

不同桩长、桩径桩筏基础的分析方法

张建辉¹, 靳元峻¹, 余晓雅¹, 王维玉²

(1. 河北大学机械与建筑工程学院, 河北 保定 071002; 2. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对具有不同桩长、桩径群桩的桩筏基础进行研究, 采用筏基无单元方法对筏板进行模拟, 基于共同作用原理, 以桩与桩、桩与土相互作用的解析模型为基础, 建立了层状地基上不同桩长、桩径、桩体材料情况下, 桩筏基础与地基共同作用的一种分析方法。旨在解决具有特殊桩群, 或通过桩长、桩径、桩体材料的变化、优化桩土刚度分布、调平设计时的桩筏基础计算问题。该方法可方便地用于非均匀布桩、非规则平面形状桩筏基础的计算和优化分析。与基于实际工程的大型模型试验结果的比较表明, 该方法是合理可行的, 并具有较好的实用性。

关键词: 桩筏基础; 分析方法; 桩与桩相互作用; 优化设计; 无单元方法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-1958-06

作者简介: 张建辉(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事地基基础工程、土与结构相互作用、工程力学的教学与科研工作。

Analysis of piled raft foundation with different lengths and diameters of piles

ZHANG Jian-hui¹, JIN Yun-jun¹, YU Xiao-ya¹, WANG Wei-yu²

(1. College of Machinery & Civil Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Hebei Province Academy of Building

Research, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: A piled raft foundation with different lengths and diameters of piles was studied. On the basis of the interaction principle, a method to analyze the piled raft foundation with different lengths and diameters of piles in the layered ground was established. The element-free method was applied to the computation of the raft; and the approximate analytical model of pile-to-pile interaction was used to analyze the pile-soil system of the foundation. The purpose was to solve the computation problem of the piled raft foundation with special pile group where the stiffness of pile and soil was optimized to reduce the differential settlement by changing the pile length and diameter. In addition, the analysis of the piled raft foundation with irregular shape of raft and the optimization of pile-layout could be easily carried out. It was shown by a practical example that the calculated results were identical well to the results of the large-scale model test, so the method is rational and feasible.

Key words: piled raft foundation; analysis method; interaction of pile and pile; optimization design; element-free method

0 引言

桩筏基础是软土地基上高层建筑广泛采用的基础型式。变刚度桩筏基础是基于共同作用原理和变形控制设计理论, 通过优化桩土刚度分布, 使差异沉降减至最小, 由此降低筏板内力和上部结构次应力, 充分发挥地基土的承载力, 从而实现减少布桩、降低筏板材料消耗、提高桩筏基础的技术经济指标的目的。因此桩筏基础与地基土的相互作用分析及其分析方法的研究是必不可少的。

桩筏基础分析中一般将桩筏基础分为筏板和桩-土体系两部分。桩-土体系的分析涉及桩与土、桩与桩相互作用等诸多因素, 采用不同的桩-土体系简化模型就得到不同的桩筏基础分析方法。

桩筏基础与地基土的相互作用分析方法的研究一

直受到学术界和工程界的关注^[1-4]。但涉及不同桩长、桩径变刚度桩筏基础的分析方法, 尚不多见。笔者在相关研究工作^[5]的基础上, 采用筏基无单元方法^[6-7]对筏板进行模拟; 以桩与桩、桩与土相互作用的近似解析方法计算不同桩长、桩径的桩-土体系刚度矩阵; 根据竖向平衡和位移协调条件, 建立了层状地基上不同桩长、桩径变刚度桩筏基础与地基土相互作用的分析方法。相同桩长、桩径的桩筏基础可作为特殊情况进行计算。这项研究对于桩筏基础的变刚度优化分析、设计, 如合理布桩(包括桩长、桩径、桩间距)、基础

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

收稿日期: 2005-09-19

调平设计等具有重要意义。

1 桩筏基础筏板的模拟

1.1 筏基无单元方法

无单元法 (Element-free Method) 是一种新型数值方法, 且近年已成为研究热点^[7-8]。文献[6]首次将无单元法用于板弯曲问题中, 成功地建立了筏基的无单元法, 其特点是: ①不需要划分单元, 便于模拟筏板的不规则几何形状; ②节点布置灵活, 可根据需要变更节点的数量和分布, 节点参数只有挠度一个; ③插值函数及其梯度在整个求解域内连续, 计算精度较高。

设 $x-y$ 坐标面为筏板的中面, $\mathbf{x} = \{x, y\}^T$, 根据筏基无单元法^[6], 位移函数可近似表示为

$$u^h(\mathbf{x}) = \sum_k^n \phi_k(\mathbf{x}) u_k, \quad (1)$$

式中, u_k 为节点处的位移值, n 为其影响域包含 $\mathbf{x}$ 点的节点数, $\phi_k(\mathbf{x})$ 为形函数。

$\phi_k(\mathbf{x})$ 可表示为

$$\phi_k(\mathbf{x}) = \sum_j^m p_j(\mathbf{x}) [H^{-1}(\mathbf{x}) Q(\mathbf{x})]_{jk}. \quad (2)$$

式中 $H(\mathbf{x})$ 为 $m \times m$ 矩阵, $H(\mathbf{x}) = \sum_k^n W_k(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}_k) p^T(\mathbf{x}_k)$; $Q(\mathbf{x})$ 为 $m \times n$ 矩阵, $Q(\mathbf{x}) = [W_1(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}_1), W_2(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}_2), \dots, W_n(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}_n)]$; $W_k(\mathbf{x})$ 为节点 $\mathbf{x}_k$ 影响域 ($W_k(\mathbf{x}) \neq 0$ 的区域) 上的权函数^[7]; $p(\mathbf{x}) = \{p_j(\mathbf{x})\}$ 为完备多项式基函数向量^[6]。

1.2 筏板的无单元法刚度矩阵

设弹性地基上边界自由的筏板, 承受面荷载 $q(x, y)$, 根据式 (1), 得近似挠度函数

$$w^h(x, y) \approx \sum_{k=1}^n \phi_k(x, y) w_k = N^T u, \quad (3)$$

其中, $N = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}^T$ 、 $u = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$ 分别为形函数向量、节点挠度向量。

筏板的势能泛函包括场函数的二阶导数, 文献[6]给出无单元形函数 ϕ_i ($i=1, 2, \dots, m$) 的二阶导数 $\phi_{i,xx}$ 、 $\phi_{i,xy}$ 、 $\phi_{i,yy}$, 进而可得到 $w(x, y)$ 的二阶导数。

根据自由边界筏基的最小势能原理, 得到筏板与地基共同作用的基本方程

$$(K_r + K_s) u = Q, \quad (4)$$

其中, K_r 、 K_s 分别为筏板和地基的刚度矩阵, Q 为节点荷载向量^[6]。

2 不同桩长、桩径桩-土体系的相互作用刚度矩阵

设群桩置于水平层状地基中, 桩间距为 s , 层状

地基的每一层土体为均质, 且第 i 层土的剪切模量和厚度分别为 G_i 和 l_i 。各桩的桩长、桩径、和弹性常数各不相同, 桩 j 的桩长 L_j 、桩径 d_j 、和弹性模量 E_{pj} 。按照土层对桩进行分段, 第 i 桩段与第 i 土层对应, 设基桩 j 、 k 桩长范围内对应的土层数分别为 n_j 、 n_k 。

Ylonakis & Gazetas^[1]给出了桩与桩相互作用的模型, 考虑了桩 k 的存在对相互作用沉降的影响, 并指出土体对桩 k 的下拉作用的内在机制是桩 k 与土体界面的剪应力, 不仅引起桩 k 的附加沉降, 也使桩 k 产生附加轴力。

2.1 单桩的柔度系数

根据 Mylonakis & Gazetas^[1]的桩与桩相互作用模型, 桩顶加载 p ($p = p_j(0)$) 时, 桩 j 的沉降和轴力合并用矩阵形式表示为

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(z) \\ p_{jj}(z) \end{Bmatrix} = [t_1(z)]_j \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

其中, A 和 B 为待定常数, 矩阵

$$[t_1(z)]_j = \begin{bmatrix} e^{\lambda_j z} & e^{-\lambda_j z} \\ -E_{pj} A_{pj} \lambda_j e^{\lambda_j z} & E_{pj} A_{pj} \lambda_j e^{-\lambda_j z} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中 λ_j 为桩 j 的荷载传递参数; $\lambda_j = (2\pi G_s / (E_{pj} A_{pj} \ln(2r_m/d_j)))^{1/2}$; G_s 为土的剪切模量; r_m 为桩的影响半径; A_{pj} 为桩的横截面积。

研究表明, 桩与土、桩与桩之间的相互影响距离远小于弹性理论显示的结果, 可根据具体情况取 $r_m = 6d_j - 10d_j$ ^[1]。在分析桩长、桩径不相同的两桩的相互作用时, 本文取用两桩影响半径的较大值。

由式 (5) 可得桩 j 第 i 桩段上、下端的位移与轴力, 消去常数可求出其递推关系

$$\begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{ii}) \\ p_{jj}(z_{ii}) \end{Bmatrix} = [T_i]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(z_{bi}) \\ p_{jj}(z_{bi}) \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $[T_i]_j$ 为桩 j 在 i 土层的变换矩阵,

$$[T_i]_j = [t_1(z_{ii})]_j [t_1(z_{bi})]_j^{-1} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\lambda_{ji} l_i) & \text{sh}(\lambda_{ji} l_i) / (E_{pj} A_{pj} \lambda_{ji}) \\ E_{pj} A_{pj} \lambda_{ji} \text{sh}(\lambda_{ji} l_i) & \text{ch}(\lambda_{ji} l_i) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

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 。

考虑桩端刚性及深度的影响, 桩端位移可取为^[1]

$$w_{jj}(L_j) = \delta_{bj} p_{jj}(L_j). \quad (9)$$

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

由式 (8) 可得出单桩桩顶的柔度系数

$$\delta_{jj}^p = \frac{w_{jj}(0)}{p_{jj}(0)} = \frac{T_j(1,1)\delta_{bj} + T_j(1,2)}{T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2)}, \quad (10)$$

$$\text{其中, } \begin{bmatrix} T_j(1,1) & T_j(1,2) \\ T_j(2,1) & T_j(2,2) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{n_j} [T_i]_j。$$

可以看出,地基土的层状特性会对桩身位移和轴力、桩的荷载传递以及桩顶的柔度(或刚度)产生明显的影响。

2.2 桩与桩的相互作用柔度系数

研究表明^[1],两桩桩端之间的相互作用相对很小,故本文仅考虑桩身部分桩与桩的相互作用。

在荷载 p 作用下,桩 j 周围土体将产生位移,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]

$$\psi_j(s) = \begin{cases} \ln(r_m/s)/\ln(2r_m/d_j) & (d_j/2 < s < r_m), \\ 0 & (s \geq r_m). \end{cases} \quad (11)$$

考虑桩 j 与 k 的桩长、桩径、桩体材料的不同,桩 j 加载引起桩 k (桩距 s) 的附加位移和附加轴力为

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(z) \\ p_{kj}(z) \end{Bmatrix} = [t_2(z)] \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} + [t_1(z)]_k \begin{Bmatrix} C \\ D \end{Bmatrix}。 \quad (12)$$

式中 待定常数 A 和 B 、 C 和 D 分别由桩 j 、桩 k 的边界条件确定; $[t_1(z)]_k$ 见式 (6),相应参数换为 E_{pk} 、 A_{pk} 、 λ_k 。

当两桩荷载传递参数 $\lambda_j = \lambda_k = \lambda$ 时,

$$\begin{aligned} & [t_2(z)] \\ &= \frac{\lambda}{2} \psi_j(s) \begin{bmatrix} -ze^{\lambda z} & ze^{-\lambda z} \\ E_{pk}A_{pk}(1+\lambda z)e^{\lambda z} - E_{pk}A_{pk}(1-\lambda z)e^{-\lambda z} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (13a)$$

当 $\lambda_j \neq \lambda_k$ 时,

$$\begin{aligned} & [t_2(z)] \\ &= \frac{\lambda_k^2}{\lambda_k^2 - \lambda_j^2} \psi_j(s) \begin{bmatrix} e^{\lambda_j z} & e^{-\lambda_j z} \\ -E_{pk}A_{pk}\lambda_j e^{\lambda_j z} & E_{pk}A_{pk}\lambda_j e^{-\lambda_j z} \end{bmatrix}。 \end{aligned} \quad (13b)$$

由式 (12) 可得桩 k 桩段 i 上、下端的附加位移与附加轴力的递推关系^[9],即

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

式中 $[T_i]_k$ 为桩 k 在 i 土层的变换矩阵,计算公式同式 (8),相应参数换为 E_{pk} 、 A_{pk} 、 λ_{ki} ; $[TI_i]$ 为在 i 土层桩与桩相互作用的变换矩阵, $[TI_i] = [t_2(z_{ti})]$

$$[t_1(z_{bi})]_j^{-1} - [T_i]_k [t_2(z_{bi})] [t_1(z_{bi})]_j^{-1}。$$

注意到 $l_i = z_{bi} - z_{ti}$, 当 $\lambda_{ji} = \lambda_{ki} = \lambda_i$ 时,

$$[TI_i] = -\frac{\psi(s)_j}{2} \begin{bmatrix} \lambda_i l_i \text{sh}(\lambda_i l_i) \\ E_{pk}A_{pk}\lambda_i [\lambda_i l_i \text{ch}(\lambda_i l_i) + \text{sh}(\lambda_i l_i)] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (\lambda_i l_i \text{ch}(\lambda_i l_i) - \text{sh}(\lambda_i l_i)) / (E_{pj}A_{pj}\lambda_i) \\ E_{pk}A_{pk}\lambda_i l_i \text{sh}(\lambda_i l_i) / (E_{pj}A_{pj}) \end{bmatrix};$$

当 $\lambda_{ji} \neq \lambda_{ki}$ 时,

$$\begin{aligned} [TI_i] &= \frac{\psi_j(s)\lambda_{ki}^2}{\lambda_{ki}^2 - \lambda_{ji}^2} \begin{bmatrix} \text{ch}(\lambda_{ji}l_i) - \text{ch}(\lambda_{ki}l_i) \\ E_{pk}A_{pk}(\lambda_{ji}\text{sh}(\lambda_{ji}l_i) - \lambda_{ki}\text{sh}(\lambda_{ki}l_i)) \\ (\text{sh}(\lambda_{ji}l_i)/\lambda_{ji} - \text{sh}(\lambda_{ki}l_i)/\lambda_{ki}) / (E_{pj}A_{pj}) \\ E_{pk}A_{pk}(\text{ch}(\lambda_{ji}l_i) - \text{ch}(\lambda_{ki}l_i)) / (E_{pj}A_{pj}) \end{bmatrix}。 \end{aligned}$$

根据不同桩段在其界面处桩位移和轴力的连续性条件,可得桩 k 的桩顶 ($z=0$) 附加位移和附加轴力,与桩 j 桩端 ($z=L_j$) 位移和轴力、桩 k 桩端 ($z=L_k$) 附加位移和附加轴力的关系。

令 $n = \min(n_j, n_k)$, 根据式 (7) 和 (14) 进行递推,当 $n_k < n_j$ 时, $n = n_k$, $L_k = z_{bn} < L_j$, 对桩 j 继续利用其连续性条件至桩端,有

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ p_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n \prod_{m=1}^{i-1} [T_m]_k [TI_i] \prod_{m=i+1}^n [T_m]_j \right) \prod_{i=n+1}^{n_j} [T_i]_j \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ p_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \prod_{i=1}^n [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ p_{kj}(L_k) \end{Bmatrix}; \quad (15)$$

当 $n_k \geq n_j$ 时, $n = n_j$, $L_k \geq z_{bn} = L_j$, 对桩 k 继续利用连续性条件至桩端,有

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ p_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n \prod_{m=1}^{i-1} [T_m]_k [TI_i] \prod_{m=i+1}^n [T_m]_j \right) \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ p_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \prod_{i=1}^{n_k} [T_i]_k \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ p_{kj}(L_k) \end{Bmatrix}。 \quad (16)$$

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

$$\begin{Bmatrix} w_{kj}(0) \\ p_{kj}(0) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} TI(1,1) & TI(1,2) \\ TI(2,1) & TI(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{jj}(L_j) \\ p_{jj}(L_j) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} T_k(1,1) & T_k(1,2) \\ T_k(2,1) & T_k(2,2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{kj}(L_k) \\ p_{kj}(L_k) \end{Bmatrix}。 \quad (17)$$

与桩 j 相同,设在桩 k 的桩端土层

$$w_{kj}(L_k) = \delta_{bk} p_{kj}(L_k), \quad (18)$$

其中, δ_{bk} 为桩 k 桩端土层的柔度系数。

利用桩 k 顶部边界条件 $p_{kj}(0) = 0$, 可推得不同桩长、桩径、桩体材料下桩与桩相互作用的柔度系数

$$\delta_{kj}^p = \frac{w_{kj}(0)}{p_{jj}(0)} = \frac{TI(1,1)\delta_{bj} + TI(1,2)}{T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2)} - \frac{(T_k(1,1)\delta_{bk} + T_k(1,2))(TI(2,1)\delta_{bj} + TI(2,2))}{(T_k(2,1)\delta_{bk} + T_k(2,2))(T_j(2,1)\delta_{bj} + T_j(2,2))}。 \quad (19)$$

在层状土体中, 已知加载桩 j 的桩身位移和轴力, 受其影响, 桩 k 某深度处的附加位移和附加轴力即可由式 (14) 求得; 由桩 j 加载而引起的桩 k 顶部 (荷载为 0) 或桩端处附加位移和附加轴力, 可通过变换矩阵 $[T_i]$ 、 $[T_i]$ 递推求得。由此可见, 各桩由其他桩加载而引起的附加位移和附加轴力与桩间距、相互影响影响范围内的桩数、桩径及桩长有密切关系。

研究指出^[2], 桩与桩侧附近土体的相互作用随着荷载增加将呈现非线性特征, 同时也导致 $\lambda_{ji} \neq \lambda_{ki}$, 引起桩与桩的非线性相互作用, 本文采用双曲线非线性本构模型描述桩侧土体、桩端土体的本构特性, 应用增量法计算单桩、桩与桩相互作用的柔度系数。当某土层处桩 - 土界面的摩阻力达到桩与土体的极限摩阻力时, 对应的变换矩阵 $[T_i]_j$ 替换为^[5, 9]

$$[T_{ij}]_j = \begin{bmatrix} 1 & l_i / (E_{pj} A_{pj}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.3 桩 - 土体系相互作用刚度矩阵

由单桩柔度系数和桩 j 的位移场衰减函数 $\psi(s)$, 可得桩 - 土相互作用的柔度系数

$$\delta_{ij}^{ps} = \psi(s) \delta_{ij}^{ps}, \quad (21)$$

其中, t 为距桩轴线为 s 的土体单元。由位移互等原理, 可知即土 - 桩相互作用的柔度系数 $\delta_{ji}^{ps} = \delta_{ij}^{ps}$ 。

土与土的相互作用可利用分层地基模型^[5, 9]进行计算。对某级荷载增量, 将所得柔度矩阵 δ 求逆, 即可得该荷载水平下桩 - 土体系刚度矩阵 $K_{sp} = \delta^{-1}$ 。

3 共同作用的基本方程

设上部荷载均为竖向荷载, 筏与桩、土保持竖向位移连续, 筏板、桩体为弹性体, 考虑桩与土、桩与桩相互作用的非线性特征, 建立桩筏基础共同作用的基本方程。

记 $\bar{U} = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}^T$ 为桩 - 土体系的节点位移向量、 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}^T$ 为节点反力向量, 则

$$\{R\} = [K_{sp}] \{\bar{U}\} \quad (22)$$

筏板和桩 - 土体系均考虑竖向位移, 根据筏基无单元法求得筏板刚度矩阵 K_R , 则筏板的平衡方程为

$$[K_R] \{U\} = \{Q\} - \{R\} \quad (23)$$

注意到 $U = \bar{U}$, 得桩筏基础与地基土的共同作用方程

$$[K_R + K_{sp}] \{U\} = \{Q\} \quad (24)$$

将 Q 分为若干级荷载增量 ΔQ_i , $i = 1, 2, \dots, n_q$; 则对第 i 级荷载增量

$$[K_R + K_{sp,i}] \{\Delta U_i\} = \{\Delta Q_i\} \quad (25)$$

式中, K_R 保持为常量, 但桩 - 土体系的刚度矩阵随荷载的增加而变化, $K_{sp,i}$ 为施加荷载增量 ΔQ_i 时的桩

- 土体系刚度矩阵。求解方程 (25) 得位移增量 ΔU_i , 进而可求出与各荷载水平对应的平均沉降、差异沉降、桩顶荷载、桩身轴力以及摩阻力等。

4 实例分析

某高层建筑基础为地上 22 层 (地下 1 层) 钢筋混凝土框剪结构桩筏基础, 柱网纵横均为 8 m, 每边各 5 跨, 平面尺寸 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, 埋深 5.0 m, 筏板厚 1.5 m, 基桩采用 36 根钻孔灌注桩, 其中桩长 20 m、桩径 1.5 m 的桩 24 根, 桩长 20 m、桩径 2.5 m 的桩 8 根, 桩长 30 m、桩径 2.5 m 的桩 4 根, 核心筒、桩布置见图 1。根据 PKPM 计算得柱脚荷载和核心筒底部荷载, 总荷载为 521600 kN。根据地基勘察报告进行地基层层及确定参数, 见表 1。

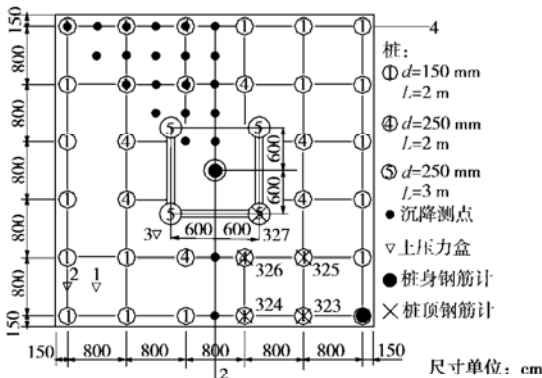


图 1 基础桩位和测点布置

Fig. 1 The layout of the model test

表 1 地基土力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the soil layers

土层	深度/m	厚度/m	压缩模量/MPa	桩侧极限摩阻力标准值/kPa	桩端极限承载力标准值/kPa
粉质粘土	0.0~1.7	1.7	5.50	34	
粉土	1.7~4.2	2.5	12.00	60	
中细砂	4.2~5.6	1.4	38.56	80	1200
砾砂	5.6~8.3	2.7	47.00	100	3000
粉土	8.3~10.0	1.7	13.00	60	1000
粉质粘土	10.0~11.0	1.0	7.20	45	700
粉土	11.0~12.0	1.0	15.00	60	1000
细砂	12.0~15.5	3.5	57.64	120	2100
粉土	15.5~17.5	2.0	35.38	60	1500
细砂	17.5~20.0	2.5	33.26	80	2200

4.1 模型试验

文献[10]以上述工程为原型, 进行了不同桩长、桩径桩筏基础的模型试验, 得到了可贵的测试数据。模型试验比例尺为 1 : 10, 测点布置见图 1, 在筏

板周围堆置 2~3 层铁转,以模拟埋深效应。模型荷载取原型荷载的 1/100,实际试验加载 6500 kN,分为核心区、内区、边柱、角柱四个荷载强度分区,单根桩脚荷载分别为:筒体四角 $N_1=425\text{ kN}$ 、内柱 $N_2=200\text{ kN}$ 、边柱 $N_3=130\text{ kN}$ 、角柱 $N_4=80\text{ kN}$,并将荷载均匀分为 8 级,逐级加载。

4.2 原型计算

应用本文分析方法对上述桩筏基础进行计算,计算时采用基础原型尺寸、表 1 的土层参数、荷载为试验荷载的 100 倍,桩的布置、荷载分布、分级同模型试验、筏板节点分布及坐标系见图 2。

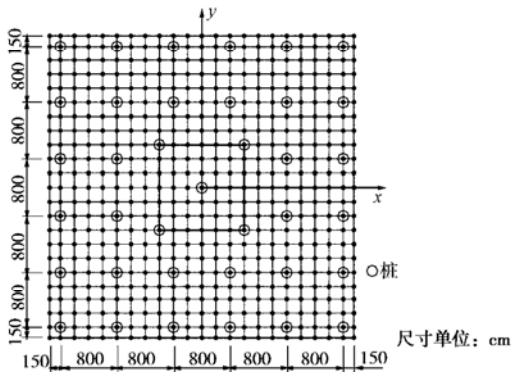


图 2 筏板节点布置

Fig. 2 The layout of the raft nodes

沉降、桩顶反力和桩轴力、筏底土压力的模型试验与桩筏基础原型计算结果详见图 3~7。

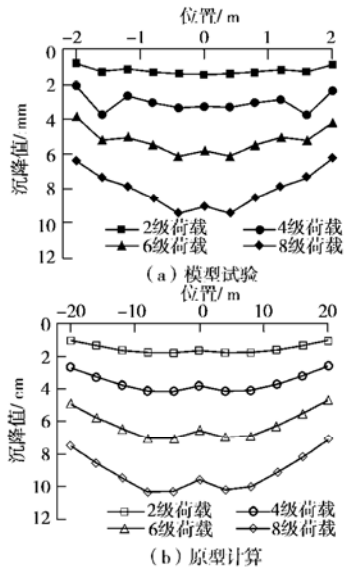


图 3 截面 2 的基础沉降

Fig. 3 The settlement of the section No. 2

根据模型试验的几何、荷载比例,试验结果与原型计算结果大致应存在如下比例关系:沉降 1:10,桩顶反力和桩轴力 1:100,土反力 1:1。考虑比例因素后,比较模型实验和原型计算结果可以看出:

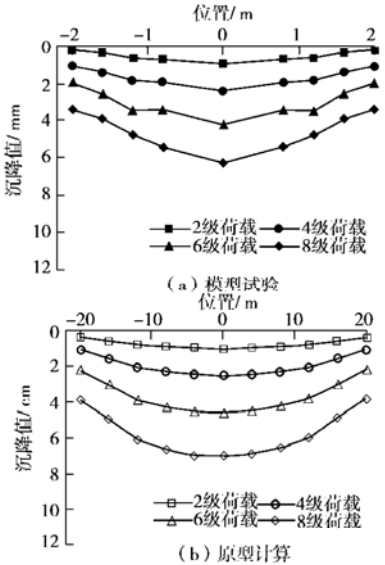


图 4 截面 4 的基础沉降

Fig.4 The settlement of the section No. 4

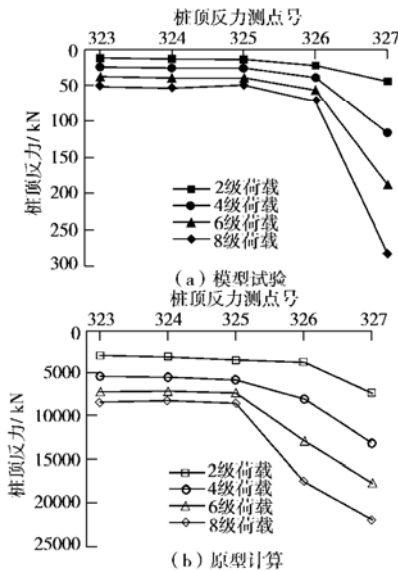


图 5 桩顶反力

Fig. 5 The reaction of the pile top

- (1) 基础沉降较吻合,仅荷载较大时计算值稍大。
- (2) 桩顶反力的变化规律一致性较好,但内区四根桩的计算值高于试验值,核心区桩的计算值在荷载较大时略低。
- (3) 中心桩的桩顶反力较为吻合,轴力沿深度计算值减少的速率较为缓慢、且桩端轴力略大。
- (4) 筏底土压力的变化规律一致性较好,荷载较小时,计算值略低,荷载较大时,计算值略高,尤其是靠近筒体处的土压力计算值较大。

模型试验关于地基土层未能做到的几何、物理相似,模型桩仅置于地基表层 3 m 深度范围内;而实际工程桩置于深达 30 m 的地基土层,两者的桩土相互作用特征不尽相同,因而模型试验值与原型计算值有

一些差别。总的看来, 本方法的计算结果与模型试验在各方面均具有较好的一致性。另外, 随着荷载增加, 沉降增量、土压力增量试验值与计算值均逐渐加大, 表明桩-土体系已呈现非线性特征, 同时说明本文方法能较好地反映桩与土的非线性相互作用。

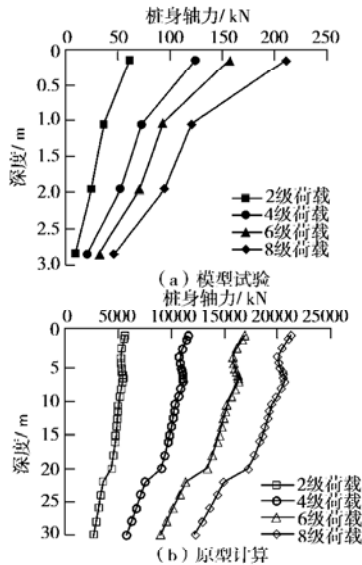


图 6 中心桩轴力

Fig. 6 The axial force of the centre pile

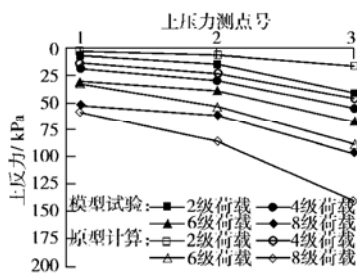


图 7 筏底土压力

Fig. 7 The soil pressure under the raft

5 结 语

(1) 本文所建立的不同桩长、桩径的桩筏基础分析方法的计算结果与模型试验测试结果吻合较好, 说明该方法是合理可行的。

(2) 以近似解析模型为基础建立的不同桩长、桩径的桩-土体系相互作用模型能够较好地模拟桩与土、桩与桩的相互作用特征, 该桩-土体系模型不需要对桩与土进行网格划分, 对不同桩长、桩径、非均匀布桩的桩筏基础进行分析, 十分方便。

(3) 本文的桩筏基础分析方法对于不同布桩方案 (不同的布桩方式、桩数、桩长、桩径、桩体材料等) 的对比与优化分析, 或桩筏基础桩-土刚度优化分布、调平设计, 具有潜在的优势。

参考文献:

- [1] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil[J]. Geotechnique, 1998, 48(1):55 - 72.
- [2] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 363 - 380.(ZAI Jin-min, ZAI Jin-zhang. The analysis and design for the foundation of high-rise building [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993:363 - 380.)
- [3] TA L D, SMALL J C. Analysis and performance of piled raft foundations on layered soils-case studies[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(4):145 - 150.
- [4] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. A contribution to optimum design of piled rafts[J]. Geotechnique, 1998, 48(3):301 - 317.
- [5] 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.)
- [6] 张建辉, 邓安福. 无单元法在筏板基础计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 691 - 695.(ZHANG Jian-hui, DENG An-fu. The application of element-free method to the computation of raft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):691 - 695.)
- [7] LU Y Y, BELYTCHKO T, GU L. A new implementation of the element-free Galerkin method[J]. Comput. Methods Appl. Mech Engrg, 1994, 113:397 - 414.
- [8] 曹国金, 姜弘道. 无单元法研究和应用现状及动态[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 526 - 534.(CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao. Current study, application and development trend of meshless methods[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(4):526 - 534.)
- [9] 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: 44 - 79.(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, 1999:44 - 79.)
- [10] 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, 2001:2 - 27.(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, 2001:2 - 27.)