

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0092-07

基于薄层法的饱和土桩纵向振动研究

刘林超¹, 杨 晓²

(1. 信阳师范学院 土木工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 上海大学 土木工程系, 上海 20072)

摘 要: 在饱和多孔介质理论的基础上, 将桩周土体看作液固饱和两相介质, 借助于 Novak 薄层理论得到了饱和土层的竖向动力阻抗, 研究了饱和土中桩的纵向耦合振动, 并对比分析了采用三维模型和薄层法的结果, 验证了结果的正确性。分析讨论了桩土主要力学参数对饱和土-桩耦合体系动力行为的影响。研究表明, 桩的长径比、桩土模量比等对饱和土桩耦合体系纵向振动的影响相对较大, 而土的黏滞阻尼系数和液固耦合系数的影响相对较小。

关 键 词: 多孔介质; 饱和土; 纵向振动; 动力阻抗; 薄层法

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Study of longitudinal vibrations of pile in saturated soil based on layer method

LIU Lin-chao¹, YANG Xiao²

(1. School of Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on porous medium theory, the longitudinal coupled vibrations of saturated soil-pile is investigated with layer method by regarding soil around of the pile as saturated porous medium. A comparative analysis between the results of the three-dimensional model and Novak layer method is carried out; and validity of the results is shown. The influences of main mechanical parameters of pile and soil on dynamic behaviors of coupled system is analyzed; the results indicate that the length-diameter ratio and modulus ratio of pile and soil have a great effect on dynamic behaviors of the pile in saturated soil; while the influences of damping coefficient and coupling coefficient are smaller.

Key words: porous medium; saturated soil; longitudinal vibrations; dynamic impedance; layer method

1 引 言

目前研究饱和土宏观力学行为的理论主要包括 Biot 理论和混合物理论, 虽然 Biot 理论已成功应用于许多工程领域中, 但研究表明其理论在模型上存在一定的不足^[1]。Biot 理论对力学行为的描述是建立在直观基础上的, 是一种工程描述的方法。描述饱和土较为合理的理论是基于体积分数概念和连续介质混合物公理的多孔介质理论, 借助于体积分数的概念, 材料的一些微观性质可以直接通过宏观性质来进行描述; 同时, 避免了杂交混合物理论中的繁杂公式。另外, 在不需要额外假设的情况下, 一些效应如动力、材料和几何非线性等可以很容易地反映在其数学模型中。

在过去几十年中, 桩-土动力相互作用问题引起了广泛关注, 以往地研究大多将饱和土体视为泊松比接近于 0.5 的单相介质, 不考虑孔隙流体与固相土骨架的相互作用, 与工程实际存在一定的差距。Muki 等^[2]建立了一个严密的数学模型 (虚拟桩模型), 在此基础上研究了单相半空间土体中弹性长桩的静力荷载传递问题。Zeng 等^[3]运用虚拟桩模型和第二类 Fredholm 积分方程, 首次研究了饱和多孔介质中桩的动力问题。Jin 等^[4]研究了饱和土中单桩桩顶承受水平振动荷载的问题。Wang 等^[5]研究了饱和土中弹性桩在竖向荷载作用下桩的阻抗等参量的变化。Orlando Maeso 等^[6]借助于三维边界元模型, 研究了两相饱和土中群桩的动态阻抗问题。张智卿等^[7]研究了在三维轴对称条件下端承桩在饱和土中

收稿日期: 2008-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 10872124/A020601); 上海市重点学科建设项目 (No. Y0103); 上海市自然科学基金 (No. 06ZR14037)。

第一作者简介: 刘林超, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事多孔介质理论、岩土力学、桩基动力学的研究。E-mail: llc109@shu.edu.cn

的扭转耦合振动问题。李强等^[8-9]在 Biot 饱和土理论的基础上,考虑土层及桩的径向运动影响,研究了三维轴对称条件下端承桩在饱和土中的纵向耦合振动问题。然而,由于采用严密的三维模型研究饱和土中桩的振动特性十分繁琐,所以,三维模型不为工程设计人员所接受。因桩-土动力耦合振动机制的复杂性以及连续介质力学模型在数学和力学上的存在较大困难,使得基于平面应变假定的 Novak 平面应变模型及其演化形式得到了广泛的应用。Novak 等在平面应变模型方面进行了较全面地研究,将 Baranov 薄层法加以推广应用到桩的振动分析中,对单桩的各种振动进行了系统的分析。Novak 和 Ella^[10]、Novak 和 Howell^[11]研究了均质黏弹性地基中单桩竖向振动、摇摆振动、水平-摇摆振动和扭转振动等问题。本文采用 Novak 薄层法来推导桩周饱和土的竖向动力阻抗,进而分析饱和土中桩的纵向振动特性。

2 数学模型及假定

设厚度为 h 的饱和多孔各向同性线黏弹性土层中有一直径为 d 的弹性端承桩,如图 1 所示。桩的弹性模量为 E_p , 体积密度为 ρ_b , 桩长为 h , 桩顶作用简谐力 $P(t) = Pe^{i\omega t}$, ω 为激励的频率。为了简化计算,假定桩周土视为饱和多孔介质;桩简化为弹性、等截面的圆柱杆;桩土体系振动为小变形,且完全接触,不发生滑移和脱落;桩的底端简化为刚性基础。

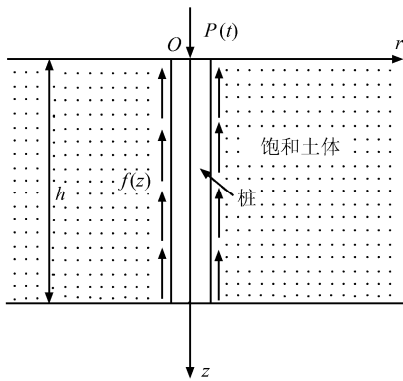


图 1 饱和土-桩相互作用模型

Fig.1 Model of saturated soil-pile interaction

3 饱和土体控制方程

将桩周土视为饱和多孔介质。根据多孔介质理论,饱和土的流固混合物动量方程、孔隙流体动量方程及体积分数方程可分别表示为^[12-13]

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{T}^S + \rho^S (\mathbf{b}^S - \ddot{\mathbf{u}}^S) + \mathbf{p}^S &= 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{T}^L + \rho^L (\mathbf{b}^L - \ddot{\mathbf{u}}^L) + \mathbf{p}^L &= 0 \\ \operatorname{div}(n^S \dot{\mathbf{u}}^S + n^L \dot{\mathbf{u}}^L) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\dot{\mathbf{u}}^i$ 和 $\ddot{\mathbf{u}}^i$ ($i=S, L$) 分别为固相土骨架、流体的速度和加速度矢量; ρ^S 和 ρ^L 为固、流相体积密度; $\mathbf{b}^i$ ($i=S, L$) 为与固、流相相应的外部加速度矢量; n^S 和 n^L 分别为固相和液相的体积分数。相互作用力 $\mathbf{p}^S$ 和 $\mathbf{p}^L$ 与应力张量 $\mathbf{T}^S$ 和 $\mathbf{T}^L$ 的关系可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}^S &= -n^S p \mathbf{I} + \mathbf{T}^{SE}; \mathbf{T}^L = -n^L p \mathbf{I} + \mathbf{T}^{LE} \\ \mathbf{p}^L &= -\mathbf{p}^S = p \operatorname{grad} n^L + \mathbf{p}^{LE} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{T}^S$ 为固相土骨架的有效应力; $\mathbf{p}^{LE}$ 为额外数量; p 为流相的有效孔隙水压力。一般假设 $\mathbf{T}^{LE} = 0$, 体积分数 n^S 和 n^L 满足如下平衡方程:

$$n^S + n^L = 1 \quad (3)$$

由假设土体满足各向同性和小变形,则固相土骨架的有效应力 $\mathbf{T}^{SE}$ 的本构关系可以表示为

$$\mathbf{T}^{SE} = \lambda_0^S (\varepsilon^S \cdot \mathbf{I}) \mathbf{I} + 2\mu_0^S \varepsilon^S \quad (4)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位向量; λ_0^S 、 μ_0^S 为固相土骨架的宏观拉梅常数; $\mu_0^S = n^S G(1 + 2i\xi)$; $\lambda_0^S = \frac{2\nu}{1-2\nu} \mu_0^S$; G 为固相土骨架的剪切模量; ξ 为土骨架的黏滞阻尼系数。固相土骨架的应变张量 ε^S 可以表示为

$$\varepsilon^S = \frac{1}{2} (\operatorname{grad} u^S + \operatorname{grad}^T u^S) \quad (5)$$

另外, $\mathbf{p}^{LE}$ 的分量可以表示为

$$\mathbf{p}_r^{LE} = -s_v \left(\frac{\partial u_r^L}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right); \quad \mathbf{p}_z^{LE} = -s_v \left(\frac{\partial u_z^L}{\partial t} - \frac{\partial u_z^S}{\partial t} \right) \quad (6)$$

式中: s_v 为液固耦合系数,与 Darcy 渗透系数 k^L 有如下关系:

$$s_v = \frac{(n^L)^2 \gamma^{LR}}{k^L} \quad (7)$$

式中: γ^{LR} 为流体的真实相对密度; k^L 为 Darcy 渗透系数。

4 饱和土竖向动力阻抗

当饱和土发生竖向振动时,其侧面的水平薄土层将产生轴对称的竖向振动,如图 2 所示,图中 r 为径向; z 为竖向。由前面的假设知饱和土层满足

Novak 薄层法的假设, 所以可以采用薄层法来计算饱和土层的竖向动力阻抗。为计算方便, 假定桩土体产生纵向位移 u_z^S , 不产生径向和切向位移, 且水平薄层纵向位移 u_z^S 与坐标 z 无关, 即

$$u_r^S = 0; \quad \frac{\partial u_z^S}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

在轴对称情况下, 所有的变量与 r 、 z 、 t 有关, 且应力 $T_{r\theta}^{SE} = 0$, 环向位移 $u_\theta^S = u_\theta^L = 0$, 并认为径向位移 $u_r^S = u_r^L = 0$ 。忽略外部加速度 b^i 的影响, 由式(1)~(6)可得饱和土体薄层在轴对称情况下的控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \mu_0^S \left(\frac{\partial^2 u_z^S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z^S}{\partial r} \right) - \left[\rho^S \frac{\partial^2 u_z^S}{\partial t^2} - s_v \left(\frac{\partial u_z^L}{\partial t} - \frac{\partial u_z^S}{\partial t} \right) \right] &= 0 \\ \rho^L \frac{\partial^2 u_z^S}{\partial t^2} + s_v \left(\frac{\partial u_z^L}{\partial t} - \frac{\partial u_z^S}{\partial t} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在简谐荷载 $P e^{i\omega t}$ 作用下, 考虑稳态振动, 则各参量同样具有 $f = \bar{f} e^{i\omega t}$ 的形式 (此处的 f 和 $\bar{f}$ 代表的量具有这样的形式, 后者为无量纲化后的量), 将其代入式(9)可得

$$\left. \begin{aligned} \mu_0^S \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_z^S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_z^S}{\partial r} \right) - [-\rho^S \omega^2 \bar{u}_z^S - i\omega S_v (\bar{u}_z^L - \bar{u}_z^S)] &= 0 \\ -\rho^L \bar{\omega}^2 \bar{u}_z^S + i\bar{\omega} S_v (\bar{u}_z^L - \bar{u}_z^S) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: S_v 为动态刚度因子。

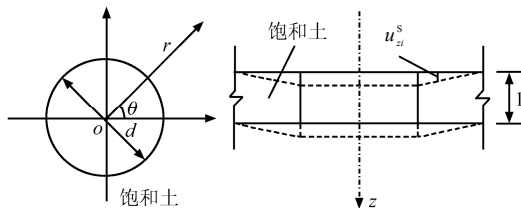


图2 薄层竖向振动示意图

Fig.2 Sketch map of vertical vibration of thin layer

对饱和土薄层的控制方程式(10)进行无量纲化, 令 $\bar{r} = \frac{r}{d}$, $\bar{z} = \frac{z}{d}$, $S_v = \frac{ds_v}{v_s \rho^S}$, $\bar{\omega} = \frac{d\omega}{v_s}$,

$\bar{\rho} = \frac{\rho^S}{\rho^L}$, $v_s = \sqrt{G/\rho^S}$, 经整理可得

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_z^S}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{u}_z^S}{\partial \bar{r}} - q^2 \bar{u}_z^S = 0 \quad (11)$$

式中: $q^2 = \frac{1}{n^S (1 + 2i\xi)} [(i\omega S_v - \omega^2) - i\omega S_v a_1]$, $a_1 =$

$\frac{i\rho S_v}{i\rho S_v - \omega}$, 即为虚宗量贝赛尔方程, 其解为

$$\bar{u}_z^S(\bar{r}) = AK_0(q\bar{r}) + BI_0(q\bar{r}) \quad (12)$$

式中: K_0 、 I_0 分别为第 2 类和第 1 类 0 阶虚宗量贝赛尔函数。

由无穷远处应力和位移为 0 的条件, 可知 $B=0$, 由此可得

$$\bar{u}_z^S(r) = AK_0(q\bar{r}) \quad (13)$$

在水平薄层的圆孔边界, 由于土体与桩基不发生相对的滑移和脱离, 土体在圆孔边界的位移应与桩基的位移相等, 可得

$$u_z^S(r) \Big|_{r=d/2} = e^{i\omega t} \quad (14)$$

由此可得无量纲竖向位移为

$$\bar{u}_z^S(\bar{r}) = K_0(q\bar{r}) / K_0(q/2) \quad (15)$$

在水平薄层圆孔周边处的无量纲剪应力为

$$\bar{T}_{rz}^{SE} \Big|_{\bar{r}=1/2} = -qn^S (1 + 2i\xi) \frac{K_1(q/2)}{K_0(q/2)} \quad (16)$$

式中: n 为固相的体积分数。

这里约定, 在 $\bar{r}=1$ 处单位土层厚度的剪应力的合力为 $Z(q)$, 合力的作用方向与土层运动方向一致时为正, 可得

$$Z(q) = \pi q n^S (1 + 2i\xi) \frac{K_1(q/2)}{K_0(q/2)} = k_z + ic_z \quad (17)$$

其中

$$k_z = \text{Re} \left[\pi q n^S (1 + 2i\xi) \frac{K_1(q/2)}{K_0(q/2)} \right] \quad (18)$$

$$c_z = \text{Im} \left[\pi q n^S (1 + 2i\xi) \frac{K_1(q/2)}{K_0(q/2)} \right] \quad (19)$$

饱和土层的竖向动力阻抗就可通过式(18)和式(19)求得。

5 饱和土中桩的纵向振动求解

对于稳态振动, 桩的竖向位移形式为

$$w_b(z, t) = w_b(z) e^{i\omega t} \quad (20)$$

则均质等截面圆桩无量纲后的振动方程为

$$\frac{d^2 \bar{w}_b(z)}{d\bar{z}^2} - \lambda^2 \bar{w}_b(\bar{z}) = 0 \quad (21)$$

式中: $\lambda^2 = [4(k_z + ic_z) / \pi - \rho_b^* \bar{\omega}^2 / \bar{\rho}] / E_p^*$, $E_p^* = E_p / G$, $\rho_b^* = \rho_b / \rho^L$ 。

相应的无量纲化后的边界条件为

$$\bar{w}_b|_{\bar{z}=\theta} = 0; \quad \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{z}} \bigg|_{\bar{z}=0} = -\frac{\bar{P}(i\omega)}{E_p^*} \quad (22)$$

式中： $\theta = h/d$ 为桩的长径比； $\bar{P}(i\omega) = 4P(i\omega)/G\pi d^2$ 。利用边界条件求解非齐次 2 价微分方程式(21)的通解为

$$\bar{w}_b = \frac{\bar{P}(i\omega)}{E_p^* \lambda (e^{2\lambda\theta} + 1)} e^{\lambda\bar{z}} - \frac{\bar{P}(i\omega) e^{2\lambda\theta}}{E_p^* \lambda (e^{2\lambda\theta} + 1)} e^{-\lambda\bar{z}} \quad (23)$$

由此可得桩顶位移频率响应函数：

$$H_u(i\omega) = \frac{\bar{w}_b(0)}{\bar{F}(0)} = \frac{e^{2\lambda\theta} - 1}{\lambda E_p^* (1 + e^{2\lambda\theta})} \quad (24)$$

式中： $\bar{F}(\bar{z})$ 为桩身任一点的分布力，由桩顶的复刚度的定义可得桩顶复刚度为

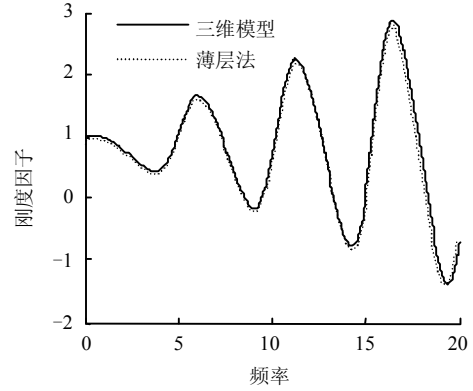
$$K(i\omega) = \frac{\bar{F}(0)}{\bar{w}_b(0)} = \frac{1}{H_u(i\omega)} \quad (25)$$

这里将单位激振力产生的响应称为导纳，桩顶导纳为

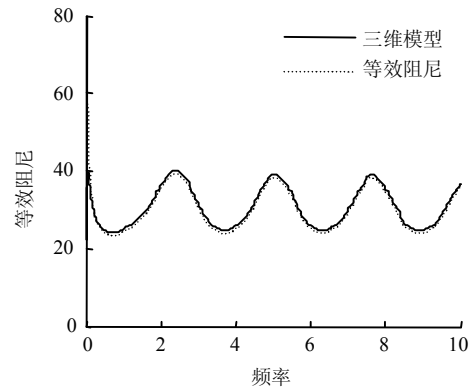
$$|H_u(i\omega)| = |i\omega H_u(i\omega)| \quad (26)$$

6 对比分析

采用桩顶复刚度和桩顶导纳来反映桩的振动特性，这里桩顶复刚度的实部代表桩的动刚度，虚部代表动阻尼。定义动刚度因子为 $\text{Re}K/k_0$ (k_0 为静刚度)，等效阻尼为 $\text{Im}K/\bar{\omega}$ ， $\bar{\omega} = d\omega/v_s$ 为无量纲频率。各无量纲参数取值为： $n^S = 0.67$ ， $n^L = 0.33$ ， $\theta = 20$ ， $\nu = 0.35$ ， $\xi = 0.05$ ， $\bar{S}_v = 0.003$ ， $\bar{\rho} = 2.7$ ， $\bar{\rho}_b = 2.5$ ， $\bar{E}_p = 1000$ 。为了验证采用 Novak 平面应变假定分析饱和土中单桩竖向振动特性的正确性和可行性，与三维模型的结果进行了对比。图 3 和图 4 分别为采用三维模型和薄层法得到的桩顶复刚度和桩顶导纳随无量纲频率 $\bar{\omega}$ 的变化曲线。由图可以看出，采用薄层法得到的桩顶复刚度和桩顶导纳随频率变化曲线和三维情况下得到的曲线几乎完全吻合，由此可见，采用薄层法来分析饱和土中桩的纵向振动问题的结果还是比较精确的，而且便于应用，同时，采用薄层法得到的饱和土的动阻抗可以采用类似 Winkler 弹簧的形式来模拟桩-土之间的相互作用，进而可以研究饱和土中群桩的动态特性以及层状饱和土中桩基的振动特性，而且方法简单，计算量小，便于工程应用。



(a) 动态刚度因子随频率变化曲线



(b) 等效阻尼随频率变化曲线

图 3 三维模型、薄层法桩顶复刚度的对比
Fig.3 Comparison of pile complex stiffness between three-dimensional model and layer method

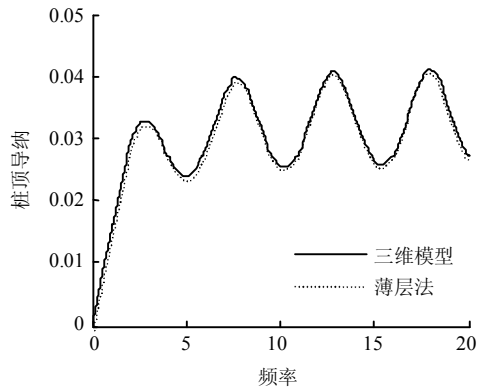


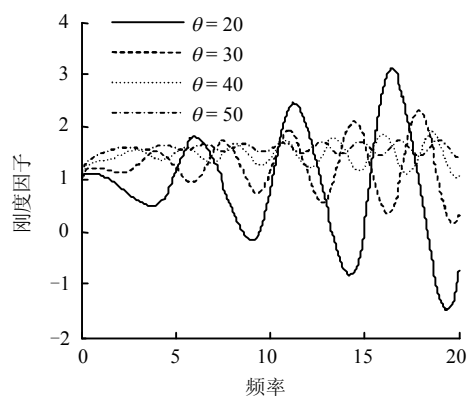
图 4 三维模型、薄层法桩顶导纳的对比
Fig.4 Comparison of pile admittance between three-dimensional model and layer method

7 数值结果与分析

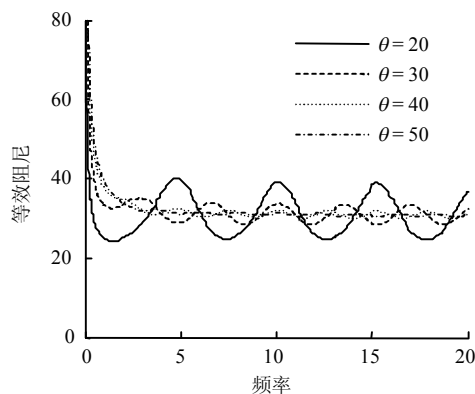
下面研究桩的长径比、饱和土液固耦合系数、黏滞阻尼系数以及桩土模量比等力学参数对饱和土中桩纵向动力学行为的影响。各无量纲参数取值为： $n^S = 0.67$ ， $n^L = 0.33$ ， $\theta = 20$ ， $\nu = 0.35$ ， $\xi = 0.05$ ，

$\bar{S}_v = 0.003$, $\bar{\rho} = 2.7$, $\rho_b^* = 2.5$, $E_p^* = 1\ 000$ 。图 5~8 为长径比、液固耦合系数、黏滞阻尼系数以及桩土模量比对桩顶复刚度的影响曲线。从图中可以看出, 在外界激励的作用下动态刚度因子和等效阻尼会产生共振, 无量纲频率越大, 动态刚度因子的峰值越大, 而等效阻尼的峰值随频率的增大基本上保持恒定。

图 5 为桩的长径比对桩顶复刚度的影响。从图中可以看出, 长径比越大, 动态刚度因子和等效阻尼共振的峰值越小, 而且相邻两个峰值的间隔越小。当长径比增大到一定的程度时 (大约在 $\theta \geq 20$ 时), 长径比对桩顶复刚度的影响很小, 当桩长达到一定程度, 再增加桩长对桩-土体系动态特性的影响不大。图 6、7 分别为液固耦合系数和黏滞阻尼系数对桩顶复刚度的影响曲线。从图中可以看出, 液固耦合系数和黏滞阻尼系数对桩的复刚度的影响太明显, 但不应被忽略。图 8 为桩土模量比对桩顶动态刚度和等效阻尼的影响, 桩土模量比越大, 复刚度的共振幅值及其所对应的固有频率越大。可见硬土地基中桩的抗震效果要比软土地基好。



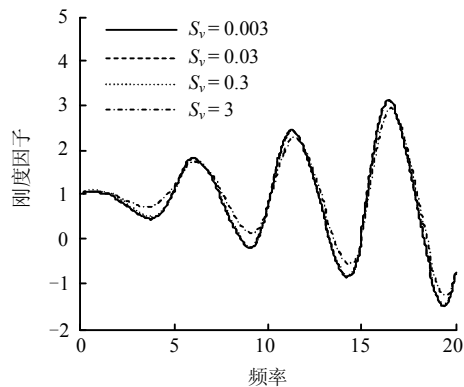
(a) 动态刚度因子随频率变化曲线



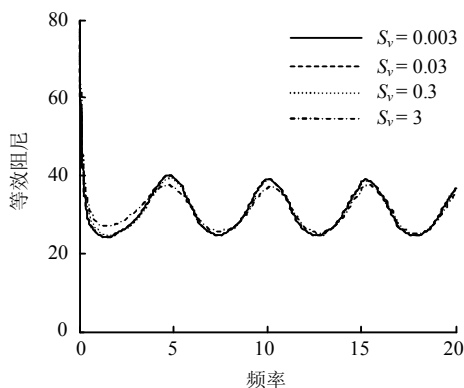
(b) 等效阻尼随频率变化曲线

图 5 长径比对复刚度的影响

Fig.5 Influence of length-diameter ratio on complex stiffness



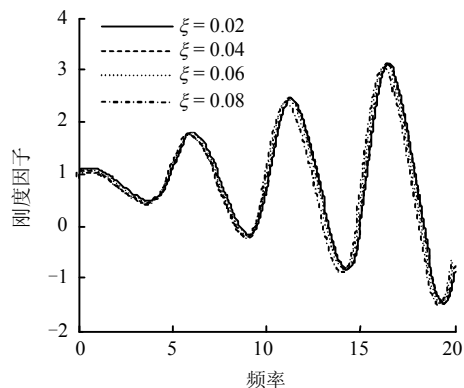
(a) 动态刚度因子随频率变化曲线



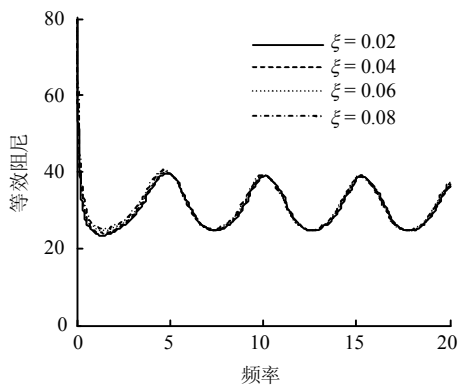
(b) 等效阻尼随频率变化曲线

图 6 液固耦合系数对复刚度的影响

Fig.6 Influence of coupling coefficient on complex stiffness



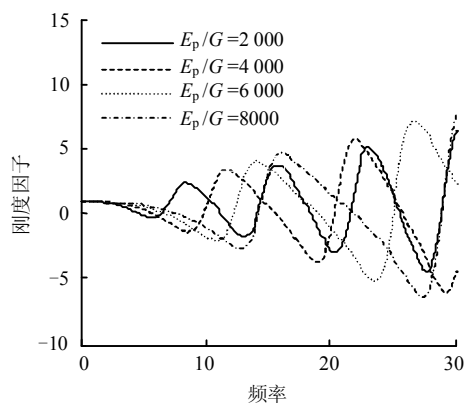
(a) 动态刚度因子随频率变化曲线



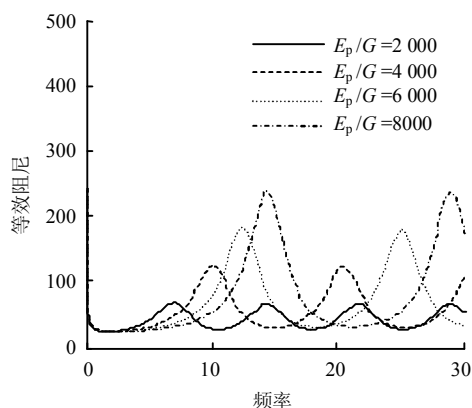
(b) 等效阻尼随频率变化曲线

图 7 黏滞阻尼系数对复刚度的影响

Fig.7 Influence of damping coefficient on complex stiffness



(a) 动态刚度因子随频率变化曲线



(b) 等效阻尼随频率变化曲线

图 8 桩土模量比对复刚度的影响

Fig.8 Influence of modulus ratio of pile and soil on complex stiffness

图 9 反映出长径比对桩顶导纳的影响。可以看出, 长径比较小时对桩顶导纳的影响比较大, 长径比越大, 桩顶导纳的峰值越小, 且发生共振的间隔越小。对于不同的长径比峰值基本上为一恒定值。饱和土体液固耦合系数和黏滞阻尼系数对桩顶导纳的影响如图 10、11 所示, 液固耦合系数和黏滞阻尼系数对桩顶导纳的影响也很小。桩土模量比越大, 桩顶导纳的峰值越小, 所对应的固有频率越大。

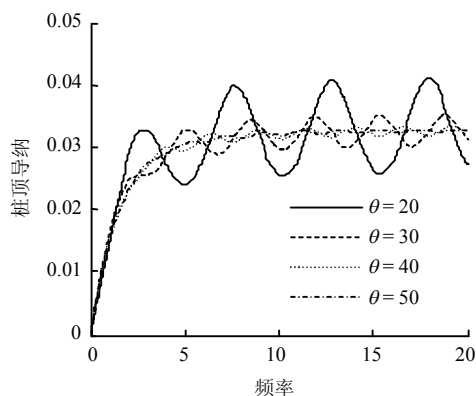


图 9 长径比比对桩顶导纳的影响

Fig.9 Influence of length-diameter ratio on pile admittance

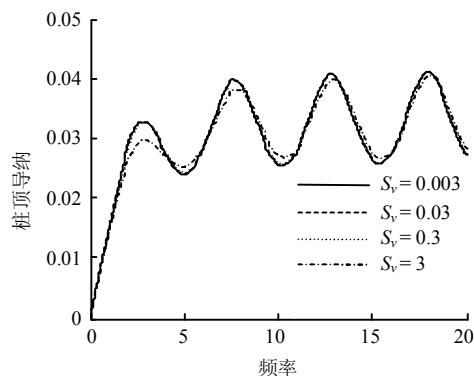


图 10 液固耦合系数对桩顶导纳的影响

Fig.10 Influence of coupling coefficient on pile admittance

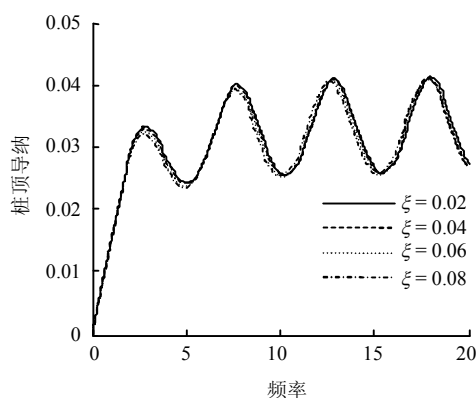


图 11 黏滞阻尼系数对桩顶导纳的影响

Fig.11 Influence of damping coefficient on pile admittance

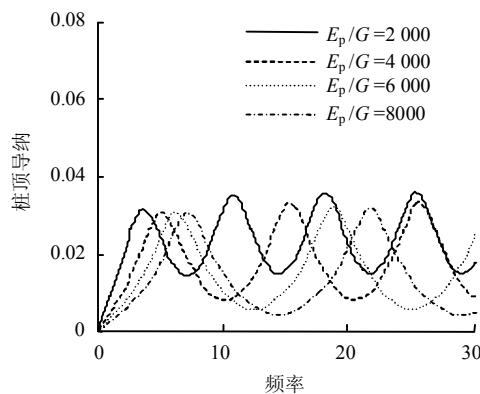


图 12 桩土模量比对桩顶导纳的影响

Fig.12 Influence of modulus ratio of pile and soil on pile admittance

8 结 语

将土体看作饱和多孔介质, 利用 Novak 薄层理论, 得到了饱和土层竖向动力阻抗的近似表达式, 研究分析了饱和土中桩的纵向耦合振动。通过对比分析三维模型和薄层法 3 种方法的结果可以发现, 采用薄层法得到的数值结果与采用较严密的三维模型的结果十分吻合。采用较简单的薄层法来分析饱和土中桩的纵向振动问题, 不会带来很大的误差,

而且薄层法方法简单,易于用于工程实际。研究表明,桩的长径比、土的黏滞阻尼系数、桩土模量比等力学参数对饱和土桩耦合体系纵向振动的影响相对较大,而黏滞阻尼系数和液固耦合系数的影响相对较小。

参考文献

- [1] EDELMAN I, WILMANSKI K. Asymptotic analysis of surface waves at vacuum/porous medium and liquid/porous medium interfaces[J]. **Continuum Mechanics and Thermodynamics**, 2002, 14: 25—44.
- [2] MUKI R, STERNBERG E. Elastostatic load transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1970, 16: 69—90.
- [3] ZENG X, RAJAPAKSE RKND. Dynamic axial load transfer from elastic bar to poroelastic medium[J]. **Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE**, 1999, 125(9): 1048—55.
- [4] JIN B, ZHOU D, ZHONG Z. Lateral dynamic compliance of pile embedded in poroelastic half space[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2001, 21: 519—525.
- [5] WANG JH, ZHOU XL, LU JF. Dynamic response of pile groups embedded in a poroelastic medium[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23: 235—242.
- [6] ORLANDO MAESO, JUAN J, AZNAREZ, et al. Dyanmic impedances of piles and groups of piles in saturated soils[J]. **Computers & Structures**, 2005, 83: 769—782.
- [7] 张智卿, 王奎华, 谢康和. 饱和土层中桩的扭转振动响应分析[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2006, 40(7): 1211—1218.
ZHANG Zhi-qing, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Study on torsional vibration of pile embedded in saturated soil[J]. **Journal of Zhejiang University(Engineering Science)**, 2006, 40(7): 1211—1218.
- [8] 李强, 王奎华, 谢康和. 饱和土桩纵向振动引起土层复阻抗分析研究[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(5): 679—683.
LI Qing, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Study on resistance factor of saturated soil caused by longitudinal vibration of pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(5): 679—683.
- [9] 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 Qing, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Vertical vibration of an end bearing pile embedded in saturated soil[J]. **Acta Mechanical Sinica**, 2004, 36(4): 435—442.
- [10] NOVAK M, ABOUL-ELLA F. Impedance functions of piles in layered media[J]. **Journal of Engineering Mechanical Division**, 1978, 104(3): 643—661.
- [11] NOVAK M, HOWELL J F. Dynamic response of pile foundation in torsion vibration[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1977, 103(2): 271—285.
- [12] BOER R DE. Theory of porous media: Highlights in the historical development and current state [M]. New York: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [13] DE BOER, LIU R Z. Propagation of acceleration waves in incompressible saturated porous solids[J]. **Transport in Porous Media**, 1994, 21: 163—173.

上接第91页

- [3] 郭莹, 张小玲, 栾茂田, 等. 初始中主应力系数对中密粉煤灰动模量阻尼比影响的实验研究[J]. **岩土力学**, 2008, 29(3): 591—595.
GUO Ying, ZHANG Xiao-ling, LUAN Mao-tian, et al. Experimental study of effect of initial intermediate principal stress coefficient on dynamic shear modulus and damping ratio of medium-dense fly ash[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 591—595.
- [4] 蔡袁强, 王军, 徐长节. 初始偏应力作用对萧山软黏土动弹模量与阻尼影响实验研究[J]. **岩土力学**, 2007, 28(11): 2291—2296.
CAI Yuan-qiang, WANG Jun, XU Chang-jie. Experimental study of dynamic elastic modulus and damping ratio of Xiaoshan saturated soft clay considering initial deviator stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2291—2296.
- [5] 付磊, 王洪瑾, 周景星. 主应力偏角对砂砾料动力特性影响的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(4): 435—440.
FU Lei, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Effect of the initial rotation angle of principal stress on the dynamic properties of soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(4): 435—440.
- [6] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [7] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.
- [8] 郭莹. 复杂应力条件下饱和松砂的不排水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [9] 王洪瑾, 马奇国, 周景星, 等. 土在复杂应力状态下的动力特性研究[J]. **水利学报**, 1996, (4): 57—64.
WANG Hong-jin, MA Qi-guo, ZHOU Jing-xing, et al. A study of dynamic Characteristics of soil in complex stress state[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (4): 57—64.
- [10] 许顺成. 复杂应力条件下饱和砂土剪切特性及本构模型的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.