

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0139-06

饱和土中单桩复合地基上块体的速度导纳特性分析

宋春雨, 陈龙珠, 王国才

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘 要: 根据饱和土弹性波动方程, 建立了饱和地基轴对称竖向振动问题的一种有限元-无限元耦合解法并编制了计算程序, 其精度应用 Lamb 问题的理论解来进行检验。参数分析结果表明, 地基土的渗透性对单桩复合地基上块体竖向振动速度导纳的低频特性及共振频率影响甚微, 但会使高频下的速度导纳幅值有所增大。该方法对饱和土中单桩复合地基动测技术的研究与应用具有一定的理论指导作用。

关 键 词: 饱和土; 复合地基; 块体; 导纳; 有限元-无限元耦合解

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Analysis of velocity admittance properties of block on saturated composite foundation with single pile

SONG Chun-yu, CHEN Long-zhu, WANG Guo-cai

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the dynamic governing equations of elastic waves, a hybrid finite-infinite element method is proposed for analyzing axisymmetrically vertical vibration of saturated media. Using the compiled program, the surface vertical displacements of the air-saturated ground (dry soil) are calculated under a surface point excitation, which are agree well with the theoretical solutions of the Lamb's problem. The velocity admittance curves of block on single-piled composite foundations in saturated soil with varied permeability are calculated with the conclusions that the soil permeability will have few effects on the velocity admittances of block at low frequencies and on the resonant frequency, while the velocity admittances of block at high frequencies will increase with increasing permeability coefficient of soil. The conclusion will be of guide significance on further research of dynamic test method for engineering parameters of composite foundations in saturated soil.

Key words: saturated soil; composite foundation; block; admittance; hybrid finite-infinite element method

1 引 言

随着复合地基的应用越来越广泛, 对其实际工程质量的检测就显得越来越重要。目前对复合地基检测的主要方法包括静载试验、标准贯入试验、钻孔取芯和静力触探试验等, 其中静载试验因被技术规范规定为评定地基承载力的基本方法而被普遍采用。但该法耗时、耗资, 且属于破坏性试验, 所以抽样率不高, 继而限制了在工程普检中的应用。因此, 工程技术人员努力探索新的检测方法。因由水泥搅拌桩、碎石桩等柔性桩组成的复合地基具有几何和物理意义上的不均匀性, 使得人们想套用基于

一维弹性杆件振动理论的弹性波反射法等混凝土刚性桩中使用的无损检测技术难以取得很好的效果。为克服这种非平面效应, 并使桩-土在检测过程中象静载试验时那样能够共同工作, 用块体共振法、附加质量法检测柔性桩复合地基技术应运而生, 并显示出良好的应用前景^[1, 2]。

对地基上块体振动特性的研究属于动力无限域问题, 这类问题一般较为复杂, 且因难以获得解析解而需采用数值方法进行分析。目前最常用的数值方法是有限单元法。采用有限元方法分析静力学问题时, 通常认为只要有限元区域取得足够大, 就可以将远场对分析结果的影响忽略不计。但是, 对

收稿日期: 2005-03-24

基金项目: 国家自然科学基金会资助项目 (No.50079027)。

作者简介: 宋春雨, 女, 1973 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事土动力学, 城市安全与防灾领域的科研和教学工作。

于动力学问题来说, 振动或波能在介质阻抗变化处会发生反射和散射效应, 当用有限元模型来模拟无限域课题时, 人为边界的影响将会对计算结果导致不可忽视的误差, 对稳态振动问题尤其如此。因此, 为能用有限元法来分析动力学课题, 许多学者已经较为深入地研究了有限元边界或其外侧无限域的影响问题^[3-7], 并由此提出了人工边界法、边界元法、无限元法等。在这些方法中, 无限元法已被认为是模拟无限域或避免人为边界影响的有效方法之一。采用有限元-无限元耦合解法就是将近、远域地基分别用有限元和无限元来模拟, 从而在保证计算精度的前提下, 可以大大地缩减计算工作量。

笔者曾应用单相介质的轴对称有限元-无限元耦合模型分析了单桩复合地基上块体的竖向振动特性^[8]。然而, 在实际工程中经常会遇到饱和土地基在块体顶面的激振力作用下, 地基土的渗透性不同, 可能会对块体的振动特性产生影响。

本文将结合研究检测饱和土中单桩复合地基特性的块体振动试验原理, 从饱和土弹性波动方程出发, 采用变分原理先推导出饱和地基轴对称有限元的计算公式, 然后参照波的传播理论推导考虑远域影响的一组无限元及其计算公式, 从而建立一种求解饱和地基轴对称问题动力响应的有限元-无限元耦合解法, 并由此编制计算机程序。当将孔隙水当成空气, 饱和地基就可分别退化成单相介质(气饱和地基), 对此进行计算并与单相介质 Lamb 问题的理论解进行比较, 以验证程序的正确性。应用此程序计算了饱和单桩复合地基上块体的速度导纳, 探讨了地基土渗透系数对块体导纳特性的影响。

2 轴对称半无限饱和地基动力响应的基本原理及公式

根据 Biot 理论^[9, 10], 饱和土在圆柱坐标下的基本运动方程为

$$\mu \nabla^2 u_r + (\lambda_c + \mu) \frac{\partial e}{\partial r} - \mu \frac{u_r}{r^2} - \alpha M \frac{\partial \xi}{\partial r} = \rho \ddot{u}_r + \rho_f \ddot{w}_r \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 u_z + (\lambda_c + \mu) \frac{\partial e}{\partial z} - \alpha M \frac{\partial \xi}{\partial z} = \rho \ddot{u}_z + \rho_f \ddot{w}_z \quad (2)$$

$$\alpha M \frac{\partial e}{\partial r} - M \frac{\partial \xi}{\partial r} = \rho_f \ddot{u}_r + m \ddot{w}_r + b \dot{w}_r \quad (3)$$

$$\alpha M \frac{\partial e}{\partial z} - M \frac{\partial \xi}{\partial z} = \rho_f \ddot{u}_z + m \ddot{w}_z + b \dot{w}_z \quad (4)$$

式中 u_r 、 u_z 分别为土骨架的径向和切向位移; w_r 、 w_z 分别为孔隙流体的径向和切向位移; λ 、 μ 是土骨架的 Lamé 常数; α 、 M 为表征土颗粒和孔隙流

体压缩性的常数; n 为土体的孔隙率。 $\lambda_c = \lambda + \alpha^2 M$,

$$b = \eta / k, \quad m = \frac{\rho_f}{n}, \quad \rho = n \rho_f + (1 - n) \rho_s,$$

$$e = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \xi = -\left(\frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} + \frac{\partial w_z}{\partial z}\right).$$

这里, η 为流体的黏滞系数; k 为土体的渗透系数; ρ_f 、 ρ_s 分别为流体和土颗粒的质量密度。

土体的应力-位移关系为

$$\sigma_r = \lambda e + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} - \alpha p_f \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \lambda e + 2\mu \frac{u_r}{r} - \alpha p_f \quad (6)$$

$$\sigma_z = \lambda e + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} - \alpha p_f \quad (7)$$

$$\tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (8)$$

其中, 孔隙流体压力 p_f 可表示为

$$p_f = -\alpha M e + M \xi \quad (9)$$

3 饱和地基轴对称动力问题的有限元-无限元耦合解

3.1 有限元

为求得轴对称动力问题的数值解答, 先将饱和地基按图 1 所示方式进行离散。考虑简谐振动, 对式 (1)~(4) 采用变分原理, 可得到有限元区域的动力平衡方程:

$$\sum_{e=1}^m [S_I]^e \{\delta_I\}^e = \sum_{e=1}^m \{F_I\}^e \quad (10)$$

$$\{\delta_I\}^e = \begin{Bmatrix} u_r \\ u_z \\ w_r \\ w_z \end{Bmatrix}, \quad \{F_I\}^e = \begin{Bmatrix} F_{urI} \\ F_{uzI} \\ F_{wrI} \\ F_{wzI} \end{Bmatrix}$$

$$[S_{IJ}]^e = \begin{bmatrix} S_{IJ}^1 & S_{IJ}^2 & S_{IJ}^3 & S_{IJ}^4 \\ & S_{IJ}^5 & (S_{IJ}^4)^T & S_{IJ}^6 \\ \text{对} & & S_{IJ}^7 & S_{IJ}^8 \\ \text{称} & & & S_{IJ}^9 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\{\delta\}^e$ 、 $\{F\}^e$ 分别称为单元的节点位移和荷载列阵; $[S_{IJ}]^e$ 称为单元的动弹性矩阵, 其元素分别为

$$S_{IJ}^1 = 2\pi \int_{\Omega} \left[(\lambda_c + 2\mu) \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial r} + \lambda_c \frac{1}{r} \frac{\partial N_I}{\partial r} N_J + \lambda_c \frac{1}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial r} + \mu \frac{\partial N_I}{\partial z} \frac{\partial N_J}{\partial z} + (\lambda_c + 2\mu) \frac{1}{r^2} N_I N_J - \rho \omega^2 N_I N_J \right] r dr dz$$

(12)

$$S_{IJ}^2 = 2\pi \int_{\Omega} \left[\lambda_c \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial z} + \mu \frac{\partial N_I}{\partial z} \frac{\partial N_J}{\partial r} + \lambda_c \frac{2}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial z} \right] r dr dz \quad (13)$$

$$S_{IJ}^3 = 2\pi \int_{\Omega} \left[\alpha M \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial r} + \alpha M \frac{1}{r} \frac{\partial N_I}{\partial r} N_J + \alpha M \frac{1}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial r} + \alpha M \frac{1}{r^2} N_I N_J - \rho_f \omega^2 N_I N_J \right] r dr dz \quad (14)$$

$$S_{IJ}^4 = 2\pi \int_{\Omega} \left[\alpha M \frac{1}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial z} + \alpha M \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial z} \right] r dr dz \quad (15)$$

$$S_{IJ}^5 = 2\pi \int_{\Omega} \left[(\lambda_c + 2\mu) \frac{\partial N_I}{\partial z} \frac{\partial N_J}{\partial z} + \mu \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial r} - \rho \omega^2 N_I N_J \right] r dr dz \quad (16)$$

$$S_{IJ}^6 = 2\pi \int_{\Omega} \left[\alpha M \frac{\partial N_I}{\partial z} \frac{\partial N_J}{\partial z} - \rho_f \omega^2 N_I N_J \right] r dr dz \quad (17)$$

$$S_{IJ}^7 = 2\pi \int_{\Omega} \left[M \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial r} + 2M \frac{1}{r^2} N_I N_J + 2M \frac{1}{r} \frac{\partial N_I}{\partial r} N_J + 2M \frac{1}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial r} - m \omega^2 N_I N_J + i b \omega N_I N_J \right] r dr dz \quad (18)$$

$$S_{IJ}^8 = 2\pi \int_{\Omega} \left[M \frac{\partial N_I}{\partial r} \frac{\partial N_J}{\partial z} + M \frac{1}{r} N_I \frac{\partial N_J}{\partial z} \right] r dr dz \quad (19)$$

$$S_{IJ}^9 = 2\pi \int_{\Omega} \left[M \frac{\partial N_I}{\partial z} \frac{\partial N_J}{\partial z} - m \omega^2 N_I N_J + i b \omega N_I N_J \right] r dr dz \quad (20)$$

$$F_{wrl} = \int_{\Gamma} N_I T_r d\Gamma + \int_{\Gamma} N_I T_z d\Gamma \quad (21)$$

$$F_{wzl} = \int_{\Gamma} N_I T_z d\Gamma + \int_{\Gamma} N_I T_{rz} d\Gamma \quad (22)$$

$$F_{wrl} = 2\pi \int_{\Gamma} N_I p_f n_r d\Gamma \quad (23)$$

$$F_{wzl} = 2\pi \int_{\Gamma} N_I p_f n_z d\Gamma \quad (24)$$

式中 N_I , N_J 分别为节点 I 和 J 的形函数, 它们可以取得一样, 也可以取得不同; $T_r = \sigma_r n_r$, $T_z = \sigma_z n_z$, $T_{rz} = \tau_{rz} n_z$; n_r , n_z 分别为边界外法线与 r , z 夹角的方向余弦。

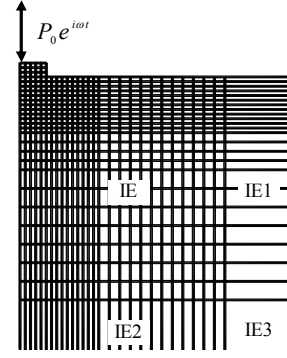
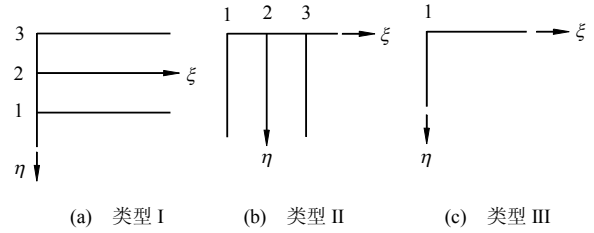


图 1 饱和土地基上块体轴对称振动问题的计算模型

Fig.1 Hybrid finite-infinite element model for analyzing axisymmetrically vertical vibration of block on saturated foundation

3.2 无限元

根据波的传播理论, 对图 1 中不同位置设置 3 种无限单元, 虽位移模式均可按分离变量法的思路来构造, 但其形式是各不相同的。为便于与有限元中拟用的 8 节点等参元相匹配, 无限元采用如图 2 所示的局部坐标系, 分别予以阐述。



(a) 类型 I (b) 类型 II (c) 类型 III

图 2 三种典型的无限单元

Fig.2 Three kinds of typical infinite elements

(1) 第 1 类无限元

这一类单元主要是用来模拟波沿水平方向向匀质无限远处的传播。根据波的传播理论, 其位移模式或形函数可采用如下形式^[5]:

$$N_{u,i} = F_{u_r}(\xi) \varphi_i, \quad N_{u,z,i} = F_{u_z}(\xi) \varphi_i, \quad N_{w_r,i} = F_{w_r}(\xi) \varphi_i, \quad N_{w_z,i} = F_{w_z}(\xi) \varphi_i, \quad i=1 \dots 3 \quad (25)$$

式中 $F_{u_r}(\xi) = F_{w_r}(\xi) = \frac{J_1(k(r_0 + \xi))}{J_1(kr_0)} = H_1$, $F_{u_z}(\xi) = F_{w_z}(\xi) = \frac{J_0(k(r_0 + \xi))}{J_0(kr_0)} = H_2$, $J_1(x)$ 和 $J_0(x)$ 分别是一阶和零阶 Bessel 函数。

$\varphi_1 = \frac{1}{2} \eta(\eta - 1)$, $\varphi_2 = 1 - \eta^2$, $\varphi_3 = \frac{1}{2} \eta(\eta + 1)$; r_0 是对称轴到无限元起点的径向距离。

有了单元位移模式, 无限元的动弹性矩阵容易利用式 (12)~(20) 导出为

$$S_{IJ}^1 = 2\pi [(\lambda_c + 2\mu)\gamma_{IJ}^1 I_1 + 2\lambda_c \gamma_{IJ}^1 I_2 + \mu\gamma_{IJ}^2 I_3 + (\lambda_c + 2\mu)\gamma_{IJ}^1 I_4 - \rho\omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (26)$$

$$S_{IJ}^2 = 2\pi [\lambda_c \gamma_{IJ}^3 I_5 + \mu\gamma_{IJ}^3 I_6 + 2\lambda_c \gamma_{IJ}^3 I_8] \quad (27)$$

$$S_{IJ}^3 = 2\pi [\alpha M \gamma_{IJ}^1 I_1 + 2\alpha M \gamma_{IJ}^1 I_2 + \alpha M \gamma_{IJ}^1 I_4 - \rho_f \omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (28)$$

$$S_{IJ}^4 = 2\pi [\alpha M \gamma_{IJ}^3 I_8 + \alpha M \gamma_{IJ}^3 I_5] \quad (29)$$

$$S_{IJ}^5 = 2\pi [(\lambda_c + 2\mu)\gamma_{IJ}^2 I_7 + \mu\gamma_{IJ}^1 I_9 - \rho\omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (30)$$

$$S_{IJ}^6 = 2\pi [\alpha M \gamma_{IJ}^2 I_7 - \rho_f \omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (31)$$

$$S_{IJ}^7 = 2\pi [M \gamma_{IJ}^1 I_1 + 2M \gamma_{IJ}^1 I_4 + 4M \gamma_{IJ}^1 I_2 - m\omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3 + i b \omega \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (32)$$

$$S_{IJ}^8 = 2\pi [M \gamma_{IJ}^3 I_5 + M \gamma_{IJ}^3 I_8] \quad (33)$$

$$S_{IJ}^9 = 2\pi [M \gamma_{IJ}^2 I_7 - m\omega^2 \gamma_{IJ}^1 I_3 + i b \omega \gamma_{IJ}^1 I_3] \quad (34)$$

式 (26)~(34) 中的系数为

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_1'^2 d\xi, \quad I_2 = \int_0^\infty H_1 H_1' d\xi, \\ I_3 &= \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_1^2 d\xi, \quad I_4 = \int_0^\infty \frac{1}{r_0 + \xi} H_1^2 d\xi, \\ I_5 &= \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_1' H_2 d\xi, \quad I_6 = \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_1 H_2' d\xi, \\ I_7 &= \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_2^2 d\xi, \quad I_8 = \int_0^\infty H_1 H_2 d\xi, \\ I_9 &= \int_0^\infty (r_0 + \xi) H_2'^2 d\xi; \quad [\gamma_{IJ}^1] = \frac{z_3 - z_1}{30} \begin{bmatrix} 4 & 2 & -1 \\ 2 & 16 & 2 \\ -1 & 2 & 4 \end{bmatrix}, \\ [\gamma_{IJ}^2] &= \frac{1}{3(z_3 - z_1)} \begin{bmatrix} 7 & -8 & 1 \\ -8 & 16 & -8 \\ 1 & -8 & 7 \end{bmatrix}, \\ [\gamma_{IJ}^3] &= \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -3 & 4 & -1 \\ -4 & 0 & 4 \\ 1 & -4 & 3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

(2) 第 2 类无限元

这一类无限元主要是用来模拟波沿竖向向匀质无限深处的传播。这里尝试采用指数衰减函数来构造单元位移模式, 即其形函数为

$$\begin{aligned} N_{u_{r,j}} &= e^{-\beta\eta} \varphi_i, \quad N_{u_{z,j}} = e^{-\beta\eta} \varphi_i, \quad N_{w_{r,j}} = e^{-\beta\eta} \varphi_i, \\ N_{w_{z,j}} &= e^{-\beta\eta} \varphi_i, \quad i=1\cdots 3 \end{aligned} \quad (35)$$

式中 $\varphi_1 = \frac{1}{2}\xi(\xi-1)$, $\varphi_2 = 1-\xi^2$, $\varphi_3 = \frac{1}{2}\xi(\xi+1)$;

$\beta = \frac{\alpha}{\lambda_{p_1}} + i \frac{\omega}{V_{p_1}}$, λ_{p_1} 、 V_{p_1} 分别为饱和土中第一 P 波的波长和波速, 而 α 为经验系数 (在单相介质中可取 3~10)。

有了这类无限元的形函数, 其动弹性矩阵的元素即可容易导出 (为节省篇幅, 此处省去)。

(3) 第 3 类无限元

这一类无限元主要用来同时模拟波沿水平和竖向向匀质中无限远处的传播特性。根据上述两类无限元模式, 在此取其形函数为

$$u_r = e^{-\beta(z-z_0)} H_1 u_{r1}, \quad u_z = e^{-\beta(z-z_0)} H_2 u_{z1},$$

$$w_r = e^{-\beta(z-z_0)} H_1 w_{r1}, \quad w_z = e^{-\beta(z-z_0)} H_2 w_{z1} \quad (36)$$

与第 1 类无限元类似, 可以导出第 3 类无限元的动弹性矩阵。

4 计算方法的验证

对上面推导出的饱和地基轴对称动力问题有限元-无限元耦合解的基本公式, 本文用 FORTRAN 语言编制了计算程序。为了验证本文计算方法及编制程序的正确性和计算精度, 现以饱和地基可蜕化成单相地基的特殊情况为例进行计算, 并将其结果与单相匀质弹性地基表面在竖向简谐集中力作用下的 Lamb 解答^[11]做比较分析。

令孔隙流体参数 $M = \rho_f = 0$, 这样饱和土就近似蜕化为气饱和土或干土, 饱和地基问题将可当成与土骨架特性相同的单相弹性地基。在计算中, 土骨架参数取为: 土颗粒质量密度 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$, 孔隙率 $n = 0.375$, 剪切模量 $G = 1.7 \times 10^7 \text{ Pa}$, 泊松比 $\nu_s = 0.25$ 。计算了地表离振源 $r = 0.1 \text{ m}$ 处的竖向位移随振动频率的变化关系, 其结果如图 4 所示。由图可见, 该处位移实部和虚部的数值解和理论解吻合很好。

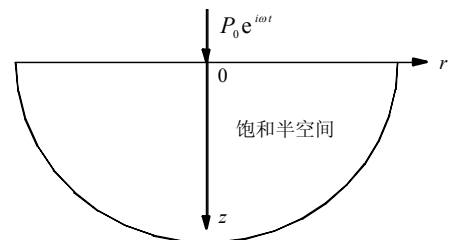


图 3 竖向集中简谐力作用于匀质饱和地基表面
Fig.3 A harmonic vertical force applied on the surface of saturated foundation

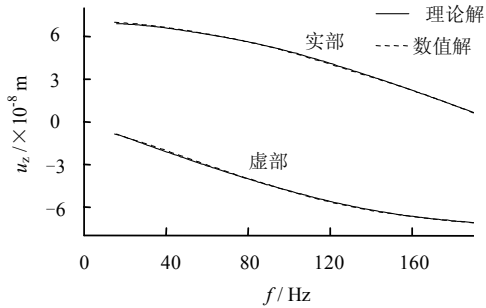


图4 气饱和地基竖向位移数值解与理论解 ($\nu_s = 0.25$) 随振动频率的变化

Fig.4 Numerical and analytical solutions of vertical displacements of dry saturated media vs vibration frequency ($\nu_s = 0.25$)

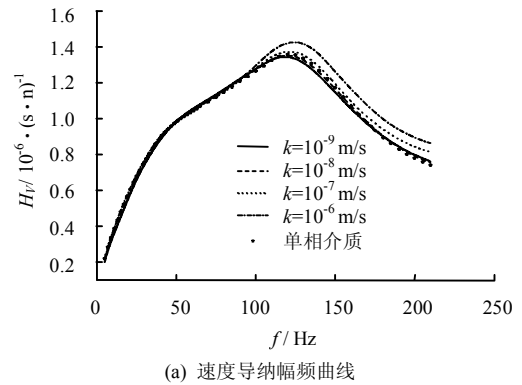
5 地基土渗透系数对单桩复合地基上块体导纳特性的影响

本文应用上述计算程序计算了单桩复合地基上块体的竖向振动导纳。取块体半径 $R = 0.5$ m, 厚度 $h = 0.3$ m, 弹性模量 $E_b = 3 \times 10^{10}$ Pa (相当于 C25 混凝土), 泊松比 $\nu_b = 0.167$, 密度 $\rho_b = 2.3$ g/cm³; 搅拌桩直径 $D = 0.5$ m, 泊松比 $\nu_p = 0.2$, 弹性模量 $E_p = 3000$ MPa (相当水泥掺合比约为 15%), 密度 $\rho_p = 2.0$ g/cm³, 渗透系数 $k = 10^{-11}$ m/s; 地基土颗粒密度 $\rho_s = 2.65$ g/cm³, 泊松比 $\nu_s = 0.25$, 孔隙率 $n = 0.375$, 剪切模量 $G = 17$ MPa, 固体压缩参数 $\alpha = 0.98$; 孔隙流体密度 $\rho_w = 1.0$ g/cm³, 流体压缩参数 $M = 100$ MPa。有限元网格在块体及柔性桩内的尺寸为 0.1 m, 搅拌桩以下土体内有限元网格在 1.0 l (l 为桩长) 范围内加密, 水平向块体以外 1.5 R 范围内加密, 加密区域以外网格尺寸为 $\lambda/12$ (λ 为土体剪切波长)。计算结果见图 5。

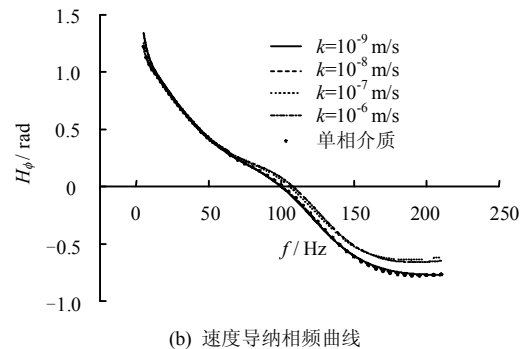
由图 5 可知, 饱和地基土渗透系数的变化对块体速度导纳是有影响的。随着渗透系数的增大, 在接近和超过共振频率时, 块体速度导纳幅值将随之增大; 但渗透系数对低频段导纳幅值以及共振频率的影响较小, 说明低渗透性饱和地基呈现出较高的阻尼特性。图中也给出了泊松比为 0.498 的单相地基的计算结果, 可见它与渗透性很差的饱和地基的曲线相近, 这就再次地验证了本文算法与计算程序的可靠性。

将上例中的水泥搅拌桩改为碎石桩, 并取其弹性模量 $E_b = 1.2 \times 10^9$ Pa, 泊松比 $\nu_b = 0.2$, 质量密度 $\rho_b = 2.0$ g/cm³, 孔隙比 $n = 0.3$, 渗透系数 $k = 10^{-4}$ m/s; 其余有关饱和土和块体的参数不变。由本文方法计算出块体竖向振动速度导纳曲线如图 6 所示, 由此可见, 地基土的渗透系数对碎石桩复合地基上块体

的导纳值影响比水泥搅拌桩的大, 但对共振频率的影响仍然甚小而可忽略不计。

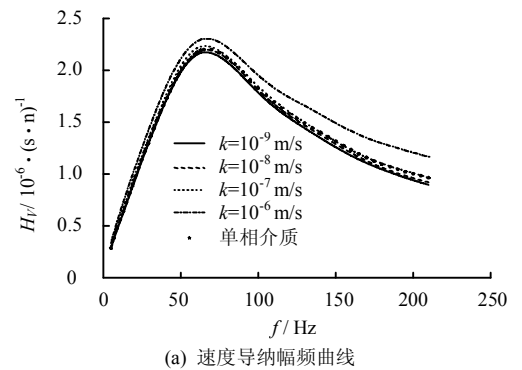


(a) 速度导纳幅频曲线

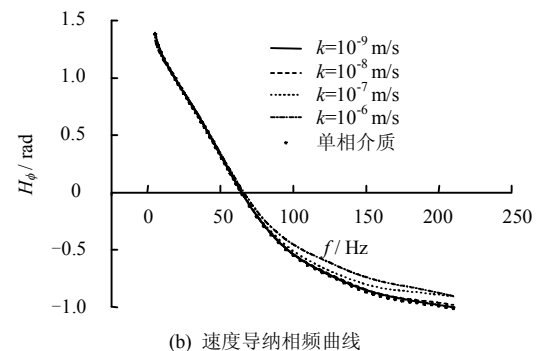


(b) 速度导纳相频曲线

图5 搅拌桩复合地基上块体导纳曲线
Fig.5 Velocity admittance curves of block on cement-soil mixed pile composite foundations in saturated soil



(a) 速度导纳幅频曲线



(b) 速度导纳相频曲线

图6 碎石桩复合地基上块体导纳曲线
Fig.6 Velocity admittance curves of block on saturated sand-gravel filling pile composite foundations

6 结 语

本文根据饱和土波动方程, 利用波的传播特性建立了饱和地基轴对称动力课题的一种有限元-无限元耦合解答, 并编制了计算程序。对饱和地基蜕化为单相介质的算例, Lamb 问题的理论解与其计算结果颇为相符, 说明本文方法及其计算程序的精度令人满意。

对饱和土中单桩复合地基上块体竖向振动速度导纳特性的参数分析表明, 随着土和柔性桩体渗透系数的增大, 块体速度导纳幅值将有所增加, 但其共振频率基本保持不变。

参 考 文 献

- [1] 李丕武. 地基承载力动测的附加质量法[J]. 地球物理学报, 1993, 36(5): 683—687.
LI Pi-wu. Additive mass method measured dynamically foundation bearing capacity[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1993, 36(5): 683—687.
- [2] 徐攸在. 动测技术在复合地基承载力测定中的应用[J]. 工业建筑, 1993, 3(4): 3—5.
XU You-zai. The application of dynamic testing to determining bearing capacity of composite soil foundation[J]. **Industrial Construction**, 1993, 3(4): 3—5.
- [3] Bettess P. Infinite elements[J]. **International Journal of Numerical Method for Engineering**, 1977, 11: 53—64.
- [4] Medina F, et al. Infinite elements for elastodynamics[J]. **Earthquake Engineering and Structure Dynamics**, 1982, 10: 699—709.
- [5] 赵崇斌, 张楚汉, 张光斗. 工程中的无穷元方法及其进展[J]. 陕西机械学院学报, 1989, 5(1): 98—106.
ZHAO Chong-bin, ZHANG Chu-han, ZHANG Guang-dou. Application of infinite method in engineering and its development[J]. **Journal of Shaanxi Institute of Mechanical Engineering**, 1989, 5(1): 98—106.
- [6] 赵崇斌, 张楚汉, 张光斗. 地基无限域的动力模拟: 有限元与无穷元耦合模型[J]. 水利学报, 1990, 21(6): 20—27.
ZHAO Chong-bin, ZHANG Chu-han, ZHANG Guang-dou. Dynamic simulation of infinite foundations[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1990, 21(6): 20—27.
- [7] Khalili N, Yazdchi M, et al. Wave propagation analysis of two-phase saturated porous media using coupled finite-infinite element method[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1999, 18: 533—553.
- [8] 宋春雨, 陈龙珠, 夏宇峰. 单桩复合地基上块体的竖向振动特性[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 134—140.
SONG Chun-yu, CHEN Long-zhu, XIA Yu-feng. Dynamics of block on composite foundation with single pile[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 24(2): 134—140.
- [9] Biot MA. The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid[J]. **The Journal of Acoustical Society of America**, 1956, 28: 168—191.
- [10] Philippacopoulos AJ. Waves in a partially saturated layered half space: analytic formulation[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1987, 77(5): 1 838—1 853.
- [11] 严人觉, 王贻荪, 韩清宇. 动力基础半空间理论概论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.

欢迎订阅 2007 年《岩土力学》

《岩土力学》是全国中文核心期刊、所刊登文章的英文文摘被美国 (Ei) 收录, 本刊同时也是中国科学引文数据库、中国科技论文统计源期刊, 且为《中国期刊网》、《中国学术期刊 (光盘版)》、《万方数据库》、重庆维普全文收录。

本刊为月刊, 大 16 开本, 每期页码为 208 页, 每月 10 日出版, 国内、外公开发行, 同时自办发行。本刊邮发代号: 38-383。每期定价 28 元, 全年定价 336 元。

读者也可以直接在本编辑部订阅, 付款方式有两种:

1. 邮局汇款 地址: 430071 湖北武汉市小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所《岩土力学》编辑部。
收款人: 《岩土力学》编辑部, 请注明 2007 年《岩土力学》刊款。编辑部 E-mail: ytlx@whrsm.ac.cn, 电话: 027-87198484。
2. 银行汇款: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 帐号: 854938010261014328 开户行: 中国建设银行武汉市科学院支行, 注明: 2007 年《岩土力学》刊款。