

分布荷载作用下部分埋入群桩的水平振动研究

程 镇¹, 任 青¹, 吕洪勇², 颜 超³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海金盛隆置地有限公司, 上海 201602; 3. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200433)

摘 要: 首先将成层地基中的部分埋入桩看作成 Winkler 地基上的梁, 采用传递矩阵法来考虑土体的分层情况, 推导出水平分布荷载作用下部分埋入单桩振动公式; 然后在被动桩和周围土体相互作用的基础上建立了部分埋入桩的桩-桩相互作用模型, 通过讨论参数埋入比 L_1/L_2 、桩间距 s/d 和 θ 角对桩-桩相互作用因子的影响, 得到了部分埋入群桩的动力特性模型, 并计算解得群桩的桩身变形以及内力; 结果验证了这些因素对于部分埋入群桩中桩-桩相互作用因子有很大影响, 并且在浅层土中时能量大部分被土体释放, 说明表层土对桩的约束起主要作用, 为工程设计提供了依据。

关键词: 部分埋入群桩; 水平分布荷载; Winkler 地基; 传递矩阵法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0216-07

Study on horizontal vibration of partially embedded pile groups under distributed load

CHENG Zhen¹, Ren Qing¹, LÜ Hongyong², YAN Chao³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Jin Chenglong Real Estate co., Ltd., Shanghai 201602, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Firstly, the calculation model of the partially embedded single pile was deduced based on dynamic Winkler model and transfer-matrix formulation in case of multi-layered soils; and then the pile-pile interaction model models were constructed by assuming interactions between the receiving pile and the surrounding soil. By discussing the parameters of embedment ratio L_1/L_2 , pile spacing s/d and angle θ , the calculation model and internal forces solving method of the partially embedded pile groups were obtained based on the pile-pile interactions model. The result shows that those factors have remarkable effects on pile-pile interaction factors of partially embedded pile groups, and most of the energy was released by the soil in the shallow soil. Our results indicate that the surface soil plays a major role in the restraint of the pile, and the conclusion can provide some basis for engineering design.

Key words: partially embedded pile groups; dynamic horizontal distribution loads; Winkler model; transfer matrix method

1 研究背景

部分埋入群桩基础作为一种经济有效的基础形式被广泛的应用到海上石油平台、跨海大桥等近海工程中。Gazetas 等^[1]基于静力荷载作用下的桩身位移, 提出了动力荷载作用下水平动阻抗的计算模

型。刘林超等^[2]在 Novak 平面应变模型的基础上, 借助势函数求得了饱和土层的水平动力阻抗。Medina 等^[3]研究了竖向和水平动荷载作用下群桩动力响应。余俊等^[4]基于 Biot 动力固结方程, 研究了端承桩在饱和土中水平振动问题。Mylonakis 等^[5]从能量角度出发运用动力 Winkler 地基模型考虑桩-土相互作用给出了成层土中群桩竖向及水平动阻抗

收稿日期: 2016-11-10; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51008194)

作者简介: 程 镇(1992-), 男, 江西九江人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为桩-土结构共同作用。

的计算方法。艾志勇等^[6]研究了冲刷作用下层状横观各向同性地基中高承台群桩的水平振动响应。黄茂松等^[7]运用迭代方法考虑了土体非线性对部分埋入群桩振动的影响,分析了迭代收敛的条件。汤斌等^[8]利用有限元方法,对竖向荷载作用下复合桩基的群桩效应进行了计算分析。任青等^[9]提出了部分埋入单桩的振动模型,分析影响单桩阻抗和有效桩长的主要因素。王建华等^[10]通过某大型码头桩基工程的现场试验结合数值分析研究了水平荷载作用下大直径嵌岩钢管混凝土桩的工作机理。此后吴志明等^[11]、高广运等^[12]、黄茂松等^[13]等也对动力 Winkler 地基模型进行了深入研究。

目前基于 Winkler 地基模型的桩基动力分析研究是通过一系列相互独立的线性或非线性弹簧和阻尼器来模拟土体对桩身产生的作用,其可以考虑土体模量随深度变化,但是在 Winkler 模型中仅通过质量 m 、刚度 k 、阻尼 c 这 3 个参数来模拟整个桩-土结构系统,土体屈服的发展、土中应力波的传播、桩-土界面的破坏具有一定的局限性。

本文主要是基于动力 Winkler 地基梁模型,建立了考虑分布荷载作用下线弹性地基中部分埋入群桩的动力分析模型;研究了激振频率、埋入比、桩间距、地基模量比等因素对群桩水平振动动力特性的影响。

2 单桩振动模型及水平振动特性

2.1 单桩振动方程

图 1 为部分埋入单桩计算简图,在桩身受到水平简谐分布力 $q(z)e^{i\omega t}$ (N) 作用下,桩体弹性模量为 E_p (MPa),截面惯性矩为 I_p (m^4),单位长度的质量为 m_p (kg),长度为 L (m),半径为 r (m),未埋入部分桩身长度分别 L_1 (m), L_2 (m)。

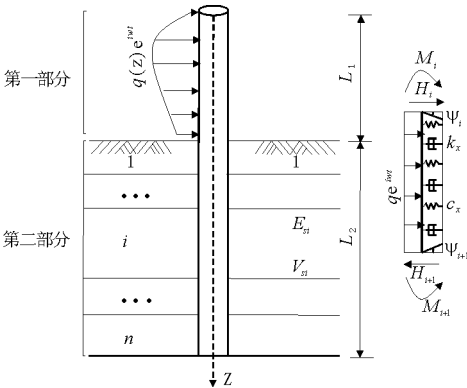


图 1 部分埋入单桩计算简图

首先引入下列假定:

- (1) 桩体简化为圆形线弹性梁;
- (2) 桩与土在水平振动时发生弹性变形且不计土体的竖向位移;
- (3) 桩土界面无相对滑动;
- (4) 未埋入部分桩身周围看作虚拟土层,对桩身没有约束作用;
- (5) 简谐分布力水平作用于桩身;
- (6) 桩周土体呈层状分布,被模拟为连续分布的弹簧和阻尼器 ($k_s = k_x + ic_x$),弹簧系数 k_x 和阻尼系数 c_x 可通过 Gazetas 等^[1] 所给公式计算得出:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \delta E_s \\ c_x &= c_r + c_m = 2\beta \frac{k_x}{\omega} + 6\rho_s v_s d a_0^{1/4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:函数 δ 表示土层参数、荷载形式、桩土相对刚度以及桩顶位移约束情况的关系;当桩端固端时 $\delta = 1.2$;当桩顶自由或铰接 $\delta = 2.1$; E_s 为土的弹性模量,MPa; β_s 为密度, kg/m^3 ; ρ_s 为阻尼比; v_s 为剪切波波速, m/s ; d 为桩身直径, m ; ω 为振动圆频率, rad/s ; $a_0 = \omega d/v_s$ 为无量纲频率。

根据动力平衡条件,单桩第 t 微段桩身运动微分方程为:

$$\frac{d^4 u_t(z)}{dz^4} - \lambda^4 u_t(z) = \frac{q(z)}{E_p I_p} \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{m_p \omega^2 - k_s}{E_p I_p}} \quad (3)$$

式中:当计算未埋入部分时 k_s 取 0,计算埋入部分时按式(1)取值。式(2)的通解为:

$$u_t(z) = A \cosh(\lambda z) + B \sinh(\lambda z) + C \cos(\lambda z) + D \sin(\lambda z) - \frac{q(z)}{E_p I_p \lambda} \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为积分常数,由边界条件确定,由此可得每个单元的两端点位移 $u(m)$ 、转角 $\varphi(rad)$ 、弯矩 $H(N \cdot m)$ 和剪力 $H(N)$ 的关系:

$$\begin{Bmatrix} u_t(z) \\ \varphi_t(z) \\ M_t(z) \\ H_t(z) \\ 1 \end{Bmatrix} = [t]_t \begin{Bmatrix} u_t(0) \\ \varphi_t(0) \\ M_t(0) \\ H_t(0) \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

根据传递矩阵法,单桩桩端(桩长为 L 处)与桩顶(桩长为 0 处)的位移、转角、弯矩和剪力之间的关系有:

$$\begin{Bmatrix} u(L) \\ \varphi(L) \\ M(L) \\ H(L) \\ 1 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} u(0) \\ \varphi(0) \\ M(0) \\ H(0) \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中： $[T] = [t]_n [t]_{n-1} \cdots [t]_1$ (7)

2.2 单桩内力计算

桩顶自由或铰接,弯矩、剪力为0;桩端固定,位移、转角为0。

$$\begin{aligned} Z_1^s &= [u(0) \quad \varphi(0) \quad 0 \quad 0 \quad 1] \\ Z_n^s &= [0 \quad 0 \quad M(L) \quad H(L) \quad 1]^T \\ \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(0) \\ \varphi(0) \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -T_{15} \\ -T_{25} \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

解公式得:

$$u(0) = (T_{12}T_{25} - T_{22}T_{15}) / (T_{22}T_{11} - T_{12}T_{21}) \tag{9}$$

$$\varphi(0) = (T_{21}T_{15} - T_{11}T_{25}) / (T_{22}T_{11} - T_{12}T_{21}) \tag{10}$$

同理桩顶约束转角,桩端固端时有:

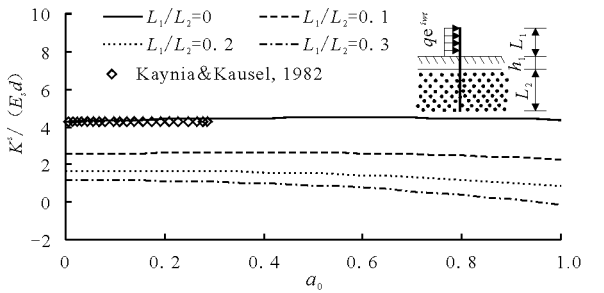


图2 部分埋入单桩水平阻抗($E_p/E_{s1} = 10\,000, E_p/E_{s2} = 1\,000$)

分析图2给出了双层地基中埋入比(L_1/L_2)对部分埋入单桩阻抗的影响,可以看出随着埋入比的增大,部分埋入单桩的阻抗降低,说明桩整体表现的更加“柔”性;随着埋入比的增大,部分埋入单桩的阻抗降低;随着激振频率的增加,单桩的动刚度越来越小,而单桩的动阻尼越来越大。此外,可以看出本文方法的动刚度和动阻尼跟 Kaynia 和 Kausel 的结果非常接近,进一步说明本文模型的正确性。

3 桩-桩相互作用分析

3.1 桩-桩相互作用模型

假设群桩由 n 根完全相同的部分埋入单桩组成,桩-桩相互作用的模型如图3所示。

根据二维波动理论,在土层 t 中,与主动桩距离为 s , 夹角为 θ 处的土体位移场 $u_s(z)_t$ 可表示为 $u_s(z)_t = \psi_t(s, \theta) u_1(z)_t$; 式中 $u_s(z)_t$ 为土体自由场位移以 $u_1(z)$ 为主动桩桩身水平位移, $\psi_t(s, \theta)$ 为位

$$H(0) = (-T_{23}T_{15} + T_{13}T_{25}) / (T_{23}T_{11} - T_{13}T_{21}) \tag{11}$$

$$M(0) = (T_{21}T_{15} - T_{11}T_{25}) / (T_{23}T_{11} - T_{13}T_{21}) \tag{12}$$

可以得到单桩桩头截面的状态向量为:

$$Z_1^s = [u(0) \quad \varphi(0) \quad M(0) \quad H(0) \quad 1]^T$$

依次递推可得到桩身任意截面的状态向量

$$Z_l^s = t_l \cdot t_{l-1} \cdots t_2 \cdot t_1 Z_1^s \tag{13}$$

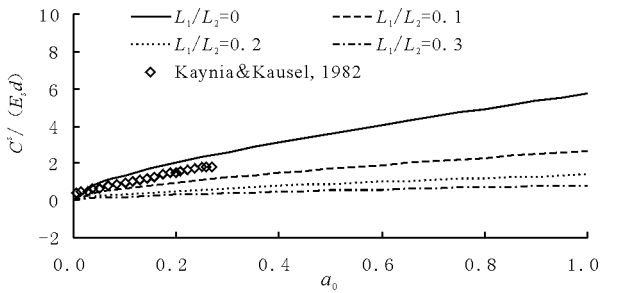
2.3 单桩水平阻抗

本文定义分布荷载作用下的单桩水平阻抗 $R^s(N)$ 为桩头发生单位水平位移所需分布荷载的合力,即

$$R^s = \frac{\int_0^{L_1} q(z) dz}{u(0)} = k^s + ic^s \tag{14}$$

式中: $k^s(N/m)$ 、 c^s 分别为单桩的水平动刚度和动阻尼。

图2为双层地基中部分埋入单桩水平阻抗图。(以下图中单位为无量纲)



移衰减函数。本文令位移衰减函数在未埋入部分为0,完全埋入部分由式(15a)计算。

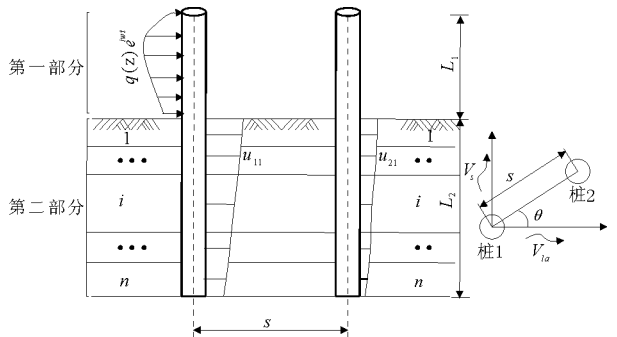


图3 桩-桩水平相互作用模型

$$\begin{aligned} \psi_t(s, \theta) &= \frac{u_t(s, \theta, z)}{u_1(d/2, \theta, z)} \\ &= \psi_t(s, 0^\circ) \cos^2 \theta + \psi_t(s, 90^\circ) \sin^2 \theta \end{aligned} \tag{15a}$$

$$\psi_l(s, 0^\circ) = (r/s)^{1/2} \exp[-(\beta + i)\omega(s-r)/v_{la}] \quad (15b)$$

$$\psi_l(s, 90^\circ) = (r/s)^{1/2} \exp[-(\beta + i)\omega(s-r)/v_s] \quad (15c)$$

$$v_{la} = 3.4v_s / [\pi(1 - v_s)] \quad (15d)$$

式中: $u_l(s, \theta, z)$ 为土体水平位移函数; $\psi(s, 0^\circ)$ 、 $\psi(s, 90^\circ)$ 分别为对应沿着主动桩水平振动方向和垂直振动方向的位移波的衰减函数。 v_s 为剪切波波速, m/s; v_{la} 为“Lysmer”比拟波速, m/s。将土体位移场看作支点位移加到被动桩桩身, 则被动桩第 t 段桩身的动力平衡方程可表示为

$$\frac{d^4 u_2(z)_t}{dz^4} - \lambda^4 u_2(z)_t = \frac{k_s}{E_p I_p} \psi(s, \theta) u_1(z)_t \quad (16)$$

上式的通解为:

$$u_2(z)_t = U_2(z)_t + u_2(\dot{z})_t \quad (17)$$

式中: $U_2(z)_t$ 为式(16)对应的齐次方程的通解, $u_2(\dot{z})_t$ 为式(16)的一个特解, 有:

$$U_2(z)_t = A_{1t} \cosh(\lambda z) + A_{2t} \sinh(\lambda z) + A_{3t} \cos(\lambda z) + A_{4t} \sin(\lambda z) \quad (18)$$

$$u_2(\dot{z})_t = B_{1t} z \cosh(\lambda z) + B_{2t} z \sinh(\lambda z) + B_{3t} z \cdot \cos(\lambda z) + B_{4t} z \sin(\lambda z) + B_5 q(z) \quad (19)$$

式中: A_{1t} 、 A_{2t} 、 A_{3t} 、 A_{4t} 、 B_{1t} 、 B_{2t} 、 B_{3t} 、 B_{4t} 、 B_{5t} 为积分常数, 由边界条件确定。采用与单桩类似的求解方法, 则桩2的顶部变形、内力与桩尖处变形、内力有如下关系式:

$$\begin{Bmatrix} u_2(L) \\ \varphi_2(L) \\ M_2(L) \\ H_2(L) \end{Bmatrix}_2 = [T^1] \begin{Bmatrix} u_2(0) \\ \varphi_2(0) \\ M_2(0) \\ H_2(0) \end{Bmatrix}_1 + [T^2] \begin{Bmatrix} u_1(0) \\ \varphi_1(0) \\ M_1(0) \\ H_1(0) \end{Bmatrix}_1 \quad (20)$$

其中:

$$[T^1] = [t^B]_n [t^B]_{n-1} \cdots [t^B]_1 \quad (21)$$

$$[T^2] = \sum_{j=1}^n [t^B]_n \cdots [t^B]_{j+1} [t^H]_j [t^z]_{j-1} \cdots [t^z]_1 \quad (22)$$

式中: t^B 为被动桩单桩自传递矩阵; t^z 为主动桩单桩自传递矩阵; t^H 为相互作用传递矩阵。

3.2 桩-桩内力计算

按单桩桩身变形及内力的求解方法, 当主动桩与被动桩桩顶自由或铰接, 桩端固定时, 被动桩变形及内力可表示为:

$$u_2(0) = \frac{T_{22}^1 (-T_{11}^2 u_1(0) - T_{12}^2 \varphi_1(0) - T_{15}^2)}{T_{11}^1 T_{22}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} - \frac{T_{12}^1 (-T_{21}^2 u_1(0) - T_{22}^2 \varphi_1(0) - T_{25}^2)}{T_{11}^1 T_{12}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} + \frac{-T_{22}^1 T_{15}^1 - T_{12}^1 T_{25}^1}{T_{11}^1 T_{22}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} \quad (23)$$

$$\varphi_2(0) = \frac{T_{21}^1 (-T_{11}^2 u_1(0) - T_{12}^2 \varphi_1(0) - T_{15}^2)}{T_{11}^1 T_{22}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} - \frac{T_{11}^1 (-T_{21}^2 u_1(0) - T_{22}^2 \varphi_1(0) - T_{25}^2)}{T_{11}^1 T_{22}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} + \frac{-T_{21}^1 T_{15}^1 - T_{11}^1 T_{21}^1}{T_{11}^1 T_{22}^1 - T_{12}^1 T_{21}^1} \quad (24)$$

主动桩与被动桩桩顶自由, 桩端固定时有

$$H_2(0) = \frac{T_{23}^1 (-T_{11}^2 u_1(0) - T_{13}^2 M_1(0) - T_{15}^2)}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} - \frac{T_{13}^1 (-T_{21}^2 u_1(0) - T_{23}^2 M_1(0) - T_{25}^2)}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} + \frac{-T_{23}^1 T_{15}^1 - T_{13}^1 T_{25}^1}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} \quad (25)$$

$$M_2(0) = \frac{T_{21}^1 (-T_{11}^2 u_1(0) - T_{13}^2 M_1(0) - T_{15}^2)}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} - \frac{T_{11}^1 (-T_{21}^2 u_1(0) - T_{23}^2 M_1(0) - T_{25}^2)}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} + \frac{-T_{21}^1 T_{15}^1 - T_{11}^1 T_{25}^1}{T_{11}^1 T_{23}^1 - T_{13}^1 T_{21}^1} \quad (26)$$

记被动桩桩头截面状态向量为: $z_i^{21} = [u_2(0) \quad \varphi_2(0) \quad M_2(0) \quad H_2(0) \quad 1]$, 依次递推可得被动桩桩身任意截面状态向量

$$Z_i^{21} = [T^1]_i Z_i^{21} + [T^2]_i Z_1^{1s} \quad (27)$$

3.3 桩-桩相互作用因子分析

桩-桩相互作用就是指主动桩对被动桩的影响, 学者们提出了用被动桩桩头位移与主动桩桩头位移的比值的大小来考虑主动桩对被动桩的影响程度。故桩-桩相互作用因子为被动桩(桩 j) 桩头水平位移与主动桩(桩 i) 桩头水平位移的比值, 即:

$$\alpha_{ji} = u_j(0)/u_i(0) \quad (28)$$

从埋入比、桩间距和桩位置角 3 个方面分析桩-桩相互作用。

图 4 为双层地基中水平相互作用的影响因素, 给出了在分层土体中桩-桩相互作用因子 α 及 $a_0 = 0.5$ 时被动桩桩身位移 (u_z^2/u_0^1 , u_z^2 为被动桩 z 截面处桩身位移, u_0^1 为主动桩头位移)。

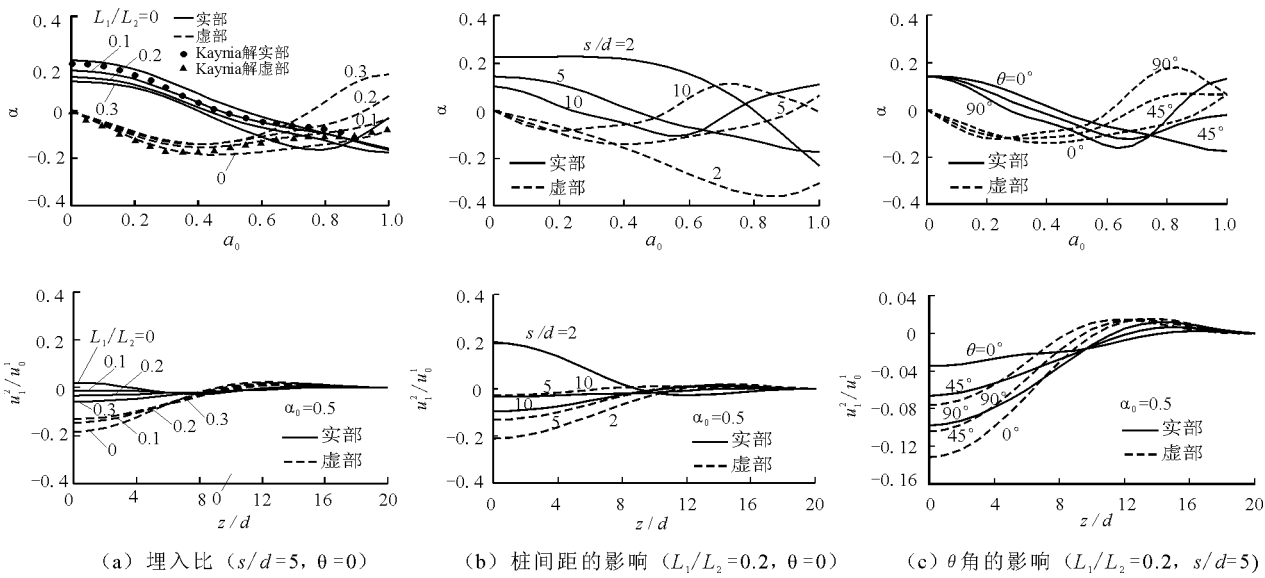


图4 群桩相互作用的影响因素 ($E_p/E_{s1} = 10\,000, E_p/E_{s2} = 1\,000$)

分析图4可以得出如下结论:

(1)图4(a)可以看出在低频段($a_0 < 0.5$)随着埋入比的增加相互作用因子实部和虚部幅值都减小,相比而言,高频段($a_0 > 0.5$)幅值都增加;此外,可以得到本文模型的退化解($L_1/L_2 = 0$)与Kaynia精确解吻合较好,说明本模型的正确性。

(2)图4(b)可以看出随着桩间距的增加,桩-桩相互作用因子的幅值变小,而且相互作用因子出现更多峰值(谷值)。

(3)图4(c)给出了 θ 角对桩-桩相互作用因子的影响。可以看出 $\theta = 45^\circ$ 的相互作用因子的二倍为 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的和,这与土体的水平自由位移的衰减函数的特征有关。

此外,分析 $a_0 = 0.5$ 时被动桩桩身水平位移图可以得出埋入比、桩间距和桩位置角 θ 对浅层($z/d \leq 8$)中被动桩身位移幅值有显著影响,但对较深层($8 \leq z/d \leq 20$)中被动桩的桩身位移影响有限,说明在浅层土中时被动桩的能量已被土体释放了大部分,间接说明表层土对桩的约束起主要作用。

4 分布荷载作用下的群桩

4.1 群桩计算

假设群桩由 n 根尺寸、材料相同的部分埋入单桩组成,桩顶由不考虑质量刚度无限大的刚性承台连接。由于承台刚度无限大,桩顶的横向位移都相同,等于群桩的横向位移。根据Markris^[14],本文定义分布荷载作用下的群桩中主动桩的桩身变形及内力由4部分组成:(1)桩自身作用分布荷载下产生

的桩身变形和内力;(2)考虑桩-桩相互作用,桩在其他桩受分布荷载时产生的被动桩身变形和内力;(3)考虑承台作用,桩在自身桩顶附加剪力作用下产生的单桩桩身变形和内力;(4)考虑桩-桩相互作用,桩在其他桩受附加剪力时产生的被动桩身变形和内力。

首先求解分布荷载作用下群桩位移、各桩头附加剪力:按照冯永正等^[15]给出群桩位移和桩头附加剪力的求解方法;群桩位移、各桩头剪力之间的关系可以用式(29)表示:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & -\hat{\alpha}_{11} & -\hat{\alpha}_{12} & \cdots & -\hat{\alpha}_{1n} \\ 1 & -\hat{\alpha}_{21} & -\hat{\alpha}_{22} & \cdots & -\hat{\alpha}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & -\hat{\alpha}_{n1} & -\hat{\alpha}_{n2} & \cdots & -\hat{\alpha}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu^G \\ F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{j=1}^n -\hat{\alpha}_{1j} Y_j^s \\ \sum_{j=1}^n -\hat{\alpha}_{2j} Y_j^s \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n -\hat{\alpha}_{nj} Y_j^s \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中: $\hat{\alpha}_{ij}$ 为桩 j 桩头受集中力荷载作用下桩 i 桩头的相互作用因子,由式(28)求得,由文献[13]给出的方法求得; μ^G 表示群桩桩头横向位移; F_i 表示考虑承台作用后桩 i 桩头的附加剪力; Y_j^s 表示不考虑桩-桩相互作用时桩 j 桩身受分布荷载的桩头位移,由式(23)求得;求解式(29)可以得到桩头位移 μ^G 和附加剪力 F_i 。桩头刚性承台对桩基的约束作用可以用附加剪力来代替,将桩身分布荷载和桩头附加剪力分别作为外部荷载,则群桩中桩 i 第 t 微段的变形和内力可以由下式来表示:

$$(Z_t^G)_i = (Z_t^s)_i^{\text{均}} + \sum_{j=1}^n (Z_t^{ij})^{\text{均}} + (Z_t^s)_i^{\text{附}} + \sum_{j=1}^n (Z_t^{ij})^{\text{附}}$$

(30)

式中： $(Z_t^s)_i^{\text{均}}$ 为桩 i 在均布荷载作用下第 t 微段桩身的主动变形和内力,由式(13) 求得; $(Z_t^{ij})^{\text{均}}$ 为桩 j 在均布荷载作用下造成的桩 i 在第 t 微段桩身的变形和内力,由式(27) 求得; $(Z_t^s)_i^{\text{附}}$ 为桩 i 在附加剪力作用下第 t 微段桩身的变形和内力,由式(13) 求得; $(Z_t^{ij})^{\text{附}}$ 为桩 j 在附加剪力作用下造成的桩 i 在第 t 微段桩身的变形和内力,由式(27)求得。

4.2 桩身变形及内力

群桩中各桩桩身变形和内力可由式(30) 求出,图 5 为 3×3 群桩桩位布置示意图。

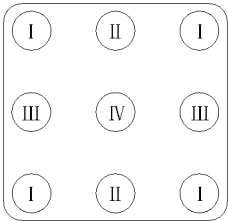


图 5 3×3 群桩桩位布置示意图

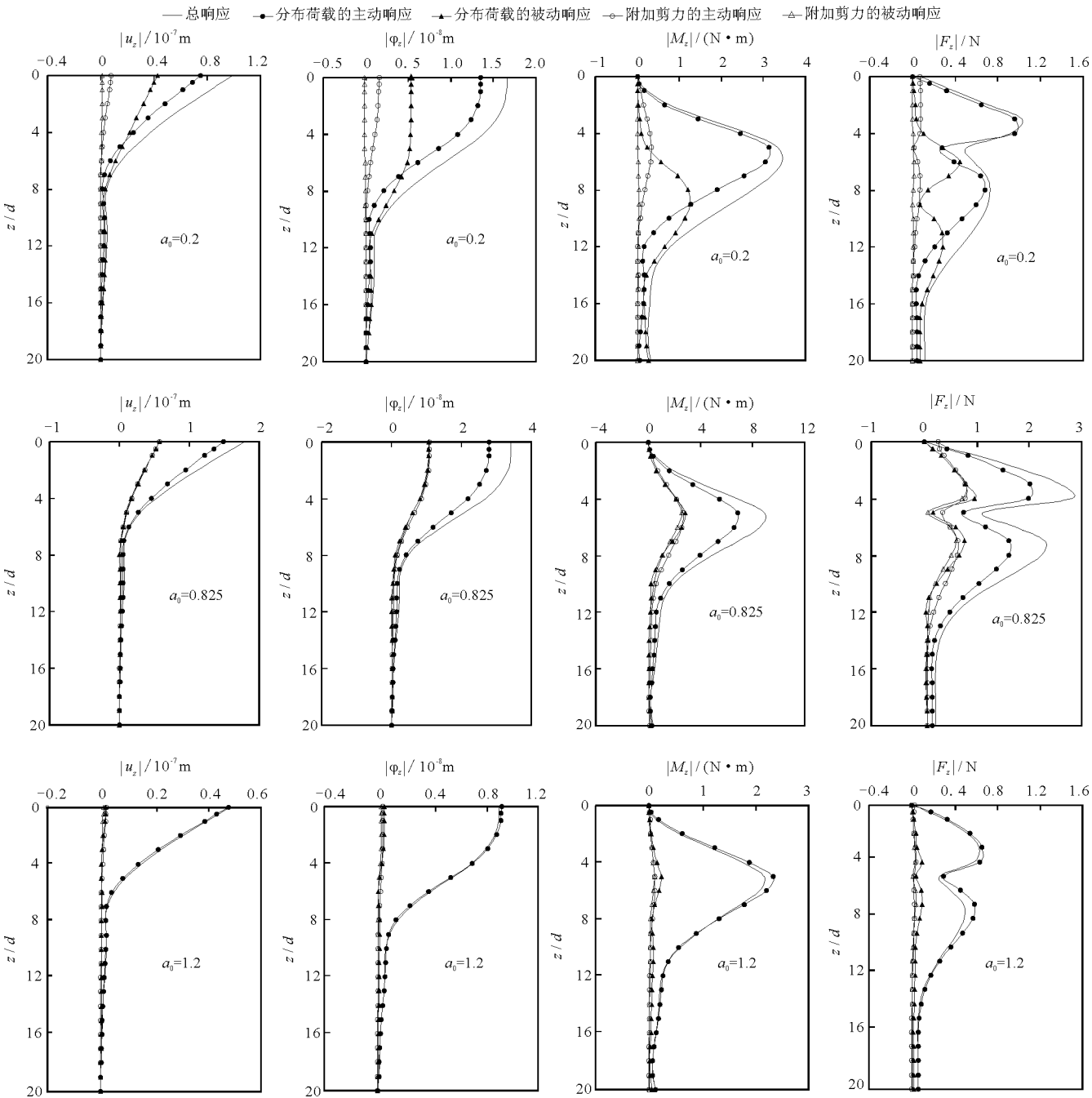


图 6 3×3 群桩角桩(桩 I)身变形和内力(桩顶铰接) ($E_p/E_{s1} = 10\,000, E_p/E_{s2} = 1\,000$)

图 6 给出了 3×3 群桩中角桩(桩 I)桩身总变形和总内力及其 4 个组成部分受激振频率的影响。在 $a_0 = 0.2$ 时组成桩身变形和内力的 4 部分中由分布荷载引起的主动响应和被动响应起主导作用,而附加剪力引起的响应起辅助作用;在 $a_0 = 0.825$ 时组成桩身变形和内力的 4 部分中由分布荷载引起的主动响应起主导作用,而附加剪力引起的响应所占比重有所增加,同样起辅助作用;在 $a_0 = 1.2$ 时组成桩身变形和内力的 4 部分中由分布荷载引起的主动响应起主导作用,分布荷载引起的被动响应及附加剪力引起的响应所起的作用基本可以忽略;在较低频段,群桩桩身变形和内力主要由分布荷载引起的主动响应和被动响应主导,此时附加剪力较小;随着激振频率的增大附加剪力的幅值会出现峰值,此时有附加剪力引起的群桩响应在群桩总体响应中占有重要作用;当激振频率大于自振频率较多时,由桩-桩相互作用及附加剪力引起的群桩响应可以忽略。

5 结 论

考虑土体的分层情况下,基于传递矩阵法的部分埋入群桩的桩-桩相互作用模型,通过分析在均布荷载作用下的群桩动力响应,得到了以下结论。

(1)通过对单桩阻抗的定义计算出分布荷载作用下单桩的动阻抗,讨论了埋入比对单桩动阻抗的影响,并将退化解与所谓精确解进行对比,证明本文方法的有效性。

(2)均布荷载作用下,埋入比、桩间距和激振频率对桩-桩相互作用因子产生较大影响,说明它们是影响桩-桩相互作用因子的重要因素。

(3)桩身变形和内力由 4 个部分组成,这 4 个部分对桩身整体响应的贡献值随着激振频率变化,总体规律是低频域时分布荷载下的主动响应和被动响应占主导,中等频域时附加剪力引起主动响应及被动响应起重要作用,较高频域时主要由分布荷载下的主动响应控制,故设计时应控制桩的自振频率,使自振频率远离外部荷载频率。

参考文献:

- [1] Gazetas G, Dobry R. Horizontal response of piles in layered soils[J]. Geotechnical Engineering, 1984, 110(1): 20-40.
- [2] 刘林超, 闫启方, 杨 骁. 基于多孔介质理论的饱和土中群桩水平振动特性[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 767-774.
- [3] Medina C, Aznárez J J, Padrón L A, et al. Effects of soil-structure interaction on the dynamic properties and seismic response of piled structures[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2013, 53(11): 160-175.
- [4] 余 俊, 尚守平, 李 忠, 等. 饱和土中端承桩水平振动动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 408-415.
- [5] Rovithis E, Mylonakis G, Pitilakis K. Dynamic stiffness and kinematic response of single piles in inhomogeneous soil[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(6): 1949-1972.
- [6] 艾智勇, 李志雄. 冲刷作用下层状横观各向同性土中群桩水平振动响应[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 613-618.
- [7] 黄茂松, 钟 锐. 海上风机部分埋入群桩水平-摇摆振动与结构共振分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 286-294.
- [8] 汤 斌, 陈晓平. 群桩效应有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 299-302.
- [9] 任 青, 黄茂松, 韩东晓. 考虑轴力的部分埋入群桩基础水平振动特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1932-1944.
- [10] 王建华, 陈锦剑, 柯 学. 水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1194-1198.
- [11] 吴志明, 黄茂松, 吕丽芳. 桩-桩水平振动动力相互作用研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1848-1855.
- [12] 高广运, 赵元一, 高 盟, 等. 分层土中群桩水平动力阻抗的改进计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 509-515.
- [13] 黄茂松, 钟 锐, 任 青. 层状地基中沉箱加桩复合基础的水平-摇摆振动[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 790-797.
- [14] Makris N, Badoni D. Seismic response of pile groups under oblique-shear and Rayleigh waves[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 24(4): 517-532.
- [15] 冯永正, 王立忠, 陈云敏. 瑞利波作用下双层地基中群桩横向动力响应[J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 284-291.