

变桩径、桩长群桩桩—土体系相互作用分析模型*

张建辉¹, 张素芬¹, 邓安福²

(1. 河北大学 建筑工程学院, 河北保定 071002; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:基于桩与桩相互作用机制及其解析模型, 针对层状地基上具有不同桩径、不同桩长、不同桩体材料的摩擦群桩进行研究, 建立了几何、材料特性不同情况下承受竖向荷载的桩与桩相互作用分析模型, 以及摩擦群桩刚度矩阵的计算方法。各桩完全相同的摩擦群桩, 可作为其一种特殊情形。给出的计算模型对于大规模摩擦群桩的沉降分析、优化设计, 以及摩擦群桩的相互作用机制的研究, 具有积极意义。与基于实际工程的模型试验结果比较表明, 该模型是合理可行的。

关键词:摩擦群桩; 相互作用; 解析模型; 柔度矩阵

中图分类号: TU473 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2007)06-067-05

Analytical Model of Interaction of Friction Pile Group with Different Diameter and Length

ZHANG Jian-hui¹, ZHANG Su-fen¹, DENG An-fu²

(1. College of Machinery & Civil Engineering, Hebei University, Baoding 071002, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This paper describes a study of friction pile groups with different diameters and lengths as well as material in layered soil. The study focused on the mechanism and analytical model of pile-to-pile interaction. To determine the vertical interaction flexibility matrix for the pile group embedded in multilayered soil, the study developed a general analytical formulation of pile-to-pile interaction for pile groups with different geometric and material characteristics. A pile group with piles of the same type can be considered a special case. The model has high value to the analysis of the pile-group settlement, design optimization and study of the pile-to-pile interaction mechanism. Because a practical example shows that the calculated results were identical to the results of the model test, this method is rational and feasible.

Keywords: interaction; analytical formulation; flexibility matrix

摩擦群桩主要通过桩侧摩阻力将荷载传递到桩周土层中, 由于桩与桩的相互作用, 使群桩的工作性状趋于复杂。已经证明其将导致(a)群桩的刚度下降、(b)桩顶荷载分布不均匀、(c)荷载传递机制发生变化即桩侧面产生附加剪应力、传递至桩端的荷载增加等效应^[1]。几十年来, 人们已经应用许多方法对群桩的性能进行了分析研究^{[2]~[6]}, 但对群桩相互作用计算算法的研究, 尤其是桩径、桩长、甚至桩体材料不同时, 较大规模群桩相互作用的计算分析方法, 尚有待进一步深入探讨。

论文针对层状地基中的摩擦群桩进行研究, 建立

了变桩径、变桩长、不同桩体材料群桩的分析模型和解析计算方法, 推出这类群桩柔度或刚度矩阵系数的解析计算公式。并将其用于桩筏基础的分析中, 获得良好的效果。这一分析模型对于摩擦群桩的沉降分析、设计优化, 以及大型摩擦群桩的相互作用机制的研究, 具有积极意义。

1 桩与桩的相互作用分析模型

设群桩置于水平层状地基中, 每一层土体为均质, 且第 i 层土的剪切模量和厚度分别为 G_i 和 l_i 。群桩中各桩的桩长、桩径可以不同, 设桩 j 的桩长 L_j 、桩径

* 收稿日期: 2007-05-21

基金项目: 河北省自然科学基金资助, (E2005000847) 河北省建设厅计划项目(2003-109)

作者简介: 张建辉(1963-), 男, 河北人, 教授, 博士, 主要从事土与结构相互作用、地基基础、工程力学研究。

d_j 、和弹性模量 E_{pj} ，桩间距用 s 表示。如图 1 所示，当桩 j 在竖向荷载作用下沉降时，使其周围土体发生位移，进而导致土体中桩 k 发生沉降、产生轴力；由于桩 k 的轴向刚度远大于土体竖向刚度，因此，桩 k 的沉降将小于桩 k 不存在时同位置土体的沉降。Mylonakis & Gazetas^[1] 引入附加沉降和附加轴力的概念，建立了等桩径、等桩长群桩相互作用模型，其能有效地对桩 k 的附加沉降和附加轴力进行分析。

2 基桩与土的相互作用

根据剪切位移法^{[2][6]}，桩 j 在桩顶加载 P ($P = P_{jj}$ (0)) 时，深度 z 处的沉降和轴力合并用矩阵形式表示为^[1]，

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(z) \\ P_{jj}(z) \end{Bmatrix} = [t_1(z)]_j \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} \quad (1)$$

A 和 B 为待定常数，矩阵

$$[t_1(z)]_j = \begin{bmatrix} e^{\lambda_j z} & e^{-\lambda_j z} \\ -E_{pj} A_{pj} \lambda_j e^{\lambda_j z} & E_{pj} A_{pj} \lambda_j e^{-\lambda_j z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

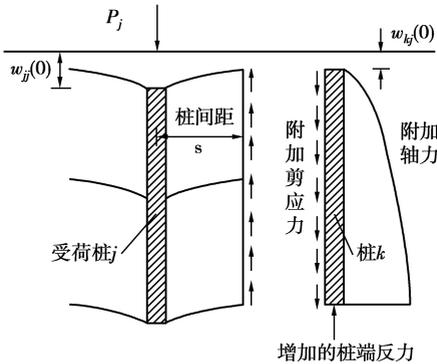


图 1 桩 j 对桩 k 的作用

其中 A_{pj} 为桩的横截面积， G_s 为土的剪切模量， $\lambda_j =$

$$\left[\frac{2\pi G_s}{\left(E_{pj} A_{pj} \ln \left(\frac{2r_m}{d_j} \right) \right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

为桩 j 的荷载传递参数， r_m 为桩的影响半径。Cook^[5] 等在伦敦粘土中的实测表明，桩与土、桩与桩之间的相互影响距离是有限的，远小于弹性理论显示的结果，即有 $r_m = 10d$ ；施鸣升^[7] 在粘土中的桩试验给出桩对土性质的影响范围约为 6 倍桩径，即 $r_m = 6d$ 。因此，可根据具体情况取 $6d_j \sim 10d_j$ 等。由于理论上桩的影响半径应为无穷大，在分析桩长、桩径不相同的两桩的相互作用时，本文近似取用两桩影响半径的较大值。

在层状地基中，按照土层对各桩进行分段，各桩的第 i 桩段与第 i 土层对应，其上、下端深度记为 z_{ii} 、 z_{bi} 。由式(1)可得桩 j 第 i 桩段上端和下端的位移与轴力

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{ii}) \\ P_{jj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} = [t_1(z_{ii})]_j \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{bi}) \\ P_{jj}(z_{bi}) \end{Bmatrix} = [t_1(z_{bi})]_j$$

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

进而可求出

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{ii}) \\ P_{jj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} = [t_1(z_{ii})]_j [t_1(z_{bi})]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{bi}) \\ P_{jj}(z_{bi}) \end{Bmatrix} = [T_i]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{bi}) \\ P_{jj}(z_{bi}) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中 $[T_i]_j$ 为桩 j 在 i 土层的变换矩阵

$$[T_i]_j = [t_1(z_{ii})]_j [t_1(z_{bi})]_j^{-1} = \begin{bmatrix} ch(\lambda_{ji} l_i) & \frac{sh(\lambda_{ji} l_i)}{(E_{pj} A_{pj} \lambda_{ji})} \\ E_{pj} A_{pj} \lambda_{ji} sh(\lambda_{ji} l_i) & ch(\lambda_{ji} l_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $l_i = z_{bi} - z_{ii}$ ， λ_{ji} 为桩 j 在第 i 土层的荷载传递参数，计算公式与 λ_j 相同， G_s 取 G_i 。

根据不同桩段在其界面处位移和轴力的连续性条件，利用递推的方法由式(4)可得桩顶沉降、轴力 ($z=0$) 与桩端的沉降、轴力 ($z=L_j$) 的关系

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(0) \\ P_{jj}(0) \end{Bmatrix} = \prod_{i=1}^{n_j} [T_i]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ P_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_j(1,1) & T_j(1,2) \\ T_j(2,1) & T_j(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ P_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

考虑桩端刚性及深度的影响，将桩端视为刚性圆形面积对土体的截入，一般可近似计算桩端沉降为^[5]

$$w_{jj}(L_j) = \delta_{bj} P_{jj}(L_j) \quad (7)$$

其中 $\delta_{bj} = \frac{(1-\mu_{bj})}{(2G_{bj} d_j)}$ 为桩 j 端部土层的柔度系数， G_{bj} 、 μ_{bj} 为该土层的剪切模量与泊松比。

根据式(6)、(7)即可求得层状地基中桩 j 的桩顶柔度系数^[8]，

$$\delta_{jj}^p = \frac{w_{jj}(0)}{P_{jj}(0)} = \frac{T_j(1,1)\delta_{bj} + T_j(1,2)}{T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2)} \quad (8)$$

由上述推导看出，地基土的层状特性会对桩的沉降和轴力、桩的荷载传递以及桩顶的柔度(或刚度)产生明显的影响。

3 变桩长、变桩径群桩中桩与桩的相互作用

3.1 均质土地基中的群桩

桩 j 在桩顶荷载 P 作用下沉降时，桩 j 周围土体将产生位移场，且其与土体到桩 j 轴线的径向距离 s 成对数衰减的规律^[1]

$$\Psi_j(s) = \begin{cases} \frac{\ln(\frac{r_m}{s})}{\ln(\frac{2r_m}{d_j})} & 2 < s < r_m \\ 0 & s \geq r_m \end{cases} \quad (9)$$

由上式可计算因桩 j 加载而引起的桩 k 处土体的沉降位移 $w_{kj}(s, z) \approx \Psi_j(s)w_{jj}(z)$ 。由于桩 k 轴向刚度远大于该位置土体的竖向刚度,以及桩端土体的反作用,桩 j 加载引起的桩 k 沉降 $w_{kj}(z)$ 将小于 $w_{jj}(s, z)$, 土体对桩 k 产生下拉作用,在桩 k -土体界面产生剪应力。由剪切位移法可建立桩 k 的控制微分方程

$$\frac{d^2 w_{kj}(z)}{dz^2} - \lambda_k^2 (w_{kj}(z) - w_{jj}(s, z)) = 0 \quad (10)$$

其中 λ_k 为桩 k 的荷载传递系数,解此非齐次微分方程,得桩 k 任意深度处的附加沉降 $w_{kj}(z)$, 关于深度 z 求导可进一步得桩的附加轴力 $P_{kj}(z)$, 整理、合并以矩阵形式表示

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(z) \\ P_{kj}(z) \end{Bmatrix} = [t_2(z)] \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} + [t_1(z)]_k \begin{Bmatrix} C \\ D \end{Bmatrix} \quad (11)$$

其中待定常数 A, B 由桩 j 的边界条件确定, C, D 由桩 k 的边界条件确定; $[t_1(z)]_k$ 见式(2)(相应参数换为 $E_{pk}, A_{pk}, \lambda_k$); 当桩 j 、桩 k 的长度、直径、桩材料相同,即 $\lambda_j = \lambda_k = \lambda$ 时

$$[t_2(z)] = \frac{\lambda}{2} \Psi_j(s)$$

$$\begin{bmatrix} -ze^{-\lambda z} & ze^{-\lambda z} \\ E_{pk} A_{pk} (1 + \lambda z) e^{-\lambda z} & -E_{pk} A_{pk} (1 - \lambda z) e^{-\lambda z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

当两桩的长度、直径、桩材料不同,即 $\lambda_j \neq \lambda_k$ 时

$$[t_2(z)] = \frac{\lambda_k^2}{\lambda_k^2 - \lambda_j^2} \Psi_j(s)$$

$$\begin{bmatrix} e^{\lambda_j z} & e^{-\lambda_j z} \\ -E_{pk} A_{pk} \lambda_j e^{\lambda_j z} & E_{pk} A_{pk} \lambda_j e^{-\lambda_j z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

桩 j 在竖向荷载 P_j 作用下,桩 j 和桩 k 通过土体在桩侧和桩端均将产生相互作用。根据将桩端视为弹

性半空间表面上的刚性戳入的假设,桩端土体位移与径向距离 s 成反比,衰减速度要比式(9)中的 $\Psi(s)$ 快得多^[2]。研究指出^[2], 桩 j 加载时,桩 k 与桩 j 的桩端沉降位移比通常是 10^{-3} 的数量级,与由桩侧相互作用引起的桩 k 沉降相比,可以忽略。因此,本文仅考虑桩侧之间的相互作用。式(11)即为由桩 j 和桩 k 桩侧相互作用产生的附加位移和附加轴力。

3.2 层状地基中的群桩

3.2.1 相互作用变换矩阵 层状地基中,按照土层对各桩进行分段。当桩 j 的桩顶作用荷载 P 时,在桩 k 的第 i 桩段上、下端引起的附加位移与附加轴力为^[8],

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(z_{ii}) \\ P_{kj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} = [t_2(z_{ii})] \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \end{Bmatrix} + [t_1(z_{ii})]_k \begin{Bmatrix} C_i \\ D_i \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(z_{bi}) \\ P_{kj}(z_{bi}) \end{Bmatrix} = [t_2(z_{bi})] \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \end{Bmatrix} + [t_1(z_{bi})]_k \begin{Bmatrix} C_i \\ D_i \end{Bmatrix}$$

利用式(3),将上述二式合并,简化可得

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(z_{ii}) \\ P_{kj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} = [TI_i] \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{ii}) \\ P_{jj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} + [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(z_{bi}) \\ P_{kj}(z_{bi}) \end{Bmatrix} \quad (14)$$

其中 $[T_i]_k$ 为桩 k 在 i 土层的变换矩阵,计算公式同式(5),相应参数换为 $E_{pk}, A_{pk}, \lambda_k$; $[TI_i]$ 为在 i 土层桩与桩相互作用的变换矩阵:

$$[TI_i] = [t_2(z_{ii})][t_1(z_{bi})]_j - [T_i]_k [t_2(z_{bi})][t_1(z_{bi})]_j$$

根据式(2)、(5)、(12)或(13),注意到 $l_i = z_{bi} - z_{ii}$, 由上式可推出,

(1) 桩 j 、桩 k 的长度、直径、桩材料相同,即 $\lambda_j = \lambda_k = \lambda_i$ 时,

$$[TI_i] = -\frac{\Psi(s)_j}{2} \begin{bmatrix} \lambda_i l_i sh(\lambda_i l_i) & \frac{\lambda_i l_i ch(\lambda_i l_i) - sh(\lambda_i l_i)}{E_{pj} A_{pj} \lambda_i} \\ E_{pk} A_{pk} \lambda_i [\lambda_i l_i ch(\lambda_i l_i) + sh(\lambda_i l_i)] & \frac{E_{pk} A_{pk}}{E_{pj} A_{pj}} \lambda_i l_i sh(\lambda_i l_i) \end{bmatrix} \quad (15)$$

(2) 桩 j 、桩 k 的长度、直径、桩材料不同,即 $\lambda_j \neq \lambda_k$ 时,

$$[TI_i] = \frac{\Psi_j(s) \lambda_k^2}{\lambda_k^2 - \lambda_j^2} \begin{bmatrix} ch(\lambda_j l_i) - ch(\lambda_k l_i) & \frac{1}{E_{pj} A_{pj}} \left(\frac{sh(\lambda_j l_i)}{\lambda_j} - \frac{sh(\lambda_k l_i)}{\lambda_k} \right) \\ E_{pk} A_{pk} (\lambda_j sh(\lambda_j l_i) - \lambda_k sh(\lambda_k l_i)) & \frac{E_{pk} A_{pk}}{E_{pj} A_{pj}} (ch(\lambda_j l_i) - ch(\lambda_k l_i)) \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.2.2 相互作用柔度系数 根据不同桩段在界面处桩位移和轴力的连续性条件,利用递推的方法,可推得桩 k 的桩顶($z=0$)附加位移和附加轴力,与桩 j 桩端位移和轴力、桩 k 桩端附加位移和附加轴力的关系。

设桩 j 、桩 k 的长度不同,两桩长度范围内的土层数分别为 n_j, n_k 。令 $n = \min(n_j, n_k)$, 则桩 j 和桩 k 在此 n 个土层内发生相互作用,根据式(4)和式(14),可递推求得

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ P_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \prod_{m=1}^{i-1} [T_m]_k [TI_i] \prod_{m=i+1}^n [T_m]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{im}) \\ P_{jj}(z_{im}) \end{Bmatrix} + \prod_{i=1}^n [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(z_{im}) \\ P_{kj}(z_{im}) \end{Bmatrix} \quad (17)$$

当 $n_k < n_j$ 时, $n = n_k, L_k = z_{im} < L_j$, 桩 j 在 $n+1$ 至 n_j 土层中,对桩 j 继续应用连续性条件至桩端,得

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ P_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n \prod_{m=1}^{i-1} [T_m]_k [TI_i] \prod_{m=i+1}^n [T_m]_j \right) \prod_{i=n+1}^{n_j} [T_i]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ P_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \prod_{i=1}^n [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ P_{kj}(L_k) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

当 $n_k \geq n_j$ 时, $n = n_j, L_k \geq z_{bn} = L_j$, 桩 k 在 $n + 1$ 至 n_k 土层中, 对桩 k 继续应用连续性条件至桩端, 得

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ P_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n \prod_{m=1}^{i-1} [T_m]_k [TI_i] \prod_{m=i+1}^n [T_m]_j \right) \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ P_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \prod_{i=1}^{n_k} [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ P_{kj}(L_k) \end{Bmatrix} \quad (19)$$

完成各式中变换矩阵的乘积, 上述关系可用统一符号(两种情况乘积矩阵不同) 简略表示为

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ P_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} TI(1,1) & TI(1,2) \\ TI(2,1) & TI(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ P_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} T_k(1,1) & T_k(1,2) \\ T_k(2,1) & T_k(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ P_{kj}(L_k) \end{Bmatrix} \quad (20)$$

与桩 j 相同, 设在桩 k 的桩端土层有

$$w_{kj}(L_k) = \delta_{bk} P_{kj}(L_k) \quad (21)$$

其中 δ_{bk} 为桩 k 桩端土层的柔度系数。

利用桩 k 顶部的边界条件 $P_{kj}(0) = 0$, 由式(7)、(20)、(21), 得到

$$w_{kj}(0) = \left\{ (TI(1,1)\delta_{bj} + TI(1,2)) - (T_k(1,1)\delta_{bk} + T_k(1,2)) \frac{TI(2,1)\delta_{bj} + TI(2,2)}{T_k(2,1)\delta_{bk} + T_k(2,2)} \right\} P_{jj}(L_j) \quad (22)$$

结合式(6)式中第二式, 由上式得到桩与桩相互作用的柔度系数为

$$\delta_{kj}^0 = \frac{w_{kj}(0)}{P_{jj}(0)} = \frac{TI(1,1)\delta_{bj} + TI(1,2)}{T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2)} - \frac{(T_k(1,1)\delta_{bk} + T_k(1,2))(TI(2,1)\delta_{bj} + TI(2,2))}{(T_k(2,1)\delta_{bk} + T_k(2,2))(T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2))} \quad (23)$$

由式(8)和式(23), 可以求得群桩的柔度矩阵, 求逆即得其刚度矩阵。由上述分析可见, 由桩 j 加载引起的桩 k (桩 k 顶部荷载为零) 附加位移和附加轴力, 可由式(14)求得。桩基的荷载传递机制是通过桩侧和桩端将荷载传递到土体中, 根据上述分析, 各桩除由于自身加载产生位移和轴力外, 还由其它桩加载而引起附加位移和附加轴力, 且与桩间距、相互影响范围内的桩数、桩径、桩长有关。上述有关附加位移和附加轴力的分析, 在理论上解释了在群桩中各桩的荷载与孤立单桩相同的情况下, 群桩沉降大的原因, 以及桩与桩的相互作用使得桩底部的轴力增大, 有更多的荷载传递到桩端土的内在机制。

4 实例分析

4.1 模型试验

某高层建筑为地上 22 层(地下 1 层)钢筋混凝土框剪结构桩筏基础; 柱网纵横向均为 8 m, 每边各 5 跨, 平面尺寸为 43 m×43 m; 中心跨为核心筒剪力墙; 首层高 4.2 m, 其余层高 3.6 m, 总高约 83.4 m, 根据 PKPM 计算出原型上部结构总荷载为 521 600 kN; 埋深 5.0 m, 筏板厚 1.5 m, 自重为 66 500 kN, 基桩采用钻孔灌注桩。

文献[9]以上述工程为原型, 进行了(I)变桩距桩筏基础和(II)变桩距、变桩长桩筏基础两组模型试验, 几何比例尺取为 1:10;

模型实验(I): 桩径 $d = 150$ mm; 桩长 $L = 2$ m; 总桩数 $n = 44$ 根, 平面布置见图 2。

模型实验(II): 桩径 $d = 150$ mm; 桩长① $L = 2$ m, 24 根; ② $L = 3$ m, 8 根; ③ $L = 4$ m, 12 根; 总桩数 $n = 44$ 根, 平面布置见图 3。

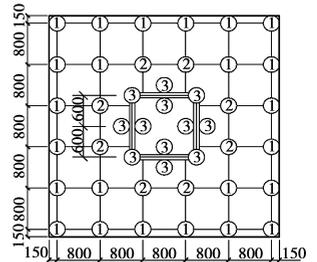
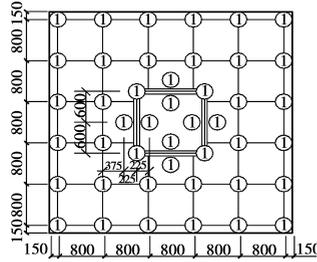


图 2 模型试验(I)平面布置图 图 3 模型试验(II)平面布置图
模型荷载取原型荷载的 1/100, 模型试验实际加载 6 500 kN, 分为核心区、内区、边柱、角柱四个荷载强度分区, 单根柱脚荷载分别为: 筒体四角 $N_1 = 425$ kN、内柱 $N_2 = 200$ kN、边柱 $N_3 = 130$ kN、角柱 $N_4 = 80$ kN, 并将荷载均匀分为 8 级, 逐级加载。

4.2 模型计算

本文将上述变桩径、桩长相互作用的分析模型与筏板无单元法耦合, 建立桩筏基础的数值分析方法。根据地基勘察报告确定地基

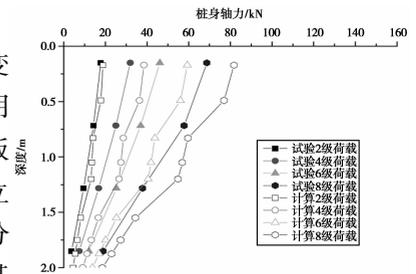


图 4 试验 I 筏板角桩轴力比较图

分层及参数, 对上述不同桩长、桩径的桩筏基础模型进行计算。桩轴力的部分计算结果与模型试验测试值, 见图 4~7。

各桩的轴力及其沿深度的变化, 受上部荷载、筏板、地基土、桩与桩相互作用等众多因素的影响。由上述图中曲线可以看出, 筏板角桩的桩轴力的测试值和计算结果吻合的较好; 对于基础核心筒体的角桩(试验 I)、角部桩(试验 II), 由于在该部位桩与桩相互作用较为复杂, 且由于计算模型、土体参数取值有一定近似

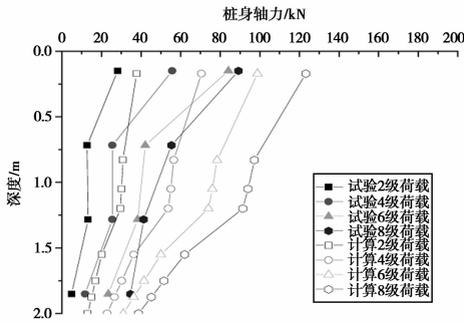


图 5 试验 I 核心筒角桩轴力比较图

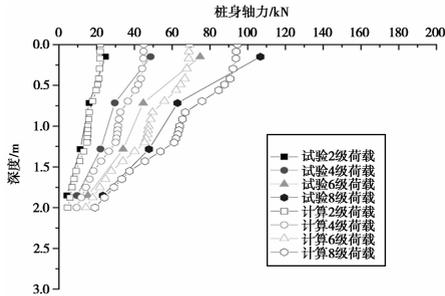


图 6 试验 II 筏板角桩轴力比较图

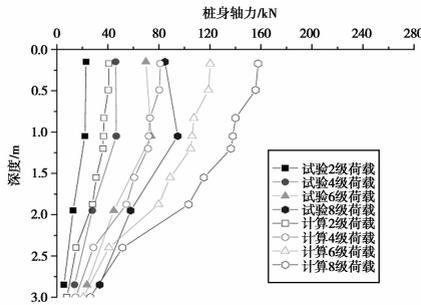


图 7 试验 II 核心筒角部桩轴力比较图

性、试验钢筋计测试的近似性等,测试值和计算结果在数值上有一些差别,但两者也具有较好的规律一致性。因此,论文的变桩长、桩径桩—土体系分析模型能够较好地模拟桩与土、桩与桩的相互作用,是合理、可行的。

5 结论

论文给出层状地基上变桩径、桩长(包括不同桩体材料)承受竖向荷载的摩擦群桩的相互作用模型,推出桩与桩相互作用柔度矩阵的近似解析计算方法,将其用于变桩径、桩长桩筏基础的分析计算中,与模型试验结果比较表明,该分析模型是有效、可行的。

论文假设土层是线性的,以及未考虑桩—土界面的可能滑移等。如果考虑土体的非线性本构关系,采用增量法,本文结果可推广应用于非线性层状地基、桩—土界面的可能出现滑移等各种非线性分析^[10]。本文的变桩径、桩长摩擦群桩柔度矩阵的解析解计算方法,可用于摩擦群桩基础、桩筏基础的沉降分析、布桩优化分析等,同时,对于探索层状地基上桩与土的荷载传递机制、桩与桩相互作用机制,具有积极意义。

参考文献:

[1] MYLONAKIS, G. AND GAZETAS, G. Settlement and Additional Internal Forces of Grouped Piles in Layered Soil [J]. Geotechnique, 1998, 48(1):55—72.

[2] RANDOLPH, M. F. AND WROTH, C. P. An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups[J]. Geotechnique, 1979,29(4): 423—439.

[3] LEE C. Y. Pile group Psettlement Analysis by Hybrid Layer Approach[J]. J. Geo. Eng, 1993, 119(6): 984—997.

[4] MANDOLINI, A. & VIGGIANI, C. Settlement of Piled Foundations[J]. Geotechnique, 1997,47(4): 791—816.

[5] COOKE, R. W., PRICE, G. AND TARR, K. Jacked Piles in London Clay-internaction and Grou Pbehaviour under Working Conditions[J]. Geotechnique, 1997, 30(2): 97—136.

[6] 宰金珉. 群桩与土和承台非线性共同作用分析的半解析半数值方法[J]. 建筑结构学报, 1996,17(1): 63—74. ZAI Jin-min. Semi-analytical and semi-numerical Method for Analyzing Nonlinear Interaction of Pile Group-soil-pile ca Psystem[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(1):63—74.

[7] 施鸣升. 沉入粘土中桩的挤土效应探讨[J]. 建筑结构学报, 1983, (1):60—71. SHI Ming-sheng. A Study of the Effect of Compacted Soil During Pile Installation in Clay [J]. Journal of Building Structures, 1983, (1):60—71

[8] 张建辉. 层状地基上桩筏基础的分析方法及其布桩优化研究[D]. 重庆:重庆建筑大学, 1999. ZHANG Jian-hui. A study on analytical method of piled raft foundations on layered soil and the pile-layout optimization [D]. Chongqing; Chongqing Jianzhu University, 1999.

[9] 河北省建筑科学研究院. 高层建筑地基基础变刚度调平设计模型试验[R]. 石家庄:河北省建筑科学研究院, 2001. Hebei Province Academy of Building Research. Model Test for varied-stiffness adjustment design of high-rise building foundation [R]. Shijiazhuang; Hebei Province Academy of Building Research, 2001.

[10] 张建辉, 邓安福. 桩筏基础的新型分析方法[J]. 土木工程学报, 2002,35(4):103—108. ZHANG Jian-hui, Deng An-fu. A New Analytical Method for Piled Raft Foundation [J]. China Civil Engineering Journal, 2002,35(4):103—108.

(编辑 陈蓉)