

文章编号: 1000-4750(2007)03-0147-07

考虑桩土耦合作用时桩基扭转振动特性研究

*胡昌斌^{1,2}, 张 涛²

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘 要: 假设桩周土层为均质线性粘弹性体, 土材料阻尼为粘性阻尼, 桩为竖直弹性均匀圆形截面桩, 从三维轴对称角度, 对考虑桩土耦合作用时桩基扭转振动桩顶频域振动特性进行了理论研究。利用拉普拉斯变换, 首先通过对土层进行求解得到其振动扭转角位移形式解, 然后利用该解并以小应变条件下桩土接触界面位移连续来考虑桩土的耦合作用, 来分析基桩的动力反应, 研究得到了考虑桩土耦合作用时桩顶扭转频域响应函数的解析解。基于所得解对桩土系统的扭转振动特性进行了对比和分析, 并重点探讨了桩侧土粘性阻尼对桩顶响应的特殊影响, 校验了基于平面应变假定桩基扭转振动理论解的精确性。

关键词: 桩土耦合作用; 扭转振动; 粘性阻尼; 频域; 解析解

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A

SOIL-PILE INTERACTION IN TORSIONAL VIBRATIONS OF A PILE IN VISCOUS DAMPING SOIL LAYER

*HU Chang-bin^{1,2}, ZHANG Tao²

(1. Transportation College of Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Assuming that soil is uniform and linear viscoelastic layer with viscous damping, soil-pile interaction and the frequency-domain torsional response of a dynamically loaded pile in the soil layer are theoretically investigated. By Laplace transformation, the soil layer is studied first and the vibration displacement solution with undecided constants of soil layer is used in the analysis of pile response. And the corresponding solution of the displacement and velocity response functions at the pile head in frequency domain and the dynamic stiffness of pile are obtained in closed forms. A parametric study is conducted to determine the main features of the soil-pile interaction, and the special influence of viscous damping of soil layer is also discussed. Finally, a comparison between the theories based on plane strain assumption and the solution developed in this paper is investigated.

Key words: pile-soil interaction; torsional vibration; viscous damping; frequency domain; analytical solution

桩基振动理论是桩基础抗震、防震设计的基本依据, 同时也是桩各种动态测试方法的理论基础。近几十年来, 桩基振动理论研究得到了飞速发展, 研究范围从频域响应到时域响应, 从单桩到群桩, 从纵向振动到横向振动、扭转振动, 桩周土从线性

到非线性, 从单层到多层等多个分支领域。解析法、半解析法、有限元法及边界元法等各种解析和数值求解方法也被广泛应用^[1~12]。

在桩基振动理论解析法研究中, 基于 Winkler 假定和 Novak 提出的平面应变假定及其演化理论形

收稿日期: 2005-08-10; 修改日期: 2006-03-14

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0410017); 福州大学科技发展基金项目(2004-XQ-20)

作者简介: *胡昌斌(1974), 男, 湖北孝感人, 副教授, 博士后, 主要从事土动力学, 道路工程方面的研究(E-mail: huchb@sohu.com);

张 涛(1980), 男, 辽宁沈阳人, 硕士生, 主要从事桩基动力学研究。

式的简化连续介质土模型^[2], 以其简便实用的特性应用最为广泛, 应用范围既涉及与桩基设计相关的单桩、群桩桩顶频域、时域响应理论研究^[1~6], 也广泛涉及桩基质量动态测试分析的理论研究与实践工作^[12]。

其中, 有代表性的工作有, Militano G 和 Rajapakse R K N D(1999)^[3]依据平面应变假定对多层土中桩的纵向和扭转振动特性进行的理论研究。国内王奎华、王腾、刘东甲^[5,12]等依据 Winkler 假定分别对成层土中、变阻抗桩、缺陷桩的纵向频域时域响应进行的解析理论研究等。

但应该看到, 平面应变简化模型和 Winkler 假定忽略了土层内部竖向应力梯度的变化, 无法考虑桩与土层的动力耦合作用, 波只能水平向传播。不能很好反映桩周土的三维波动效应和桩土相互作用对桩顶响应的影响, 因此在反映桩土体系的实际振动特性方面存在局限, 应用时势必带来误差^[9]。相比之下, 将桩周土视为粘弹性三维连续介质, 考虑桩土耦合作用的桩基振动理论研究, 可以考虑土体应力和位移沿深度的梯度变化、桩土相互作用对桩顶响应的影响, 理论上更严格, 且与常规土参数能建立明确联系, 更具适用性。

基于以上思路, 笔者近年来先后对粘弹性连续介质土中的桩土耦合纵向振动问题进行了研究, 并校验了平面应变假定在桩基纵向振动理论分析中的适用性^[9], 得到若干重要结论。同纵向振动一样, 桩基扭转振动和水平振动理论, 也是桩基抗震、防震设计理论研究的重要内容。而且研究表明, 利用桩身扭转波的传播特性进行桩基质量动力检测, 对于当前以纵波理论为基础的桩基检测有着很好的补充判别作用^[12], 因此, 作为理论研究的进一步深入, 本文对三维粘弹性粘性阻尼土中, 考虑桩土耦合作用时桩基扭转振动特性进行了解析理论研究, 并进行了重点分析和对比, 具体如下。

1 基本假定及定解问题

1.1 计算简图及假设条件

本文研究的是桩土耦合扭转振动时桩顶动力响应问题, 计算简图如图 1 所示, 桩长为 H , 桩顶作用有任意激振扭矩 $m(t)$, 桩底土对桩的作用简化为线性弹簧 k_{bs} 和线性阻尼器 c_{bs} 并联的方式, 其值可采用根据弹性半空间理论推导出的桩端土的扭转刚度系数和阻尼系数的表达式。桩材密度为 ρ_p ,

桩的剪切模量为 G_p , 桩身扭转波速为 V_p , 桩截面半径为 r_0 。桩周为粘性阻尼土层, 厚度为 H , 土层底部为弹性扭转刚度支承, 其分布式弹簧刚度常数为 k_s , 按地基扭转刚度取值。

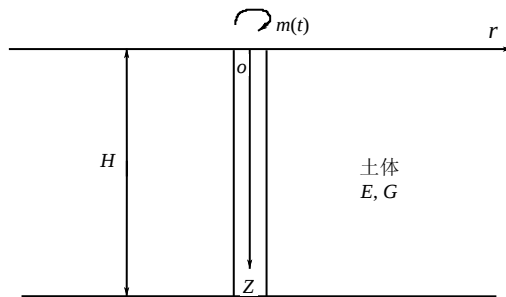


图 1 扭转振动的桩土系统

Fig.1 Soil-pile system subject to torsional vibration

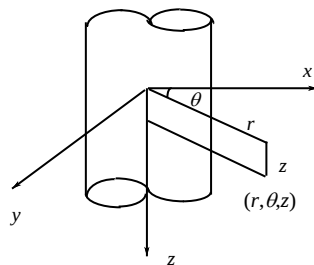


图 2 桩土相互作用系统计算坐标系

Fig.2 Coordinate system of soil-pile interaction

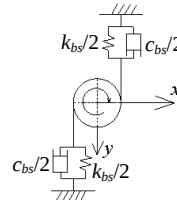


图 3 扭转振动时桩底土对桩底端的作用模型

Fig.3 Dynamic mechanical model of soil layer under pile tip
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) 土体材料阻尼为粘性阻尼, 即阻尼力与应变率成正比;
- (3) 土层上表面为自由边界, 无正应力、剪应力;
- (4) 桩土体系扭转振动时, 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, 桩与周围土体完全连续接触, 即桩土接触界面两侧位移、力连续。

1.2 定解问题

在动力荷载作用下的桩基动力响应实际是桩

土间的动力相互作用问题,该定解问题应从四方面建立:(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,包括在接触面上桩身和土体位移的相容协调条件、接触面上力的平衡条件;(4) 桩、土体的外部边界条件、初始条件。

本文从轴对称角度建立粘弹性土层扭转振动的动力平衡方程

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{C_s}{G_s} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \frac{C_s}{G_s} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: u_θ 为土质点沿 θ 方向的位移, G_s 为土的剪切模量、 C_s 为土的粘性材料阻尼系数, ρ_s 为土的密度。令 $\theta(z,t)$ 为桩身单元扭转角,取桩身微元体作动力平衡分析,可得桩扭转振动基本方程

$$\rho_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - G_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - 4 \frac{\sigma_{r\theta}}{r^2} = 0 \quad (2)$$

式中: $\sigma_{r\theta}$ 为桩土交界面处土对桩身的接触剪应力, G_p 为桩的剪切模量, ρ_p 为桩的密度。

土体与桩的连续条件,即土体与桩在接触面处 ($r=r_0$ 处) 力的平衡条件和位移相容协调条件:

$$\sigma_{r\theta}(z,t) = f_{r\theta}(z,t) = \left(G_s + C_s \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \Big|_{r=r_0} \quad (3a)$$

$$r_0 \theta(z,t) = u_\theta(r_0, z, t) \quad (3b)$$

上式中 $f_{r\theta}(z,t)$ 为接触面处桩沿桩侧壁对土层的作用力。 $u_\theta(r_0, z, t)$ 为接触界面处土质点沿 θ 方向位移。

土层外部边界条件:

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial z} u_\theta(r, z, t) \Big|_{z=0} = 0 \quad (4a)$$

$$\left(\frac{k_s}{G_s} u_\theta + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \Big|_{z=H} = 0 \quad (4b)$$

(2) 水平无限远处: 土体应力、位移趋近于 0。
桩的外部边界条件:

$$G_p J_p \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = -m(t) \quad (5a)$$

$$G_p J_p \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H} = -m_b \quad (5b)$$

式中: J_p 为桩身截面的极惯性矩 $J_p = \pi r_0^4 / 2$, $m(t)$ 和 m_b 分别为桩顶激振扭矩及桩底土对桩尖的作用扭矩。由弹性半空间对其表面扭转振动刚性圆盘的

作用,近似表示桩底土对桩尖的作用,该作用扭矩 m_b 可表示为: $m_b = k_{bs} \theta + c_{bs} \partial \theta / \partial t$, 由文献[11]可知桩底土刚度系数 k_{bs} 以及阻尼系数 c_{bs} 的表达式

$$\begin{cases} k_{bs} = (32/9) \rho_{sb} V_{sb}^2 r_0^3 \\ c_{bs} = (\pi/2) \rho_{sb} V_{sb} r_0^4 \end{cases} \quad (6)$$

式中 ρ_{sb} 为桩底土密度, V_{sb} 为桩底土剪切波速。

桩土系统初始条件:

土层部分

$$\begin{cases} u_\theta(r, z, t) \Big|_{t=0} = 0 \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial t} \Big|_{(r, z, 0)} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} \Big|_{(r, z, 0)} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

桩身部分

$$\theta(z, 0) = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_{(z, 0)} = 0 \quad (8)$$

至此,由基本方程(1)、方程(2)结合定解条件(3)~(8)就构成了桩、土系统耦合振动的定解问题。

2 定解问题求解

2.1 土层振动问题求解

令 $U_\theta(r, z, s)$ 为 $u_\theta(r, z, t)$ 的拉氏变换, 对式(1)进行拉氏变换并化简可得

$$\frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \left[\frac{1}{r^2} + \frac{\rho_s s^2}{(G_s + C_s s)} \right] U_\theta + \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

采用分离变量法, 令

$$U_\theta(r, z, s) = R(r)Z(z) \quad (10)$$

代入方程(9)化简可得

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \left[\frac{1}{r^2} + \frac{\rho_s s^2}{(G_s + C_s s)} \right] R = 0 \quad (11)$$

方程(11)可分成两个常微分方程

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + h^2 Z = 0 \quad (12a)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \left[\frac{1}{r^2} + q^2 \right] R = 0 \quad (12b)$$

式中 h, q 为常数, 并满足下列关系

$$q^2 = \frac{\rho_s s^2}{(G_s + C_s s)} + h^2 \quad (13)$$

方程(12a), 方程(12b)的解为

$$Z(z) = C \sin(hz) + D \cos(hz) \quad (14)$$

$$R(r) = AK_1(qr) + BI_1(qr) \quad (15)$$

式中, $I_1(qr), K_1(qr)$ 分别为一阶第一类、第二类虚宗量贝塞尔函数, A, B, C, D 为由边界条件决定的积分常数。对土层边界条件进行拉普拉斯变换, 由条

件(2)可知式(15)中 $B=0$ ，由边界条件(1)可得 $C=0$ 及式

$$\operatorname{tg}(Hh) = K/(Hh) \quad (16)$$

式中， $K = Hk_s / G_s$ 为表示土层底部扭转刚度的无量纲参数， H 为土层厚度。很容易通过二分法求解得到 Hh_n, h_n 的值。至此， $U_\theta(r, z, s)$ 可以写成下列形式

$$U_\theta(r, z, s) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n K_1(q_n r) \cos(h_n z) \quad (17)$$

式中， A_n 是一系列待定常数，它是由桩土耦合振动特性及桩土接触界面的连续条件决定的，其内涵反映了桩与土层各振动模态的振动耦合作用。 q_n 是当 $h = h_n$ 时，由方程(13)计算得到的一组参数。

2.2 桩扭转振动问题求解

令 $\Theta(z, s)$ 为桩振动扭转角 $\theta(z, t)$ 的拉氏变换形式，对桩扭转振动基本方程(2)进行拉氏变换，并利用桩土接触面上的连续条件和依据桩、土接触面上力的平衡条件及式(17)，可得

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} - \frac{s^2}{V_p^2} - \frac{4}{r_0^2 G_p} (G_s + C_s s) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(h_n z) \times \left[q_n K_2(q_n r_0) + \frac{1}{r_0} K_1(q_n r_0) \right] = 0 \quad (18)$$

式中 $K_2(q_n r_0)$ 为二阶第二类虚宗量贝塞尔函数。

取 $\lambda^2 = -s^2$ 。则方程(18)的解的形式可写为

$$\Theta = D_1' \cos\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) + D_2' \sin\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(h_n z) \quad (19)$$

式(19)前两项构成方程(18)的通解，第三项为方程(18)的特解，通解中 D_1' 、 D_2' 为可由边界条件得到的常数，特解中的 C_n 为待定系数。将特解表达式代入式(18)并化简可以得到

$$C_n = -\frac{4G_s V_p^2}{r_0^3 G_p (h^2 V_p^2 + p^2)} B_n \quad (20)$$

$$B_n = A_n [q_n r_0 K_2(q_n r_0) + K_1(q_n r_0)] \quad (21)$$

令 $D_1 = D_1' r_0$ ， $D_2 = D_2' r_0$ ，由桩土界面两侧位移连续条件及式(17)、式(19)和式(20)可知

$$D_1 \cos\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) + D_2 \sin\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n A_n \cos(h_n z) \quad (22)$$

$$\phi_n = K_1(q_n r_0) + \frac{4G_s V_p^2 [q_n r_0 K_2(q_n r_0) + K_1(q_n r_0)]}{r_0^2 G_p (h_n^2 V_p^2 + s^2)} \quad (23)$$

根据固有函数系 $\cos(h_n z)$ 在 $[0, H]$ 上的正交性，令：

$$\left\{ \begin{aligned} L_n &= \int_0^H \cos^2(h_n z) dz \\ P &= D_1 \cos\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) + D_2 \sin\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) \end{aligned} \right. \quad (24a)$$

$$(24b)$$

在式(22)两端分别乘上 $\cos(h_n z)$ ，然后在 $[0, H]$ 上积分可得系数 A_n 的表达式

$$A_n = \frac{1}{\phi_n L_n} \int_0^H p \cos(h_n z) dz \quad (25)$$

至此，由式(19)~式(21)，式(25)可以得到桩扭转振动时位移响应的拉氏变换表达式

$$\Theta = \frac{D_1}{r_0} \left[\cos\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n' \cos(h_n z) \right] + \frac{D_2}{r_0} \left[\sin\left(\frac{\lambda}{V_p} z\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n'' \cos(h_n z) \right] \quad (26)$$

对桩顶部及底部边界条件进行拉氏变换，并将式(26)代入其中，即可求得待定常数 D_1 和 D_2 ，令 $M(s)$ 为桩顶激振扭矩 $m(t)$ 的拉氏变换，令 $s = i\omega$ ，(i 为虚数单位)，即可由定义求得桩顶扭转角阻抗函数为

$$Z(s) = \frac{M(s)}{\Theta(z, s)} = -\frac{G_p J_p \lambda'}{H} \left[\frac{1}{(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n' \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n''} \right] \quad (27)$$

式中 $D_1/D_2 = B_1/B_2$

$$B_1 = \left[\lambda' \cos(\lambda') + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{h}_n \gamma_n'' \sin(\bar{h}_n) \right] + (R + sA_b) [\sin(\lambda') - \gamma'' \cos(h_n)] \quad (28)$$

$$B_2 = \left[\lambda' \sin(\lambda') + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{h}_n \gamma_n' \sin(\bar{h}_n) \right] - (R + sA_b) [\cos(\lambda') + \gamma' \cos(h_n)] \quad (29)$$

$$\gamma_n' = \gamma_n \left[\left(\frac{1}{\lambda/V_p + h_n} \right) \sin\left(\left(\frac{\lambda}{V_p} + h_n\right)H\right) + \left(\frac{1}{\lambda/V_p - h_n} \right) \sin\left(\left(\frac{\lambda}{V_p} - h_n\right)H\right) \right] \quad (30)$$

$$\gamma_n'' = \gamma_n \left[\left(\frac{1}{\lambda/V_p + h_n} \right) \cos\left(\left(\frac{\lambda}{V_p} + h_n\right)H\right) - 1 \right] + \left(\frac{1}{\lambda/V_p - h_n} \right) \cos\left(\left(\frac{\lambda}{V_p} - h_n\right)H\right) - 1 \quad (31)$$

$$\gamma_n = -\frac{2\bar{\rho}\bar{V}(1 + G_c' T_c s) [\bar{q}_n \bar{r}_0 K_2(\bar{q}_n \bar{r}_0) + K_1(\bar{q}_n \bar{r}_0)]}{\bar{r}_0^2 (\bar{h}_n^2 + s^2 T_c^2) \phi_n L_n} \quad (32)$$

上式中令 $R = \frac{k_{bs}}{G_p J_p} H$ ， $A_b = \frac{c_{bs}}{G_p J_p} H$ ， $\bar{\rho} = \rho_s / \rho_p$ ，

$\bar{V} = V_s / V_p$ ， $T_c = H / V_p$ ， $\bar{h}_n = H h_n$ ， $\bar{r}_0 = r_0 / H$ ，

$\lambda' = \lambda T_c$ ， $G_c' = C_c / (G_s T_c)$ ， $\zeta = \omega T_c$ ， $\bar{q}_n = q_n H$ ，由

式(27)可得桩顶扭转角复阻抗理论解

$$K_d = \frac{M(i\omega)}{\Theta(z, i\omega)} = -\frac{G_p J_p \bar{\lambda}'}{H} \cdot \left[\frac{1}{(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma'_n \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma''_n} \right] = -\frac{G_p J_p K'}{H} \quad (33)$$

式中 $\bar{\lambda}^2 = \zeta^2$, 由式(27)亦可得桩顶扭转角频率响应函数

$$H_u = \frac{1}{Z(i\omega)} = -\frac{H}{G_p J_p \bar{\lambda}'} \left[(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma'_n \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma''_n \right] = \frac{H}{G_p J_p} H'_u \quad (34)$$

式中

$$H'_u = -\frac{1}{\bar{\lambda}'} \left[(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma'_n \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma''_n \right] \quad (35)$$

相位差

$$\phi(\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{\text{imag}(H'_u(\omega))}{\text{real}(H'_u(\omega))} \quad (36)$$

由式(27)可得桩顶距圆心 r_1 点的速度频率响应(导纳)函数为

$$H_v(i\omega) = \frac{i\omega r_1}{z(i\omega)} = -\frac{H r_1}{G_p J_p \bar{\lambda}'} \cdot \left[(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{N=1}^{\infty} \gamma'_n \right) - \sum_{N=1}^{\infty} \gamma''_n \right] = -\frac{H r_1}{G_p J_p \bar{\lambda}'} H'_v \quad (37)$$

$$H'_v = \left[(D_1/D_2) \left(1 + \sum_{N=1}^{\infty} \gamma'_n \right) - \sum_{N=1}^{\infty} \gamma''_n \right] \quad (38)$$

3 桩土耦合扭转振动特性分析

基于以上研究,即可求解分析任意不同激振扭矩作用下桩土耦合扭转振动频域特性,下面本文对桩土耦合作用时桩土各参数对桩顶响应的影响进行了特性分析,并重点讨论了粘性阻尼的影响,校验了平面应变解求解桩顶复刚度的精度。图中坐标符号 ζ 、 H'_v 、 K' 含义见前,计算中土与桩材料密度比取为 0.7,其它参数取值在图中给出。

3.1 波速比、长径比对桩顶频域响应的影响

图 4、图 5 反映了波速比 V_s/V_p 以及长径比 H/r_0 对桩顶复刚度的影响,从图可以看出,波速比和长径比对桩顶复刚度有显著影响,随着波速比和长径比的增大,低频段,复刚度的刚度部分也增大,且刚度和阻尼部分的振荡幅值有明显下降趋势,高频区这种现象更加明显。

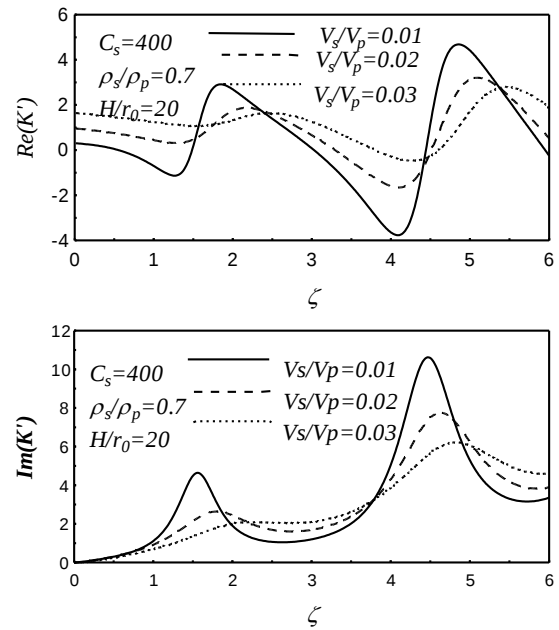


图 4 波速比对桩顶复刚度的影响

Fig.4 Variations of complex stiffness at pile head with frequency and wave velocity ratio

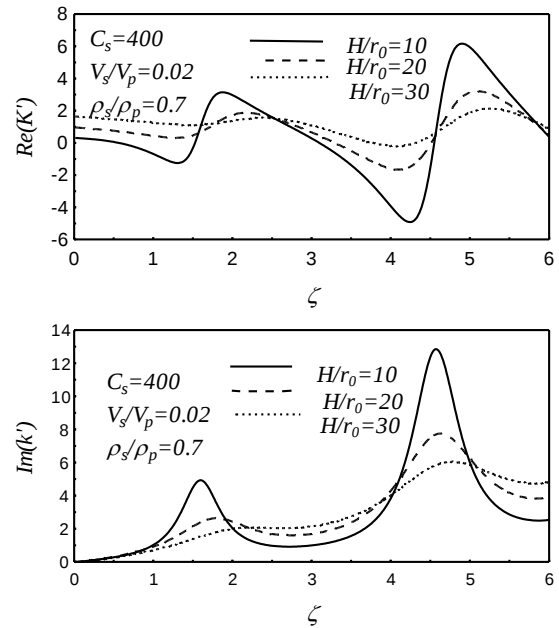


图 5 长径比对桩顶复刚度的影响

Fig.5 Variations of complex stiffness at pile head with frequency and slenderness ratio

图 6、图 7 分别反映了桩土长径比、波速比对桩顶速度频域响应曲线的影响。从图中可以看出,导纳曲线共振峰受这两个参数显著影响。随着长径比和波速比的增加,导纳曲线共振峰明显减小,趋势平缓,试算表明,当增大长径比或波速比到无穷大,导纳曲线从第一共振峰位置起,全部衰减变成一条水平的直线,其值基本等于 1。同样也可以看到,随着波速比的增加,桩土体系的扭转动刚度逐

渐增加。

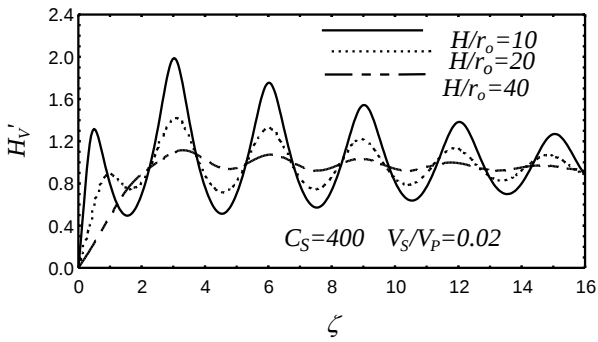


图 6 长径比对桩顶导纳响应曲线的影响

Fig.6 Variations of velocity admittance with frequency and slenderness ratio

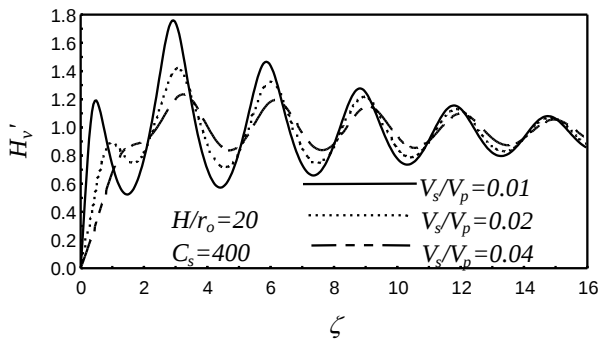


图 7 波速比对桩顶导纳响应曲线的影响

Fig.7 Variations of velocity admittance with frequency and wave velocity ratio

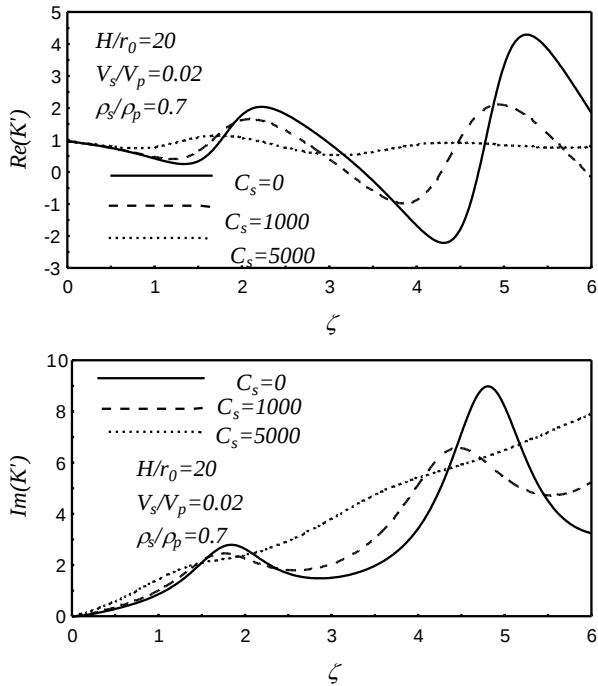


图 8 桩侧土阻尼对桩顶复刚度的影响

Fig.8 Variations of complex stiffness at pile head with frequency and soil material damping

3.2 桩侧土阻尼对桩顶响应的影响

图 8 反映了桩侧土粘性阻尼对桩顶复刚度的影响, 可以看到桩侧土阻尼在高频段对桩顶复刚度有明显的影响, 且随激振频率增长影响程度增大。随着激振频率的增长, 桩侧粘性阻尼有衰减桩顶刚度幅值的特点, 随着粘性阻尼和激振频率的增大, 粘性阻尼的影响增大, 桩土体系的共振频率降低。

图 9 反映了桩侧土粘性阻尼因子对速度导纳曲线的影响。由图可见, 桩侧土粘性阻尼明显影响导纳曲线共振幅值, 随桩侧土粘性阻尼的增加, 导纳曲线共振幅值越来越小。值得注意的是, 在考虑桩侧土粘性阻尼的情况下, 随着激振频率的增加, 共振峰值或导纳曲线的振荡程度呈明显地衰减趋势, 而且随着桩侧土粘性阻尼的增加, 导纳曲线振荡相位亦改变, 而在采用滞回阻尼土模型或不考虑土材料阻尼的研究中, 则不能反映这两种现象。

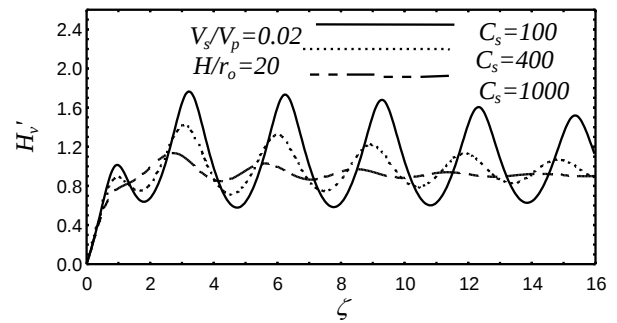


图 9 桩侧土粘性阻尼对桩顶速度导纳响应曲线影响

Fig.9 Variations of velocity admittance with frequency and soil material damping

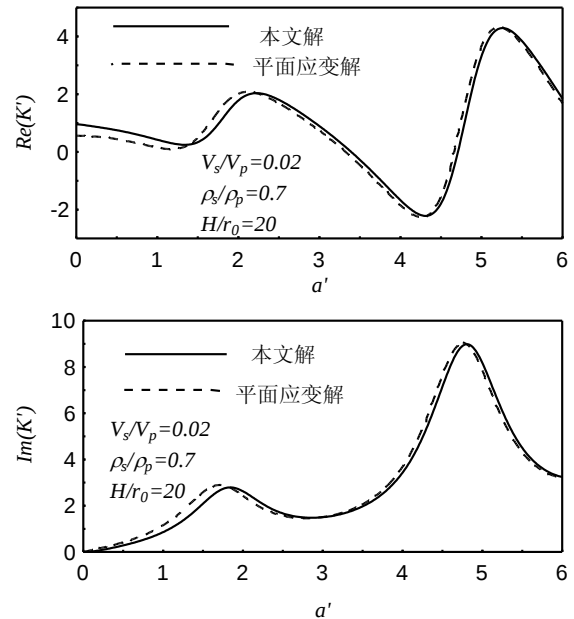


图 10 本文解与平面应变解的对比

Fig.10 Comparison of complex stiffness at pile head

3.3 与平面应变解对比分析

为校验基于平面应变假定解在求解桩顶扭转复刚度的精确性。图 10 将本文解与平面应变解进行了对比,通过对比可以发现,在高频段两解基本一致,而在低频区域,也正是桩基抗震设计敏感频率区域,由于没有考虑竖向应力梯度的变化,平面应变解低估了刚度而高估了阻尼。

4 结论

(1) 本文从轴对称角度,对任意激励扭矩作用下,桩与均质粘性材料阻尼土耦合扭转振动时的桩顶振动响应频域特性进行了研究,求解得到桩顶各频域响应函数的理论解,为桩基振动理论研究及应用提供了新的理论支持。

(2) 研究表明,桩土耦合振动时,桩周土层扭转动力反应由土的剪切模量、激振频率、长径比和材料阻尼等因素决定。桩顶导纳曲线的幅值受长径比、波速比、桩侧土粘性阻尼、桩底阻尼因子等参数影响,导纳曲线振荡的相位受桩底土刚度、桩侧土粘性阻尼以及桩底土阻尼因子影响。

(3) 与滞回阻尼模型相比,桩侧土的粘性阻尼呈现出明显不同的特点,粘性阻尼对导纳共振峰幅值、桩顶反射波幅值、导纳曲线的相位均有明显影响,尤其是随着激振频率增加,共振峰值或导纳曲线的振荡程度呈明显的衰减趋势。

(4) 将本文解与平面应变解进行了对比,可以发现,在高频段两解基本一致,而在低频区域,也正是桩基抗震设计敏感频率区域,由于没有考虑竖向应力梯度的变化,平面应变解低估了刚度而高估了阻尼。且本文理论解与常规土参数有明确关系,物理意义明确,理论更严格。

(5) 可以看到,土的粘性材料阻尼对桩顶扭转振动响应有着明显的影响,该阻尼系数可以通过室内试验,以及对工程实测曲线的反演来确定得到,但目前有关该系数的研究还很不够,要使理论解实用化,还尚需进一步深入研究其取值范围和特性。

参考文献:

- [1] Novak M, Howell J F. Torsional vibrations of pile foundation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1977, 103: 271~285.
- [2] Milos Novak, Toyooki Nogami, Fakhry Aboul-Ella. Dynamic soil reactions for plane strain case [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1978;

- 104(EM 4): 953~959.
- [3] Militano G, Rajapakse R K N D. Dynamic response of a pile in a multi-layered soil to transient torsional and axial loading [J]. Geotechnique, 1999, 49(1): 91~109.
- [4] Chang D W, Yeh S H. Time-domain wave equation analyses of single piles utilizing transformed radiation damping [J]. Soils and Foundations, JGS, 1999, 39(2): 31~44.
- [5] 王腾, 王奎华, 谢康和. 任意段变截面桩纵向振动的半解析解及应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 654~658.
- Wang Teng, Wang Kuihua, Xie Kanghe. A quasi analytical solution to longitudinal vibration of pile with variable sections and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 654~658. (in Chinese)
- [6] Zeng X, Rajapakse R K N D. Dynamic axial load transfer from elastic bar to poroelastic medium [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1999, 125(9): 1048~1055.
- [7] Mammoon S M, Banerjee P K. Time-domain analysis of dynamically loaded single piles [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1992, 118(1): 140~160.
- [8] Liu W M, Novak M. Dynamic response of single piles embedded in transversely isotropic layered media [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(3): 1239~1257.
- [9] 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 Changbin, Wang Kuihua, Xie Kanghe. 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. (in Chinese)
- [10] 胡昌斌, 王奎华, 谢康和. 考虑桩土耦合作用时弹性支承桩纵向振动特性分析及应用[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 146~154.
- Hu Changbin, Wang Kuihua, Xie Kanghe. Soil-pile interaction in vertical vibration of a pile with elastic bottom boundaries and its applications [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2): 146~154. (in Chinese)
- [11] Lysmer J, Richart FE. Dynamic response of footing to vertical loading [J]. Journal Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, 92(SM1): 65~91.
- [12] 刘东甲, 刘煜洲, 王杰英. 扭转波应用与低应变动力测桩的理论研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 283~287.
- Liu Dongjia, Liu Yuzhou, Wang Jieying. Theoretical study on torsional wave applied in low strain dynamic testing of piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 283~287. (in Chinese)