

三维非均质土中粘弹性桩-土纵向耦合振动响应

杨冬英¹, 王奎华², 丁海平¹

(1. 苏州科技学院 土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘要:在考虑土体三维非均质性情况下,对变截面粘弹性桩的动力特性进行研究。首先,结合边界条件,利用复刚度传递平面应变土体模型求得纵向不同性质桩侧土层的复刚度,进而对各段变截面桩身从下往上逐段推导得到单桩桩顶受纵向激振力作用下的桩基振动的频域响应解析解;然后,利用卷积定理和 Fourier 逆变换得到桩顶的时域响应半解析解;最后,研究分析桩土参数对桩顶动力响应的影响,得到了桩顶频域和时域响应的规律性,为桩基础的抗震设计和桩的完整性检测工作提供新的理论依据。

关键词:变截面粘弹性桩;三维非均质土;复刚度传递多圈层平面应变模型;桩动力响应;桩-土耦合振动
中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)03-0080-08

Axial Response of Viscoelastic Pile-soil Coupling Interaction in Three-dimensional Inhomogeneous Soil

YANG Dong-ying¹, WANG Kui-hua², DING Hai-ping¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China;

2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, P. R. China)

Abstract: Considering the three-dimensional inhomogeneity of soil surrounding the pile, the response of non-uniform viscoelastic pile under axial dynamic loading is studied. Firstly, combining the boundary condition, the complex stiffness of axial different soil layers are obtained by the complex stiffness transfer model of radial multi-zone plane strain. Then, the analytical solution of dynamic response at pile top in frequency domain is proposed by solving the dynamic equation of non-uniform viscoelastic pile section one by one from the bottom up to the top, and the relevant semi-analytical solution response in time domain is adopted by the convolution theorem and the Inverse Fourier Transform. At last, the effect of parameters of pile and soil are investigated to get the nature of the dynamic response of pile top in frequency domain and time domain.

Key words: non-uniform viscoelastic pile; three-dimensional inhomogeneous soil; complex stiffness transfer model of radial multi-zone plane strain; dynamic response of pile; pile-soil coupling interaction

研究桩-土耦合作用,必不可少需要对桩周土的特性进行研究。纵观桩-土动力理论研究的历程,早期是从比较简单的动态 Winkler 模型^[1-4],到平面应变模型^[5-7],再到不考虑桩侧土体径向位移的桩土耦

合接触模型^[8-10]逐步发展起来的。以前大量的研究工作把桩周土体视为均质或纵向分层均质线性弹性材料,暂且不论桩周土不受扰动时就存在的各向非均质性,在桩的施工过程中,由于挤土、松弛效应及

收稿日期:2010-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879077);苏州科技学院基金项目;常熟市建设科研资助项目(CSJS201102)

作者简介:杨冬英(1980-),女,博士,主要从事桩-土耦合振动研究以及土动力学理论研究,(Email)dyyang@mail.usts.edu.cn。

其他因素的影响,桩周围土体的性质、参数也会发生不同程度的改变,即土体性质会存在不均匀性。因此,到最近几年,一方面,王奎华、王腾、胡昌斌等^[11-13]在对待土体非均质性方面,考虑了土体水平成层的影响,即考虑桩周土体纵向的非均质性;而另一方面,Han、Nogami、El Naggar、王奎华等^[14-23]考虑了土体的径向非均质性,研究了土的径向不均匀性对桩基振动的影响。但是,这两方面的研究,要么只考虑到纵向上的非均匀性要么只考虑到径向上的非均匀性,事实上,土体不论径向还是纵向都是非均质的,因此有必要进一步深入研究土体各向非均质性这一问题,以适应理论发展和工程实际的需要。考虑土体各向非均质性情况下,依据平面应变模型对粘弹性桩的纵向振动进行研究,为工程实际提供理论依据和指导。

1 纵径向非均质土中桩-土动力模型

1.1 桩-土耦合系统

该文研究的是粘弹性桩埋置于非均质土体介质内部的桩-土动力耦合作用问题。桩-土系统根据桩截面尺寸、桩材料性质以及土层不同共分为 m 段,自桩身底部开始依次编号为 $1, 2, \dots, i, \dots, m$ 段,各段厚度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_m$,各段顶部深度分别为 $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_m$,每一段内桩材料为均质,截面尺寸相同, r_{0i} 为第 i 段桩的半径。桩周围的土介质为纵径向都非均匀介质,每一层土体由 2 个同心圆柱区域组成,1 个是外部的径向半无限大均匀介质区域(外部区域),另 1 个是内部径向厚度一定的受扰动土体组成的环形区域(内部区域)。第 j 层土体内部径向厚度为 b_j ,内外区域接触面处的半径为 r_{bj} 。桩-土系统模型如图 1 所示。

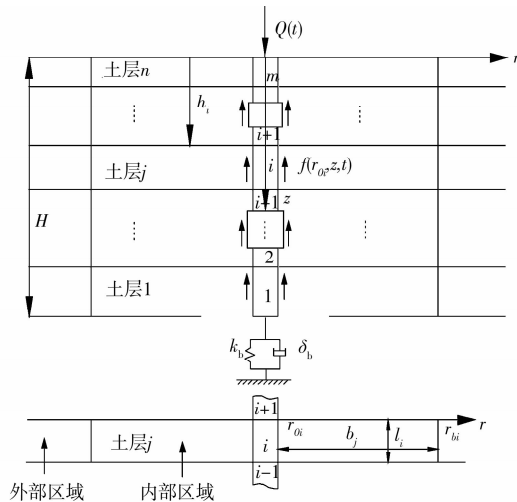


图 1 桩-土耦合模型

1.2 土体振动模型

当处于土体中心位置的桩受到竖直方向的激励时,土体也必然会随之产生竖直向振动。土体的性质不同,土体动力特性必然不同,对桩身的作用也肯定有差别。就径向非均质、纵向成层的土体对桩的动力响应的影响进行研究,每一层土体动力复刚度采用文献[21]的复刚度传递平面应变模型计算。第 j 层土层外部区域土体的复刚度为:

$$K_{j_b} = 2\pi r_{j_b} G_{j_b}^* s_{j_b} K_1(s_{j_b} r_{j_b}) / K_0(s_{j_b} r_{j_b}) \quad (1)$$

第 j 层土层的内部任意圈层 k 的复刚度为:

$$K_{j(k-1)} = \frac{2\pi r_{j(k-1)} s_{j_k} G_{j_k}^* [E_{j_k} K_1(s_{j_k} r_{j(k-1)}) - F_{j_k} I_1(s_{j_k} r_{j(k-1)})]}{E_{j_k} K_0(s_{j_k} r_{j(k-1)}) + F_{j_k} I_0(s_{j_k} r_{j(k-1)})} \quad (2)$$

其中,
$$\left. \begin{aligned} E_{j_k} &= 2\pi r_{j_k} s_{j_k} G_{j_k}^* I_1(s_{j_k} r_{j_k}) + I_0(s_{j_k} r_{j_k}) K_{j_k} \\ F_{j_k} &= 2\pi r_{j_k} s_{j_k} G_{j_k}^* K_1(s_{j_k} r_{j_k}) - K_0(s_{j_k} r_{j_k}) K_{j_k} \end{aligned} \right\}$$

$$s_{j_b} = \frac{i\omega}{v_{j_b} \sqrt{1 + iD_{j_b}}}, s_{j_k} = \frac{i\omega}{v_{j_k} \sqrt{1 + iD_{j_k}}}, v_{j_b}, v_{j_k}$$

分别为第 j 层土体的外部区域的剪切波速和内部区域径向 k 圈层的剪切波速,且有 $v_{j_b} = (G_{j_b} / \rho_{j_b})^{1/2}$, $v_{j_k} = (G_{j_k} / \rho_{j_k})^{1/2}$ 。 ρ_{j_b}, ρ_{j_k} 为外圈层土体密度和径向 k 圈层处的土体密度; D_{j_b}, D_{j_k} 也为相应的土体材料阻尼系数; G_{j_b}, G_{j_k} 为相应的剪切刚度, $G_{j_b}^*, G_{j_k}^*$ 则为相应的复剪切刚度; $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位; ω 为振动圆频率, $\omega = 2\pi f$, f 即为常规意义上的频率。

通过公式(1)和(2)的递推关系,可以得到第 j 层土体桩-土接触面上复刚度 K_{j_0} 。任意层土体桩-土接触面上的复刚度都同理求得。

1.3 桩动力模型

在逐步递推得到桩、土接触面上单位长度方向的任意一层土竖向剪切复刚度 K_{j_0} 后,也就得到了任意段桩身侧面的竖向剪切复刚度值,表示为 K_{i_0} 。进一步容易得到桩顶受竖向激振力作用下第 i 段桩的纵向振动控制方程:

$$E_{pi} A_{pi} \frac{\partial^2}{\partial z^2} (u_i(z, t)) + A_{pi} \delta_{pi} \frac{\partial^3}{\partial z^2 \partial t} (u_i(z, t)) - m_{pi} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_i(z, t)) - f(r_{0i}, z, t) = 0 \quad (3)$$

$u_i(z, t), E_{pi}, A_{pi}, m_{pi}, \delta_{pi}, f(r_{0i}, z, t)$ 分别为第 i 段桩身的位移,弹性模量,横截面积,单位长度桩身质量,桩材料粘性阻尼系数以及土体对第 i 段桩身的作用力, $f(r_{0i}, z, t) = K_{i_0} u_i(z, t)$ 。

相邻桩段分界面两侧的桩身位移和截面力满足连续条件,即

$$u_i(z, t) \Big|_{z=h_i} = u_{i+1}(z, t) \Big|_{z=h_i}$$

$$\begin{aligned}
& [E_{pi}A_{pi} \frac{\partial}{\partial z}(u_i(z,t)) + A_{pi}\delta_{pi} \frac{\partial^2}{\partial z\partial t}(u_i(z,t))] \Big|_{z=h_i} = \\
& [E_{p(i+1)}A_{p(i+1)} \frac{\partial}{\partial z}(u_{i+1}(z,t)) + A_{p(i+1)}\delta_{p(i+1)} \\
& \frac{\partial^2}{\partial z\partial t}(u_{i+1}(z,t))] \Big|_{z=h_i} \\
& \text{桩底及桩顶处的边界条件为:} \\
& [E_{pm}A_{pm} \frac{\partial}{\partial z}(u_m(z,t)) + A_{pm}\delta_{pm} \frac{\partial^2}{\partial z\partial t}(u_m(z,t))] \\
& \Big|_{z=0} = -Q(t) \\
& [E_{p1} \frac{\partial}{\partial z}(u_1(z,t)) + \delta_{p1} \frac{\partial^2}{\partial z\partial t}(u_1(z,t)) + k_b u_1(z,t) \\
& + \delta_{b1} \frac{\partial}{\partial t}(u_1(z,t))] \Big|_{z=H} = 0
\end{aligned}$$

式中: k_b , δ_b 分别为单位面积的弹簧系数和阻尼系数, $Q(t)$ 为桩底激振力。

桩顶动力作用开始时满足的初始条件为:

$$u_i(z,t) \Big|_{t=0} = 0; \frac{\partial}{\partial t} u_i(z,t) \Big|_{t=0} = 0。$$

2 桩的纵向振动方程及求解

结合初始条件,对桩动力公式(3)进行 Laplace 变换,可得:

$$E_{pi}A_{pi} \frac{\partial^2}{\partial z^2}(U_i(z,p)) + A_{pi}\delta_{pi}p \frac{\partial^2}{\partial z^2}(U_i(z,p)) - m_{pi}p^2 U_i(z,p) - K_{i0}U_i(z,p) = 0 \quad (4)$$

将上式化简得:

$$\begin{aligned}
& V_{pi}^2(1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}}p) \frac{\partial^2}{\partial z^2}(U_i(z,p)) - (p^2 + \\
& \frac{1}{\rho_{pi}A_{pi}}K_{i0})U_i(z,p) = 0 \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: $U_i(z,p) = L[u_i(z,t)] = \int_0^\infty u_i(z,t)e^{-pt} dt$ 。

V_{pi} , ρ_{pi} 分别为第 i 段桩的一维弹性纵波波速、材料密度。 $E_{pi} = \rho_{pi}V_{pi}^2$ 。

式(5)的解为

$$U_i(z,p) = D_{1i} \cos(\lambda_i z/l_i) + D_{2i} \sin(\lambda_i z/l_i) \quad (6)$$

其中,

$$\lambda_i = \sqrt{-\frac{(p^2 + \frac{K_{j0}}{\rho_{pi}A_{pi}})l_i^2}{V_{pi}^2(1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}}p)}} = \sqrt{-\frac{(p^2 + \frac{K_{j0}}{\rho_{pi}A_{pi}})t_i^2}{(1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}}p)}}$$

为无量纲特征值, D_{1i} , D_{2i} 为待定系数,可由边界条件确定。 $t_i = \frac{l_i}{V_{pi}}$ 为弹性纵波在第 i 段桩身内传播所需的时间,弹性纵波在整个桩中传播所需时间为:

$$T_c = \sum_{i=1}^{i=m} t_i$$

根据阻抗函数的定义(力除以位移)可得第 1 段桩顶部($z = h_1$)截面处的位移阻抗函数的解析表达式:

$$\begin{aligned}
& Z_1 \Big|_{z=h_1} = \\
& - \frac{[E_{p1}A_{p1} \frac{\partial}{\partial z}U_1(z,p) + A_{p1}\delta_{p1}p \frac{\partial}{\partial z}U_1(z,p)] \Big|_{z=h_1}}{U_1(z,p) \Big|_{z=h_1}} \\
& = - \frac{\rho_{p1}A_{p1}V_{p1}(1 + \frac{\delta_{p1}}{E_{p1}}p)\lambda_1 \operatorname{tg}(\lambda_1 - \varphi_1)}{t_1} \quad (7)
\end{aligned}$$

式中:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{Z_0 t_1}{\rho_{p1}A_{p1}V_{p1}\lambda_1(1 + \frac{\delta_{p1}}{E_{p1}}p)}$$

$$Z_0 = \rho_{p1}A_{p1}V_{p1}(\frac{k_b}{\rho_{p1}V_{p1}} + \frac{\delta_b}{\rho_{p1}V_{p1}}p)$$

利用阻抗函数递推方法,可得到第 i 段桩顶部($z = h_i$)截面处的位移阻抗函数为:

$$\begin{aligned}
& Z_i \Big|_{z=h_i} = \\
& - \frac{[E_{pi}A_{pi} \frac{\partial}{\partial z}U_i(z,p) + A_{pi}\delta_{pi}p \frac{\partial}{\partial z}U_i(z,p)] \Big|_{z=h_i}}{U_i(z,p) \Big|_{z=h_i}} \\
& = - \frac{\rho_{pi}A_{pi}V_{pi}(1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}}p)\lambda_i \operatorname{tg}(\lambda_i - \varphi_i)}{t_i} \quad (8)
\end{aligned}$$

式中:

$$\varphi_i = \arctan \frac{Z_{i-1}t_i}{\rho_{pi}A_{pi}V_{pi}\lambda_i(1 + \frac{\delta_{pi}}{E_{pi}}p)}$$

则通过公式(8)进一步递推得到第 m 段桩顶部位移阻抗函数,即桩顶位移阻抗函数:

$$\begin{aligned}
& Z_m \Big|_{z=h_m} = \\
& - \frac{[E_{pm}A_{pm} \frac{\partial}{\partial z}U_m(z,p) + A_{pm}\delta_{pm}p \frac{\partial}{\partial z}U_m(z,p)] \Big|_{z=0}}{U_m(z,p) \Big|_{z=0}} \\
& = - \frac{\rho_{pm}A_{pm}V_{pm}(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}}p)\lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)}{t_m} \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\text{式中: } \varphi_m = \arctan \frac{Z_{m-1}t_m}{\rho_{pm}A_{pm}V_{pm}\lambda_m(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}}p)}$$

通过桩顶位移阻抗函数,可得桩顶位移导纳函数为:

$$\begin{aligned}
& H_u = \frac{1}{Z_m} = \\
& - \frac{t_m}{\rho_{pm}A_{pm}V_{pm}(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}}p)\lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \quad (10)
\end{aligned}$$

进一步地可以得到桩顶速度导纳函数:

$$H_v = p \times H_u = \frac{pt_m}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}} p) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \quad (11)$$

在式(11)中令 $p = i\omega$, 则桩顶速度频率响应函数为:

$$H_v = - \frac{i\omega t_m}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm} (1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm}} i\omega) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} = \frac{1}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm}} \frac{i\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} i\bar{\omega}) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \quad (12)$$

式中: $\bar{\omega} = T_c \omega$, $\bar{t}_m = t_m / T_c$ 为无量纲频率和第 m 段桩身传递无量纲时间。

对式(12)进行无量纲化后得到无量纲桩顶速度导纳曲线:

$$H'_v = \frac{i\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} i\bar{\omega}) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \quad (13)$$

当桩顶受到半正弦脉冲激励力 $f(t) = Q_{\max} \sin \frac{\pi t}{T}$ (其中, $t \in (0, T)$, T 为脉冲延续时间) 作用时, 桩顶时域响应半解析解表达式为

$$V(t) = - \frac{1}{2} \frac{Q_{\max}}{\rho_{pm} A_{pm} V_{pm}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} i\bar{\omega}) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \frac{\bar{T}}{\pi^2 - \bar{T}^2 \omega^2} \cdot (1 + e^{-i\bar{\omega} \bar{T}}) e^{i\bar{\omega} \bar{t}} d\bar{\omega} \quad (14)$$

时域响应无量纲因子为:

$$V' = - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i\bar{\omega} \bar{t}_m}{(1 + \frac{\delta_{pm}}{E_{pm} T_c} i\bar{\omega}) \lambda_m \operatorname{tg}(\lambda_m - \varphi_m)} \frac{\bar{T}}{\pi^2 - \bar{T}^2 \omega^2} \cdot (1 + e^{-i\bar{\omega} \bar{T}}) e^{i\bar{\omega} \bar{t}} d\bar{\omega} \quad (15)$$

$\bar{T} = T / T_c$, $\bar{t} = t / T_c$ 分别为无量纲脉冲宽度因子和无量纲时间因子。另外, 桩底无量纲弹簧系数和无量纲黏壶系数分别为 $\bar{k}_b = k_b H / E_{p1}$, $\bar{\delta}_b = \delta_b H / (E_{p1} T_c)$, 第 i 段桩的无量纲粘性系数为 $\bar{\delta}_{pi} = \delta_{pi} / (E_{pi} T_c)$ 。

3 桩土参数对桩顶动力响应的影响

3.1 桩材料阻尼的影响

为了明了桩材料粘性阻尼对桩顶动力响应的影响, 把桩周土简化为三层非均质土。定义土层 j 内外区域土体剪切波速比例系数为 λ_j , 即 $\lambda_j = \frac{v_{j1}}{v_{j2}}$, 当 $\lambda_j > 1$ 时表示桩周土体从外部区域到内部区域逐

渐硬化, 而当 $\lambda_j < 1$ 时则土体逐渐软化, $\lambda_j = 1$ 则表示土层 j 沿径向是均匀的。本例取外部区域土体剪切波速均为 250 m/s, 三层土体剪切波速比例系数为: $\lambda_1 = 0.6$, $\lambda_2 = 0.8$, $\lambda_3 = 1$, 从内到外土体剪切波速线性变化。土层厚 10 m, 密度均取 $\rho_j = 2000 \text{ kg/m}^3$, 土体材料阻尼系数 $D_j = 0$, $r_{bj} = 1 \text{ m}$, 桩长 10 m、 $\rho_{pi} = 2500 \text{ kg/m}^3$ 、 $V_{pi} = 4000 \text{ m/s}$ 、 $r_{oi} = 0.25 \text{ m}$ 、 $\bar{\delta}_b = 0.06$ 、 $\bar{k}_b = 0.1$ 。

从图 2 可以看出, 当不考虑桩身材料粘性阻尼时, 速度导纳曲线不会随着频率增加而逐渐衰减, 而是呈现等幅振动。考虑桩身材料阻尼时, 在低频段, 速度导纳曲线受桩材料阻尼影响不大, 但随着频率增加, 桩顶速度导纳曲线峰值逐渐衰减, 当频率足够大时, 会衰减成一条水平线。并且随着桩材料阻尼的增加这种衰减幅度加大。从时域响应曲线图来看, 随着桩粘性阻尼的增加, 桩尖反射信号幅值变小, 而信号宽度则变宽, 信号界限趋于不明显。

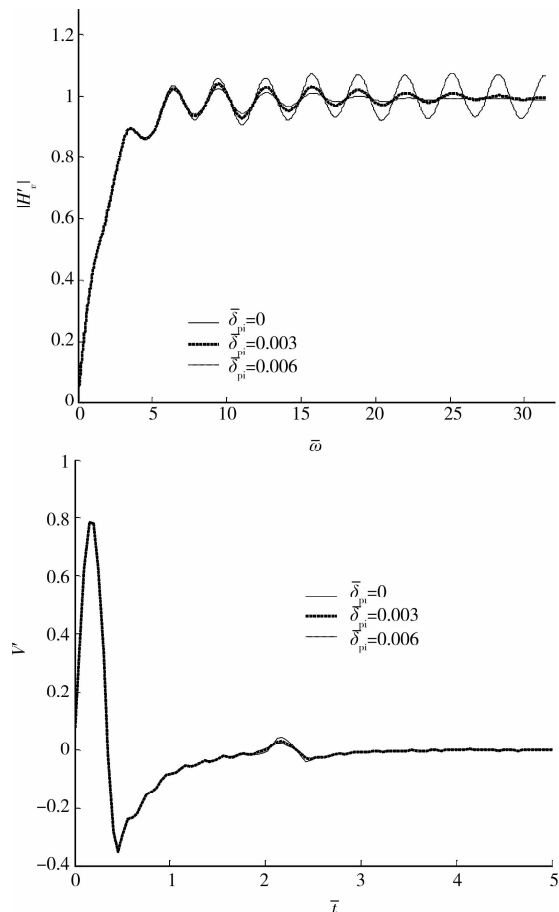


图2 桩粘性系数对桩顶动力响应的影响

3.2 桩身截面的影响

桩的施工灌注也容易使桩身变得非均匀, 或者截面发生变化, 或者桩身方向上发生材料的不均匀等。那么不均匀桩本身对桩顶动力响应存在的影响

如何是很值得考虑和研究的。设桩周土均匀,土体剪切波速为 150 m/s,桩分为两段,桩半径 0.5 m,两段桩长都为 10 m, $r_{oi} = 0.5$ m、 $\rho_{pi} = 2\ 500$ kg/m³、 $\bar{\delta}_{pi} = 0.003$ 、 $\bar{\delta}_b = 0.06$ 、 $\bar{k}_b = 0.1$ 。主要考虑桩身截面对桩顶动力响应的影响,即桩身截面波阻抗 $Z_{pi} = \rho_{pi} A_{pi} V_{pi}$ 不同的影响。定义桩身下段与上段波阻抗比例系数为 λ_z , 即 $\lambda_z = \frac{Z_{p1}}{Z_{p2}}$, 当 $\lambda_z > 1$ 时表示桩身下段波阻抗大,当 $\lambda_z < 1$ 时则下段波阻抗小, $\lambda_z = 1$ 则表示桩身上下波阻抗相等。桩身上段弹性纵波波速为 $V_{p2} = 4\ 000$ m/s, 主要讨论 3 种 λ_z 值情况下对桩顶响应的影响:

情况 1: $\lambda_z = 1$;

情况 2: $\lambda_z = 0.875 < 1$;

情况 3: $\lambda_z = 1.125 > 1$ 。

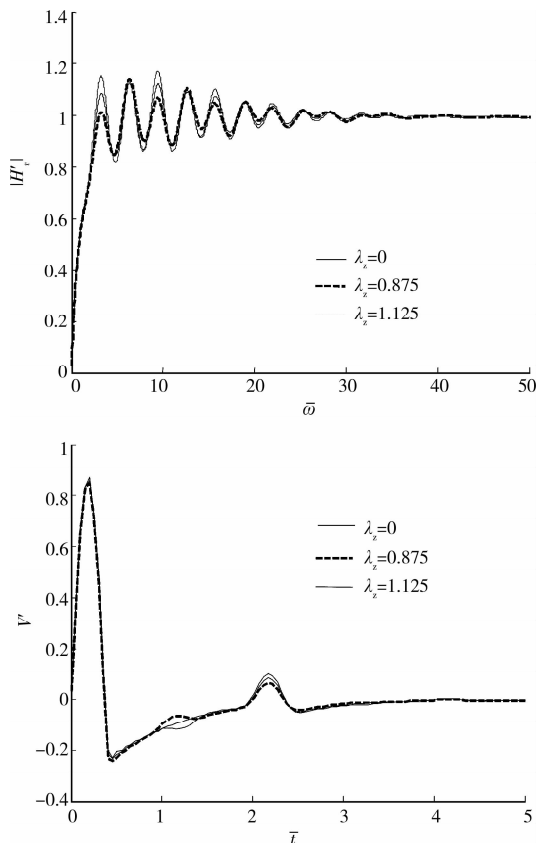


图 3 桩身材料不均对桩顶动力响应的影响

图 3 显示了桩身波阻抗不均对桩顶动力响应的影响,3 种情况区别在于第 1 段桩身波阻抗不同,进而影响了桩顶的动力响应。情况 1 是均匀桩,情况 2 则是上段桩波阻抗比下段桩大,情况 3 则是上段桩的波阻抗小于下段桩。波阻抗不同,即桩身存在分界面,从速度导纳曲线看,由于桩身分界面的存在,存在桩身界面反射,使得速度导纳振幅不像均质情况下呈规律性衰减,而是存在叠加现象,但是总体

上由于桩阻尼的作用逐步衰减。当桩身下段波阻抗增大时,桩顶导纳曲线振幅增大,而桩身下段波阻抗减小时,曲线振幅则减小。从时域曲线上看,随着下段波阻抗增大桩尖反射幅值增大,并且在大约一倍 T_c 时,桩顶出现来自桩身分界面处的反射,下段波阻抗增大在两段桩界面上存在反相反射,而下段波阻抗减小则存在同相反射。由此可见,桩身材质的不均匀对桩顶反射的影响也非常大,了解了影响机制,对分析实际桩基检测结果有着十分重要的指导意义。

3.3 土体剪切波速的影响

1) 内部圈层土体软化

实际桩侧土的性质非常复杂,不同的施工条件产生的施工效应也有不同,同一种施工条件,土体性质不同,产生的施工效应也会不同。如预制桩施工过程中就会对桩周土产生挤密效应,即使得桩周土硬化,而钻孔灌注桩则会对桩周土产生松弛效应,即使得桩周土软化。预制桩施工情况下不同的土体产生的效果也不一样,如果是较松散的砂土,则 λ_j 可能比较大,而密实的砂土则可能不如松散的砂土的 λ_j 变化大,而对于软土之类的,可能 λ_j 会变小。对于灌注桩来说不同土体产生的软化效果也有差别,也予以分别考虑。因此,在具体应用计算时应该根据实际情况进行。为简化分析,本算例采用 3 层不同土体组成桩侧土来分析土体剪切波速对桩顶动力响应的影响。土层厚 10 m,均匀分为 3 层,密度均取 $\rho_j = 2\ 000$ kg/m³, $r_{bj} = 1$ m。为简化分析,设桩为粘弹性均匀桩,桩长 10 m、 $\rho_{pi} = 2\ 500$ kg/m³、 $V_{pi} = 4\ 000$ m/s、 $r_{oi} = 0.25$ m、 $\bar{\delta}_{pi} = 0.003$ 、 $\bar{\delta}_b = 0.06$ 、 $\bar{k}_b = 0.1$ 。外部区域土体均质,土体剪切波速为 250 m/s;内部区域 3 层土靠近桩身处的剪切波速比例系数分别为:

情况 1: $\lambda_1 = 0.6$, $\lambda_2 = 0.8$, $\lambda_3 = 1$;

情况 2: $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.8$, $\lambda_3 = 0.6$;

情况 3: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ 。

从图 4 可以看出,桩周土的非均匀性直接影响着桩顶动力响应,从 3 种情况的来看,情况 3 表现了桩周土均质下的桩顶动力响应曲线,与情况 1 情况 2 明显存在差异,说明考虑桩周土的非均匀性是必须的,只要桩周土存在不均匀性,其桩顶动力响应必然不同。从 3 种情况比较来看,情况 1 和情况 2 的振幅要较情况 3 大,这是由于情况 1 和情况 2 桩周土的剪切波速总体要比情况 3 小,剪切波速越小,对于桩顶速度导纳曲线振幅越大,因为剪切波速小,土体性质差,阻尼就小,在动力荷载作用下,能量耗散得慢,速度导纳曲线振幅就大;对于时域响应曲线来看,情况 1 和

情况2的桩底反射信号幅值要较情况3大,同样是因为情况1情况2的土体性质稍差,阻尼小,能量耗散慢造成的。另外,值得注意的是,情况1和情况2的区别主要是水平土层位置的区别,第1层土和第3层土体互换,从图中表现得结果看,即使是相同的土层性质,沿桩身方向上所在的位置不同,对桩顶动力响应的影响也是有差别的,从而可以看出考虑纵向土层的非均匀性对桩顶动力响应的影响是极为必要的。

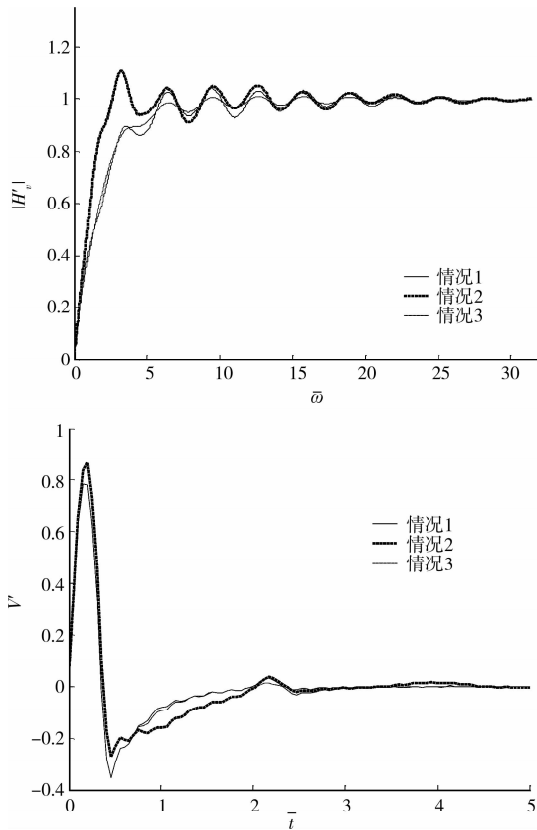


图4 桩侧土软化对桩顶动力响应的影响

2)内部圈层土体硬化

外部区域土体均质,土体剪切波速为150 m/s,内部区域三层土靠近桩身处的剪切波速比例系数分别为:

情况1: $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1.25, \lambda_3 = 1.67$;

情况2: $\lambda_1 = 1.67, \lambda_2 = 1.25, \lambda_3 = 1$;

情况3: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.67$.

除上述参数不同外,其余参数取值同内部圈层土体软化相同。

从图5可以看出,3种情况下桩周土对桩顶的动力响应存在明显差别,从情况1和情况2曲线表现看,光是土层沿桩身不同位置分布都存在很明显的差别,这说明土体沿纵向分布形式不同对桩身产生动力响应效果不同,这同内部圈层土体软化得出的结论是一致的。从速度导纳曲线上看,在低频阶段,3种情况差别很大,这主要是由于桩周土的性质不

同造成的,而到高频阶段,桩材料阻尼会导致速度导纳曲线逐渐衰减而使3种情况结果逐渐接近,由此可见,桩周土纵径向非均匀性直接影响着桩顶动力响应,在分析桩-土耦合作用时必须加以考虑。

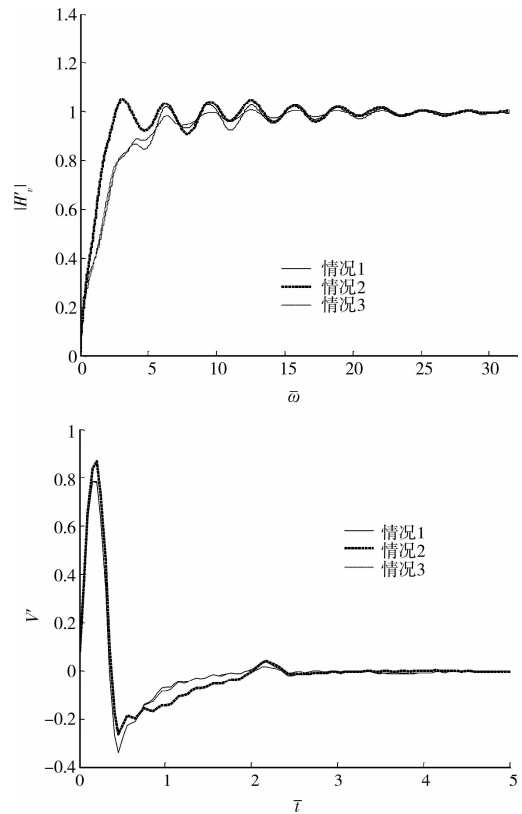


图5 桩侧土硬化对桩顶动力响应的影响

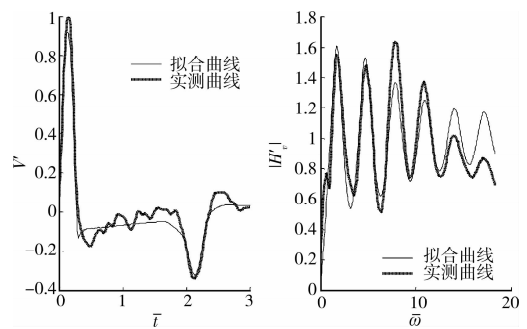


图6 桩顶时域响应、速度导纳实测曲线与拟合曲线图

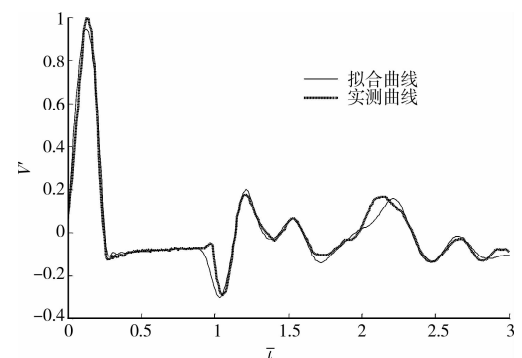


图7 桩顶时域响应实测曲线与拟合曲线图

4 工程实例分析

图 6 是某工地一根钻孔灌注桩的测试和反演曲线,该桩为嵌岩桩,典型的端承桩,长约 19 m,直径 1.2 m,场地土质情况为:1)地表至地表以下 1.5 m 左右为可塑状粉质粘土,剪切波速取为 120 m/s,密度 1900 kg/m^3 ;2)1.5 m 至 16 m 左右为软-流塑状淤泥质粘土或淤泥,剪切波速取为 95 m/s,密度 1650 kg/m^3 ;3)16 m 以下为强风化至中等风化基岩,剪切波速取为 280 m/s,密度 2100 kg/m^3 。桩材料无量纲材料阻尼系数取为 0.002。

从图 6 可以看出,桩尖反向反射,说明此桩桩底支撑情况很好,从拟合过程来看也说明了这一点,桩底弹性支撑系数取值需较大。从图 6 可以看出,拟合曲线能够较好的逼近于实测曲线,证明了理论能够很好的拟合实际情况。

图 7 为某场地一埋入式预制模型桩,长 10 m,桩横截面尺寸为 $400 \times 400 \text{ mm}$,设计砼标号 C30,反射波法测得其桩尖反射时间为 $4.6 \text{ ms} (=2T_c)$,计算得到其一维弹性纵波速为 4348 m/s 。桩侧土为软可塑状粘性回填土,其密实度和波速均较低,其密度约为 1700 kg/m^3 ,剪切波速约为 90 m/s 。将方形截面按面积相等原则等效为圆形截面,其等效直径为 $D=451 \text{ mm}$ 。该桩在 4.8 m 及 7.16 m 深度分别存在一个与正常桩身截面波阻抗之比约为 200% 的扩颈和一个阻抗比约为 55% 的缩颈。

按方法对测试曲线进行拟合分析,从图 7 反映出拟合曲线能很好地接近实测曲线。反演拟合结果表明,该方法能够拟合出此模型桩在 4.8 m 及 7.16 m 深度分别存在一个与正常桩身截面波阻抗之比为 200% 扩颈和 55% 的缩颈,拟合得到的无量纲激振力脉冲宽度因子 $T_0=0.26$,无量纲桩材料阻尼系数 $\bar{\delta}_{pi}=0.0015$ 。图中结果表明拟合曲线与实测曲线比较吻合,表明该方法符合实际并且具有很好的精确性。

5 结论

1)既考虑了土体纵向存在的分层情况,又考虑了可能由于施工效应引起的土体径向非均匀性情况,并且分析了土体非均质性对桩顶动力响应的影响,是个全面可靠的桩-土动力耦合作用模型。从文中考虑桩周土的非均质性研究可以看出,桩周土非均质性对桩顶动力响应有着很重要的影响,考虑其非均质性极为必要。

2)通过分析,桩材料阻尼对桩顶动力响应有着

十分明显的影响,阻尼系数越大,速度导纳曲线衰减越快,时域响应曲线反射信号幅值衰减快而宽度增大。另外,桩身材料的不均匀,在桩底反射之前,桩身界面也会存在反射。

3)通过与工程实例的对比可以看出,该文模型能够很好的拟合工程实际检测曲线,拟合曲线能够很好地反映出桩-土系统的特征,证明本模型可靠及实用。

参考文献:

- [1] MATLOCK H, FOO S H C, BRYANT L M. Simulation of lateral pile behavior [C]//Proceeding of earthquake engineering and soil dynamics, ASCE. Pasadena, California: [s. n.], 1978:600-619.
- [2] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及其应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6):27-35.
WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE, ZENG GUO-XI. Analytical solution to vibration of finite length pile under exciting force and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 27-35.
- [3] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及应用[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6):56-67.
WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE, ZENG GUO-XI. An analytical solution to forced vibration of foundation pile with variable section impedance and its application[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(6): 56-67.
- [4] 王奎华. 变截面阻抗桩纵向振动问题积分变换解[J]. 力学学报, 2001, 33(4):479-491.
WANG KUI-HUA. A study on vertical vibration of pile with inhomogeneous cross section acoustic impedance with laplace transform[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 33(4): 479-491.
- [5] NOVAK M. Dynamic stiffness and damping of piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4): 574-598.
- [6] NOVAK M., ABOUL-ELLA F. Impedance Functions of Piles in Layered Media [J]. Journal of the Engineering Mechanical Division, ASCE, 1978, 104(EM3):643-661.
- [7] NOVAK M., NOGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic soil reaction for plane strain case[J]. Journal of the Engineering Mechanical Division, ASCE, 1978, 104(EM4):953-959.
- [8] 胡昌斌, 王奎华, 谢康和. 基于平面应变假定基桩振动理论适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5):595-601.
HU CHANG-BIN, WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE. Study on theories of axial response of dynamically

- loaded single piles based on plane strain assumption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 595-601.
- [9] 王奎华, 阙仁波, 夏建中. 考虑土体真三维波动效应时桩的振动理论及对近似理论的校核[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1362-1370.
WANG KUI-HUA, QUE REN-BO, XIA JIAN-ZHONG. Theory of pile vibration considering true three-dimensional wave effect of soil and its check on the approximate theories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1362-1370.
- [10] 李强, 王奎华, 谢康和. 饱和土中端承桩纵向振动特性研究[J]. 力学学报, 2004, 36(4): 435-442.
LI QIANG, WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE. Vertical vibration of an end bearing pile embedded in saturated soil[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(4): 435-442.
- [11] 王奎华. 成层广义 Voigt 地基中粘弹性桩纵向振动分析及应用[J]. 浙江大学学报:工学版, 2002, 36(5): 565-572.
WANG KUI-HUA. Vibration of inhomogeneous viscous-elastic pile embedded in layered soils with general Voigt model [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(5): 565-572.
- [12] 王腾, 王奎华, 谢康和. 成层土中桩的纵向振动理论研究及应用[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 83-87.
WANG TENG, WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE. Study on vibration properties of piles in layered soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(1): 83-87.
- [13] 胡昌斌, 黄小明. 成层粘弹性土中桩土耦合纵向振动时域响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 205-211.
HU CHANG-BIN, HUANG XIAO-MING, A quasi-analytical solution to soil-pile interaction in longitudinal vibration in layered soils considering vertical wave effect on soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 205-211.
- [14] HAN Y C. Dynamic vertical response of piles in nonlinear soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123(8): 710-716.
- [15] NOGAMI T., KONAGAI K. Dynamic response of vertically loaded nonlinear pile foundations [J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1987, 113(2): 147-160.
- [16] NOGAMI T., HARN S C. Dynamic soil stiffnesses at side of embedded structures with rectangular base[J]. J. Engrg. Mech., ASCE, 2003, 129(8): 963-973.
- [17] El NAGGAR M H, NOVAK M. Nonlinear axial interaction in pile dynamics[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1994, 120(4): 678-696.
- [18] El NAGGAR M H, Vertical and torsional soil reactions for radially inhomogeneous soil layer [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2000, 10(4): 299-312.
- [19] 周铁桥, 王奎华, 谢康和, 等. 轴对称径向非均质土中桩的纵向振动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 720-725.
ZHOU TIE-QIAO, WANG KUI-HUA, XIE KANG-HE, et al. Vertical vibration analysis of piles in radial heterogeneous soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 720-725.
- [20] YANG DONG-YING, WANG KUI-HUA. Study on vertical vibration of pile in radial inhomogeneous soil [C]//Structural Condition Assessment, Monitoring And Improvement. Hunan, Changsha, 2007: 241-249.
- [21] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 基于复刚度传递多圈层平面应变模型的桩动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 825-831.
WANG KUI-HUA, YANG DONG-YING, ZHANG ZHI-QING. Study on dynamic response of pile based on complex stiffness transfer model of radial multizone plane strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 825-831.
- [22] 杨冬英, 王奎华. 任意圈层径向非均质土中桩的纵向振动特性研究[J]. 力学学报, 2009, 42(2): 243-252.
YANG DONG-YING, WANG KUI-HUA. Vertical vibration of pile embedded in radially inhomogeneous soil layers [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 42(2): 243-252.
- [23] YANG DONG-YING, WANG KUI-HUA, ZHANG ZHI-QING, et al. Vertical dynamic response of pile in radial heterogeneous soil layer [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(8): 1039-1054.
- [24] 杨冬英, 王奎华. 径向非均质土中平面应变模型的精度及适用性研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 98-105.
YANG DONG-YING, WANG KUI-HUA. Study on precision and applicability of plane-strain model in radially heterogeneous soil layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 98-105.
- [25] 王奎华, 杨冬英, 张智卿. 两种径向多圈层土体平面应变模型的对比. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(10): 1902-1908.
WANG KUI-HUA, YANG DONG-YING, ZHANG ZHI-QING. Comparison on two kinds of radial multi-zone plane strain models[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(10): 1902-1908.