

轴对称径向非均质土中桩的纵向振动特性分析

Vertical vibration analysis of piles in radial heterogeneous soil

周铁桥^{1, 2}, 王奎华¹, 谢康和¹, 郑宇杉³

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 宁波市民用建筑设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315020; 3. 温州建设集团公司, 浙江 温州 325000)

关键词: 打桩影响; 桩土耦合作用; 弹性底部边界; 纵向振动; 解析解

中图分类号: TU 473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)06-0720-06

作者简介: 周铁桥(1980-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事土动力学及桩基振动理论研究。

0 引言

桩基振动理论在动力机器基础设计, 振动打桩, 风荷载, 地震荷载作用下的结构物的抗震防震设计等工作中有广泛的应用, 同时也是各种动力试桩方法的理论基础。近年来国内外学者^[1, 2]在研究桩的一维纵向振动, 求解桩顶频域、时域响应解析解或者半解析解等方面取得了不小的成功, 但是这些研究基本上都是将桩周土对桩的作用简化为分布的 Voigt 体(一个线性弹簧和一个牛顿粘壶并联)来表示, 没有直接考虑三维土层和桩的耦合作用, 很难准确地反映桩土体系的振动特性。相比之下, 在较严格考虑桩与三维土层耦合作用条件下进行的桩基振动理论研究, 明显具有更广泛的适用性。

在桩与三维土层耦合振动的解析解方面, 由于其作用机理的复杂性, 此类研究多是在近似地考虑土层对桩的耦合作用条件下进行的, 都有不少的局限性。早期在较严格条件下, 研究桩与三维土层耦合纵向振动的是 Nogami & Novak^[3], 他们研究得到了刚性支承桩桩顶位移及复刚度的频域解析表达式。该理论解由于求解中假定解的形式, 土层上表面边界条件不满足。此后, 这方面研究没什么进展。后来胡昌斌^[4]在较严格条件下, 对弹性支承桩与三维土层耦合振动时的桩土体系纵向振动特性进行了严格的解析研究, 具有较高的理论价值, 在工程实践中也有一定的适用性。但是他的研究没有考虑打桩引起的桩周土的土工参数改变, 将桩外土体看作一个均质体, 土工参数处处相等, 具有一定的局限性。韩英才^[5]对此也做了部分研究。

因此可以看出, 考虑打桩影响, 使得靠近桩体的土层参数改变, 进一步研究桩与三维土体耦合振动, 不仅具有较高的理论价值, 而且在工程应用上也将更具适用性。

1 基本假设及定解问题

在均质滞回材料阻尼土层中, 弹性支承桩在桩顶受谐和激振力作用时与土层纵向耦合。计算简图如下: 桩长 H , 桩顶作用有谐和激振力 $Pe^{i\omega t}$, P 为激振力幅值, ω 为激振力圆频率, 桩周土对桩身单位面积的侧壁切应力为 $f(z)$, 桩底土对桩的作用简化为线性弹簧 k_b , 桩材密度为 ρ_p , 杨氏模量为 E_p , 桩身纵向波速为 V_p , 横截面积为 A , 桩截面半径为 r_1 , 第一圈土的外半径为 r_2 。第一、二圈土的变形模量为 E_{1s} , E_{2s} , 土层底部为弹性支承, 并简化为 Winkler 线性分布式弹簧, 分布式弹簧常数分别为 k_{s1} , k_{s2} 。

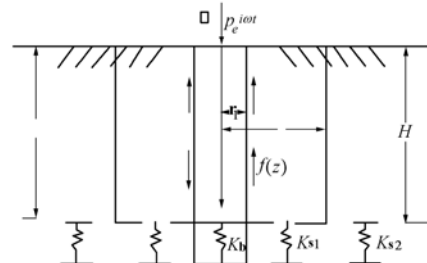


图 1 桩土系统动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of pile-soil system

假设下列条件成立: ①桩周土为均质、各向同性线性粘弹性体, 土层底部为弹性支承边界; ②土体材料阻尼采用与振频无关的滞回阻尼形式; ③土层上表面为自由边界, 无正应力、剪应力; ④桩土体系纵向振动时, 桩周土水平径向位移可忽略; ⑤桩为弹性、竖直、圆形均匀截面桩; ⑥桩土系统振动为小变形谐和振动。

桩与周围土体完全接触, 即桩土接触面(两圈土接触界面)两侧位移、力连续; 在动力荷载作用下的桩基动力响应问题实质是桩土间的动力相互作用问

题, 土与桩的相互作用是通过两者的接触面传递的。其定解问题应从下面四个方面建立: ①土体的动力平衡条件; ②桩身的动力平衡条件; ③土体与桩的连接条件(土体与土体的连接条件); ④桩、土体的外部边界条件。

以上四方面条件就构成了桩和土层动力相互作用的定解问题。以下从轴对称角度分别建立如下方程。

令第一、二圈土中任一点纵向振动位移为 $w_1(r, z, t)$, $w_2(r, z, t)$, 可从轴对称角度建立粘弹性土层纵向振动的动力平衡方程如下:

$$[(\lambda_1 + 2G_1) + i(\lambda_1' + 2G_1')] \frac{\partial^2}{\partial z^2} w_1(r, z, t) + (G_1 + iG_1') \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) w_1(r, z, t) = \rho_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} w_1(r, z, t) \quad (1)$$

$$[(\lambda_2 + 2G_2) + i(\lambda_2' + 2G_2')] \frac{\partial^2}{\partial z^2} w_2(r, z, t) + (G_2 + iG_2') \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) w_2(r, z, t) = \rho_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} w_2(r, z, t) \quad (2)$$

桩土体系发生谐和振动, 故可以将位移表示为

$$w_1(r, z, t) = w_1(r, z) e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$w_2(r, z, t) = w_2(r, z) e^{i\omega t} \quad (4)$$

令土层纵向振动振幅分别为

$$w_1 = w_1(r, z), \quad w_2 = w_2(r, z), \quad \text{方程 (1)、(2)}$$

可化简为

$$\{ \eta_1^2 + i[D_{v1}(\eta_1^2 - 2) + 2D_{s1}] \} \frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2} + (1 + iD_{s1}) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 w_1}{\partial r^2} \right) = - \left(\frac{\omega}{V_{s1}} \right)^2 w_1 \quad (5)$$

$$\{ \eta_2^2 + i[D_{v2}(\eta_2^2 - 2) + 2D_{s2}] \} \frac{\partial^2 w_2}{\partial z^2} + (1 + iD_{s2}) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 w_2}{\partial r^2} \right) = - \left(\frac{\omega}{V_{s2}} \right)^2 w_2 \quad (6)$$

上述方程中, λ, G 为拉梅常数; λ', G' 为与拉梅常数各自相关的粘性系数, $i = (-1)^{\frac{1}{2}}$;

$\eta = V_l/V_s = \{(\lambda + 2G)/G\}^{\frac{1}{2}} = \{2(1 - \mu)/(1 - 2\mu)\}^{\frac{1}{2}}$; ρ 为土的密度; ω 为激振频率; V_l, V_s 为土介质纵向和剪切波速; μ 为泊松比; $D_v = \lambda/\lambda', D_s = G/G'$ 分别为与体积和剪应变相关的滞回阻尼比, 他们与振频

无关。

对于滞回阻尼土, 桩周土对桩身单位面积(两圈土的力形式也一样)的侧壁切应力可表示为

$$f(r, z) = \tau_{rz} e^{i\omega t} = G(1 + iD_s) \frac{\partial}{\partial r} (w(r, z) e^{i\omega t}) \quad (7)$$

令 $u(z)$ 为桩身质点纵向振动位移幅值, m 为桩的单位长度质量, 取桩身微元体做动力平衡分析, 可得桩作纵向振动基本方程如下:

$$E_p A \frac{\partial^2}{\partial z^2} (u(z) e^{i\omega t}) - m \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u(z) e^{i\omega t}) - 2\pi r_1 f(r_1, z) = 0 \quad (8)$$

桩与土体接触界面处力的平衡条件及位移相容协调条件:

$$w_1(r_1, z) = u(z) \quad (9)$$

$$p(r_1, z) = -f(r_1, z) \quad (10)$$

式中 $p(r_1, z)$ 为桩沿桩周侧壁对第一圈土的竖向反作用力。

桩土边界条件:

土层上边界条件及底部边界条件:

$$\frac{\partial w_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial w_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{k_{1s}}{E_{1s}} w_1 + \frac{\partial w_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{k_{2s}}{E_{2s}} w_2 + \frac{\partial w_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (11)$$

对于外圈土水平无限远处, 土体应力、位移趋近于 0。

桩顶及底部边界条件:

$$\frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = -\frac{P}{E_p A}, \quad \left(\frac{du}{dz} + \frac{k_b}{E_p A} u \right) \Big|_{z=H} = 0 \quad (12)$$

两圈土连续条件:

$$w_1(r_2, z) = w_2(r_2, z) \quad (13)$$

$$G_1(1 + iD_{s1}) \frac{\partial}{\partial r} w_1(r, z) e^{i\omega t} \Big|_{r=r_2} = G_2(1 + iD_{s2}) \frac{\partial}{\partial r} (w_2(r, z) e^{i\omega t}) \Big|_{r=r_2} \quad (14)$$

由以上可以看出, 由土层及桩身振动的基本方程结合定解条件就构成了桩、土系统耦合的定解问题。

2 桩土耦合纵向振动问题的求解

2.1 土层振动问题求解

采用分离变量法, 令 $w_2 = R(r)Z(z)$ 并代入方程 (5) 中可得:

$$\{ \eta_2^2 + i[D_{v2}(\eta_2^2 - 2) + 2D_{s2}] \} \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + (1 + iD_{s2}) \left(\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \frac{1}{R} = - \left(\frac{\omega}{V_{s2}} \right)^2 \quad (15)$$

方程(15)可以分解为两个常微分方程:

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + h_2^2 Z = 0 \quad , \quad (16)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - q_2^2 R = 0 \quad . \quad (17)$$

常数之间满足以下关系:

$$q_2^2 = \frac{\{\eta_2^2 + i[D_{s2}(\eta_2^2 - 2) + 2D_{s2}]\}h_2^2 - (\omega/v_{s2})^2}{(1 + iD_{s2})} \quad , \quad (18)$$

方程(16)、(17)的解为

$$Z(z) = C_2 \sin(h_2 z) + D_2 \cos(h_2 z) \quad , \quad (19)$$

$$R(r) = A_2 K_0(q_2 r) + B_2 I_0(q_2 r) \quad . \quad (20)$$

$I_0(q_2 r)$, $K_0(q_2 r)$ 为零阶第一类、第二类贝塞尔函数,其他的为由边界条件决定的积分常数。

由土层边界条件2)可知 $B=0$,由土层边界条件1)可得 $C=0$ 以及以下关系式:

$$\tan(Hh_2) = K_2 / (Hh_2) \quad (21)$$

此为一超越方程,这里 $K_2 = Hk_{s2}/E_{s2}$ 表示土层底部无量纲支承刚度,采用二分法编程求解此方程可以得到 Hh_2 和 h_2 的值。因此,由上可得到土层振动幅值的表达式:

$$w_2 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n K_0(q_{2n} r) \cos(h_{2n} z) \quad , \quad (22)$$

式中 A_n 是一系列待定常数,第二圈土对第一圈土单位面积的侧壁切应力幅值可进一步表示为

$$\tau_{rz2} = G_2 (1 + iD_{s2}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n q_{2n} K_1(q_{2n} r_2) \cos(h_{2n} z) \quad , \quad (23)$$

这里 $K_1(q_{2n} r)$ 为一阶第二类贝塞尔函数。

同样的方法我们可以得到第一圈土的基本表达式:

$$\tan(Hh_1) = K_1 / (Hh_1) \quad , \quad (24)$$

$$w_1 = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n K_0(q_{1n} r) + C_n I_0(q_{1n} r)] \cos(h_{1n} z) \quad , \quad (25)$$

$$\tau'_{rz2} = G_1 (1 + iD_{s1}) \sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n q_{1n} K_1(q_{1n} r_2) - C_n q_{1n} I_1(q_{1n} r_2)] \cos(h_{1n} z) \} \quad , \quad (26)$$

$$\tau_{rz1} = G_1 (1 + iD_{s1}) \sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n q_{1n} K_1(q_{1n} r_1) - C_n q_{1n} I_1(q_{1n} r_1)] \cos(h_{1n} z) \} \quad . \quad (27)$$

式(27)为第一圈土对桩身单位面积的侧壁切应力的幅值。

由第一、第二圈土的连续条件可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n K_0(a_{2n} r_2) \cos(h_{2n} z) = \sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n K_0(q_{1n} r_2) + C_n I_0(q_{1n} r_2)] \cos(h_{1n} z) \} \quad , \quad (28)$$

$$G_1 (1 + iD_{s1}) \sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n q_{1n} K_1(q_{1n} r_2) - C_n q_{1n} I_1(q_{1n} r_2)] \cos(h_{1n} z) \} = G_2 (1 + iD_{s2}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n q_{2n} K_1(q_{2n} r_2) \cos(h_{2n} z) \quad . \quad (29)$$

根据固有函数 $\cos(h_n z)$ 的正交性:

$$\int_0^H \cos(h_n z) \cos(h_m z) dz = 0, n \neq m ;$$

$$\int_0^H \cos(h_n z) \cos(h_m z) dz \neq 0, n = m ;$$

可以求出:

$$B_n = F_n A_n, C_n = E_n B_n ;$$

其中

$$E_n = \frac{\{G_2 (1 + iD_{s2}) q_{2n} K_1(q_{1n} r_2) K_0(q_{2n} r_2) + G_1 (1 + iD_{s1}) q_{1n} K_0(q_{1n} r_2) K_1(q_{2n} r_2)\}}{\{G_1 (1 + iD_{s1}) q_{1n} I_0(q_{1n} r_2) K_1(q_{2n} r_2) - G_2 (1 + iD_{s2}) q_{2n} I_1(q_{1n} r_2) K_0(q_{2n} r_2)\}}$$

$$F_n = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^H [K_0(q_{1n} r_2) + E_n I_0(q_{1n} r_2)]^* \cos(h_{1n} z) \cos(h_{2n} z) dz}{K_0(q_{2n} r_2) \int_0^H \cos^2(h_{1n} z) dz}$$

(对 $2n$ 求和)

2.2 桩振动方程求解

将式(27)代入桩振动的基本方程中并化简可得到

$$V_p^2 \frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} + \omega^2 u(z) - \frac{2\pi r_1 G_1}{\rho_p A} (1 + iD_{s1})^* \sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n q_{1n} K_1(q_{1n} r_1) - C_n q_{1n} I_1(q_{1n} r_1)] \cos(h_{1n} z) \} = 0, \quad (30)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \{ [B_n q_{1n} K_1(q_{1n} r_1) - C_n q_{1n} I_1(q_{1n} r_1)] \cos(h_{1n} z) \} = 0,$$

则方程(30)的通解为

$$u = D_1 \cos\left(\frac{\omega}{V_p} z\right) + D_2 \sin\left(\frac{\omega}{V_p} z\right) \quad , \quad (31)$$

其特解形式可写为

$$u^* = \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(h_{1n} z) \quad . \quad (32)$$

所以方程(30)的解可写为

$$u = D_1 \cos\left(\frac{\omega}{V_p} z\right) + D_2 \sin\left(\frac{\omega}{V_p} z\right) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(h_{1n} z) \quad . \quad (33)$$

将特解表达式代入到桩振动的基本方程中并化简可得到:

$$M_n = -J_n / (V_p^2 h_{1n}^2 - \omega^2) \quad (34)$$

其中

$$J_n = \frac{2\pi r_1}{\rho_p A} G_1 (1 + iD_{s1}) q_{1n} * [B_n K_1(q_{1n} r_1) - C_n I_1(q_{1n} r_1)] \quad (35)$$

由桩身与第一圈土接触界面两侧位移连续可得:

$$D_1 \cos(\frac{\omega}{V_p} z) + D_2 \sin(\frac{\omega}{V_p} z) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(h_{1n} z) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n K_0(q_{1n} r_1) + C_n I_0(q_{1n} r_1)] \cos(h_{1n} z) \quad (36)$$

同样根据固有函数 $\cos(h_{1n} z)$ 的正交性:

$$\int_0^H \cos(h_n z) \cos(h_m z) dz = 0, n \neq m; \int_0^H \cos(h_n z) \cos(h_m z) dz \neq 0, n = m; \text{并令 } L_n = \int_0^H \cos^2(h_{1n} z) dz \quad (37)$$

$$N = D_1 \cos(\frac{\omega}{V_p} z) + D_2 \sin(\frac{\omega}{V_p} z) \quad (38)$$

在式 (35) 的两边同乘上 $\cos(h_{1n} z)$, 然后在 0 到 H 上积分可得到:

$$B_n = \frac{1}{\phi_n L_n} \int_0^H N \cos(h_{1n} z) dz \quad (39)$$

其中:

$$\phi_n = [K_0(q_{1n} r_1) + E_n I_0(q_{1n} r_1)] + \frac{2\pi r_1}{\rho_p A (V_p^2 h_{1n}^2 - \omega^2)} * G_1 (1 + iD_{s1}) q_{1n} [K_1(q_{1n} r_1) - E_n I_1(q_{1n} r_1)] \quad (40)$$

积分式 (39) 可以得到 B_n 的表达式, 从而可以得到桩身振动的解析解。

对桩的振动位移进行变换可得

$$u = D_1 [\cos(\frac{\omega}{V_p} z) + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n' \cos(h_{1n} z)] + D_2 [\sin(\frac{\omega}{V_p} z) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \cos(h_{1n} z)] \quad (41)$$

式中

$$\gamma_n' = \gamma_n [\frac{1}{(\frac{\omega}{V_p} - h_{1n})} \sin(\frac{\omega}{V_p} - h_{1n}) H] + [\frac{1}{(\frac{\omega}{V_p} + h_{1n})} \sin(\frac{\omega}{V_p} + h_{1n}) H] \quad (42)$$

$$\gamma_n'' = \gamma_n [\frac{1}{(\frac{\omega}{V_p} + h_{1n})} (\cos(\frac{\omega}{V_p} + h_{1n}) H - 1)] + [\frac{1}{(\frac{\omega}{V_p} - h_{1n})} (\cos(\frac{\omega}{V_p} - h_{1n}) H - 1)] \quad (43)$$

$$\gamma_n = -[\frac{(1 + iD_{s1}) q_{1n} \rho_{s1} v_{1n}^2}{r_1 (h_{1n}^2 - \theta^2)} \phi_n L_n] * (K_1(\overline{q_{1n} r_1}) - E_n I_1(\overline{q_{1n} r_1})) \quad (44)$$

其中

$$T_c = H/V_p, \overline{h_{1n}} = H h_{1n}, \theta = \omega T_c, \overline{q_{1n}} = q_{1n} H, \overline{r_1} = r_1/H, \overline{v_{1n}} = V_{s1}/V_p, \overline{\rho_{s1}} = \rho_{s1}/\rho_p$$

都是无量纲参数。

令 $R = K_b H / (E_p A)$, 根据桩顶及底部边界条件, 即可以确定两个参数 D_1, D_2 。

桩顶位移频率响应函数为

$$H_u(\omega) = u/p = -\frac{H}{E_p A \theta} ((D_1/D_2)(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n') - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'') \quad (45)$$

$$\frac{D_1}{D_2} = [R(\sin(\theta) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \cos(\overline{h_{1n}})) + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \overline{h_{1n}} \sin(\overline{h_{1n}}) + \theta \cos(\theta)] /$$

$$[-R(\cos(\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n' \cos(\overline{h_{1n}})) +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n' \overline{h_{1n}} \sin(\overline{h_{1n}}) + \theta \sin(\theta)] \quad (46)$$

桩顶速度频率响应 (导纳) 函数为

$$H_v(\omega) = i\omega H_u(\omega) = \left(\frac{1}{(\rho_p A V_p)} \right) H_v' \quad (47)$$

式中 H_v' 为导纳无量纲参数,

$$H_v' = -i \left((D_1/D_2)(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n') - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \right) \quad (48)$$

定义桩顶复刚度如下:

$$K_d = p/u = (E_p A/H) k' \quad (49)$$

这里 k' 为桩顶复刚度无量纲因子:

$$k' = -\frac{\theta}{\left[(D_1/D_2)(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n') - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \right]} \quad (50)$$

3 桩土系统的振动特性分析

桩土系统动力作用可以由桩顶复刚度、幅频响应等来分析。以下通过分析内外两圈土的参数变化（主要是密度和剪切波速）对两者的影响来分析弹性支承条件下桩土系统的振动特性。取

$$\rho_2 = 1935, \mu = 0.4,$$

$$V_{s2} = 193.2, v_p = 3800, r1 = 0.5,$$

$$r2 = 4 * r1, H = 20$$

其他条件见图上标注。

3.1 桩顶复刚度分析

桩顶复刚度由表达式(50)给出，其实部代表了真实的刚度，虚部为动阻尼部分反映能量的消散。下面的图反映了考虑打桩效应引起靠近桩的土的参数发生变化而引起桩顶复刚度的变化。

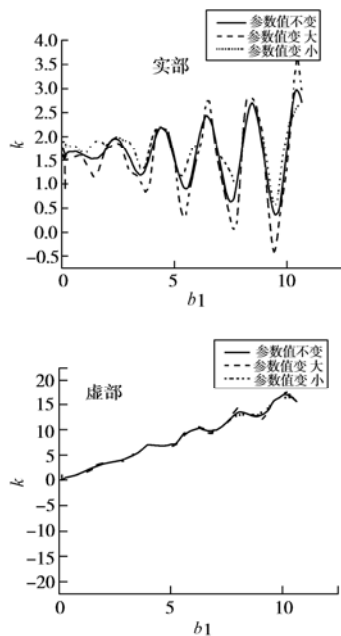


图2 参数改变对复刚度的影响

Fig. 2 Variations of complex stiffness with parameters

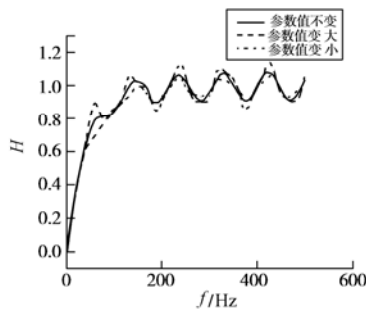


图3 参数改变对速度导纳曲线的影响

Fig. 3 Variations of velocity admittance with parameters

由图可以看出参数改变对复刚度实部部分振荡相位影响不是很明显，当参数变大时，峰值有所增大，

当参数变小时，峰值有所减小，而参数改变对虚部(阻尼)基本没有影响。

3.2 桩顶速度幅频响应分析

从上图可以看出，打桩引起的土层参数变化（主要考虑密度、剪切波速）对桩顶速度导纳曲线的相位，即桩的谐振频率没什么影响，只对共振峰值产生影响。当靠近桩的土参数增大时，共振峰值减小，当靠近桩的土参数减小时，共振峰值增大。

4 工程应用

由于本问所得解与常规参数（土层剪切波速及密度）之间有明确的关系，而土层剪切波速与密度都很容易测得（也可借用地区性经验值），因此土模型参数就可以比较准确的确定，这就在很大程度上避免了以前研究工作中土参数的不确定性，从而可以大大提高分析结果的可靠性，下面给出一根工程桩的拟合实例。

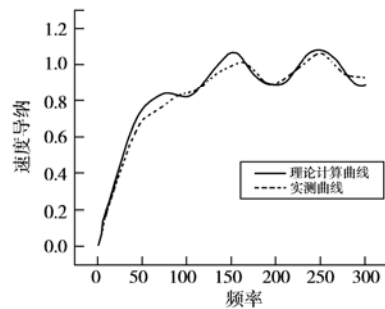


图4 理论曲线与实测速度导纳曲线的比较

Fig. 4 Comparison between the theoretical and measured curves

上图是浙江湖州某工地的一根钻孔灌注桩的测试和反演拟合分析曲线，桩直径为0.8 m，桩长19.23 m，混凝土标号C25。该场地的土层分布情况为：①地表到地表以下2 m左右为粉质粘土；②2 m以下一直到15 m左右为淤泥或者淤泥质粘土；③15 m以下为强风化至中风化基岩。该桩为嵌岩桩，属于端承桩。分析时，3层土内外圈的剪切波速及密度分别取下列值：①130 m/s, 115 m/s, 2000 kg/m³, 1850 kg/m³；②90 m/s, 86 m/s, 1600 kg/m³, 1556 kg/m³；③270 m/s, 254 m/s, 2100 kg/m³, 2017 kg/m³。理论计算时参数取的是3层土的加权平均值，由图可见，实测曲线跟理论计算曲线虽然有一定的偏差，但是大体形状、峰值、相位还是比较一致的。

5 结 语

(1) 本文从土层分布为轴对称条件出发，考虑打桩引起的土层参数变化，把桩周土分为内外两圈，建立了弹性支承桩与均质滞回材料阻尼土层纵向耦合振

动的定解问题,求得了在较严格条件下,弹性支承桩在谐和荷载作用下位移、速度频域响应解析解,发展了桩基振动理论,为桩基抗震防震设计,以及桩基定量化检测分析提供了新的理论支持。

(2) 研究表明,由于打桩而引起的参数变化对于桩顶复刚度的影响主要在于实部,而对于虚部基本没什么明显的影响。当采用挖孔桩时,会使得靠近桩身的土密度等参数变小,从而使得桩顶复刚度的峰值变小;而对于那些挤土桩,使得桩周土加密,密度等参数变大,使得桩顶复刚度实部峰值变大。

(3) 同样对于速度导纳曲线的分析可以看出,当密度、剪切波速增大时,峰值也有所增大,当密度、剪切波速变小时,峰值有所减小。而参数变化对于相位没什么明显的影响。

(4) 将理论曲线和实测曲线的拟合比较分析表明,本文理论解物理意义明确,能够很好的反映在打桩影响下桩土体系的振动特性。

参考文献:

- [1] Korten H Van, Middendorp P, Brederode P Van. An analysis of dissipative wave propagation in a pile[A]. Intlseminar on the application of Stress-Wave Theory on Piles[C].Stockholm, 1980.58 - 64.
- [2] Wang T, Wang K H, Xie K H. An analytical solution to longitudinal vibration of a pile of arbitrary segments with variable modulus[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, 14(1): 67 - 73.
- [3] Nogami T, Novak M. Soil-pile interaction in vertical vibration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1976,4: 277 - 293.
- [4] 胡昌斌.考虑土竖向波动效应时成层土中桩土纵向耦合振动理论[D].浙江大学博士论文.
- [5] Han Y C, Dynamic vertical response of piles in nonlinear soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 1997,123(8):710 - 716.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续4版确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中排列首位;本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊),并被评为“百种中国杰出学术期刊”;本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”等多个国内重要的数据库收录,并可在《中国学术期刊(光盘

版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索;本刊被美国工程索引EI网络版等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊2005年起改版为月刊,A4开本,双栏排版,120页,每月15日出版,每期定价15元,全年180元。

本刊国际标准刊号ISSN 1000-4548,国内统一刊号CN 32-1124/TU,国内发行代号28-62,国外发行代号MO 0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购,也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址:(210024)南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部;联系电话:(025)85829534,85829553;传真:(025)85829555;电子信箱:ge@njhri.edu.cn。

(本刊编辑部)