即由 150°→90°→0°,入射波峰值逐渐变小,桩底反射的峰值基本相同,即各点桩反射波具有等时性、等值性.距离激振力区域较近(150°)拾振时,正向入射峰值到达之后,会出现较大的负向峰值(见图中椭圆标示),根据一维波动理论,技术人员会认为由管桩质量问题引起,导致误判.距离激振力区域较远(0°与 90°)拾振,峰峰值之间波动较为平稳,但 90°相对最平稳,此位置即与激振位置成 90°.

根据对图 4 和图 5 的分析表明,低应变检测时,管桩顶部球面波效应明显,随着深度增大,波逐渐变为平面波,接近一维情况.因此对管桩深部波传播问题,可以按照一维理论近似处理.

管桩检测时,敲击位置在桩顶一侧,这会激发出弯曲波,但在桩顶表现不突出,下面以桩底不同角度位置竖向速度时程图来作说明,如图 6 示.

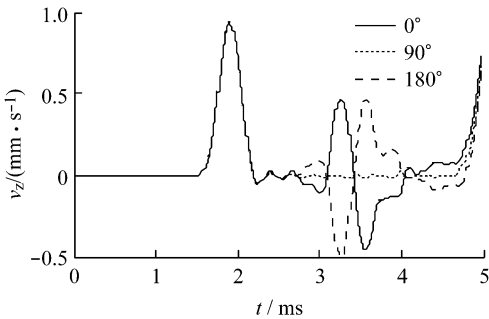


图 6 桩底测点竖向速度时程曲线

Fig.6 Curves of vertical velocity histories at pile tip

图 6 为自由管桩桩底 0°,90°和 180° 3 点的测试曲线,可以看到,首个波峰之后,90°信号最平稳,而 0°和 180°测得的曲线首波到达之后不久,仍有后续

的剧烈波动,且波形相反,传播速度较慢. 三维数值计算表明:由于偏心激振,此时激发了弯曲波,0°和 180°两处速度时程曲线反映了弯曲波的存在,这一现象是一维模型不能反映的.

4 实验分析

为验证本文算法的可靠性,对管桩进行了实验分析. 测试使用的仪器为武汉岩海公司的 RS-1616 K(s)基桩动测仪,传感器为恒流源加速度计,手锤采用铁锤,分析曲线时选择的低通滤波截止频率为 2 500 Hz. 入土管桩和平躺于地面上的管桩的测试信号分别如图 7 和图 8 所示.

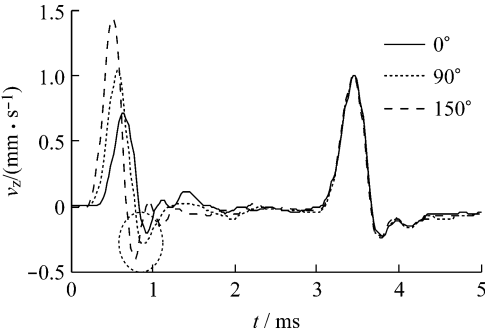


图 7 实测桩顶不同角度位置竖向速度曲线
Fig.7 Measured curves of vertical velocities at pile top

图 7 为一入土管桩桩顶不同角度的竖向速度测试曲线. 按照数值计算中桩顶反射波的等时性、等值性进行处理. 根据激振力区域较近位置(150°)的曲线,可以明显看出正向入射峰之后,出现了明显的负向峰(见图中椭圆标示),这与三维计算结果一致;还可以看出由 150°→90°→0°,桩顶入射波峰值逐渐变小,90°位置波形平稳,干扰较小,与图 5 具有很好的一致性. 实验测试时,激振与拾振均在法兰环上,所以测得的曲线细节与数值模拟有一定的差别.

图 8 为实测自由管桩桩底 0°,90°和 180°3 点的测试曲线,可以看到,首波到达之后,90°信号平稳,这个跟数值计算结果非常吻合. 0°和 180°首波到达之后仍有后续的剧烈波动,虽然数值结果与实测曲线略有差别,但波形变化形式与数值计算结果一致,表明了本文算法的可靠性,同时反映了偏心敲击激发出的弯曲波,效应在与激振力成 90°的位置最不明显. 因此实际检测时,为避免弯曲波的影响,激振与拾振位置间隔应保持为 90°.

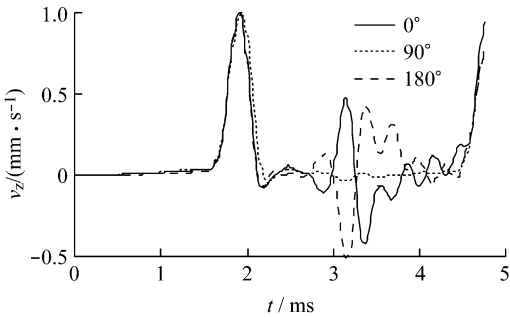


图 8 实测桩底不同角度位置竖向速度曲线
Fig.8 Measured curves of vertical velocities at pile tip

5 结论

本文建立了三维柱坐标系下管桩-土振动模型,给出了定解问题. 然后根据交错网格有限差分法,对三维波动方程进行了离散,得到了简洁的迭代格式,并对桩土界面的材料参数取值给出了说明,编制了相应的 Matlab 数值求解程序.

(1)交错网格差分法将弹性波动方程用速度和应力来表示,通过交错采样,提高了求解效率,网格小,精度高. 通过实验测试曲线与计算曲线的对比分析,表明算法可靠,对低应变检测问题的正演研究具有很好的适用性.

(2)管桩中波的三维效应主要表现为:桩顶附近球面波效应明显,由于偏心激振,桩顶不同位置接收的信号差别明显,激振与拾振位置成 90°角时测得的信号干扰最小,效果最佳;管桩中存在弯曲波,激振与拾振位置成 90°角处弯曲效应最不明显,且弯曲波速度较低,在桩顶反射波到达桩顶时,尚未传播到桩顶. 距离桩顶较远时,波表现平面波的特点,可按照一维理论处理.

(3)文中计算模型的边界处理简单,没有引入吸收边界条件.

参考文献:

[1] 赵振东,杉本三千雄,铃木善雄. 桩基低应变完整性检测的分析研究[J]. 地震工程与工程振动,1995,15(4):104.
Zhao Zhendong, Sugimoto Michio, Suzuki Yoshio. Analytical study on low strain integrity testing for piles[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(4): 104.
[2] Liao S T, Roeset J M. Dynamic response of intact piles to impulse loads [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(4), 255.