

层状地基中桩基础的竖向荷载位移关系非线性分析方法

黄茂松^{1, 2}, 江杰^{2, 3}, 梁发云^{1, 2}, 顾倩燕³

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

摘要: 基于 Winkler 地基模型, 推导了分层土中单桩处于线弹性和弹塑性状态的荷载传递矩阵, 提出了单桩竖向位移内力非线性简化分析方法。考虑群桩中的“被动桩”与周围土体的相互“遮拦效应”, 对传统的桩-桩相互作用系数进行修正, 并将其应用于刚性承台下受荷群桩和桩筏基础的非线性分析中。由于考虑了土体的成层性和桩土相互作用的非线性特性, 计算模型更好地反映了土体的实际性状。计算结果与有限元计算值和试验结果进行对比分析, 验证了本文方法的正确性, 可应用于实际工程问题的分析。

关键词: 成层土; 群桩; 桩筏; 桩-桩相互作用; 非线性

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1423-07

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn。

Nonlinear analysis for settlement of vertically loaded pile foundation in layered soils

HUANG Mao-song^{1, 2}, JIANG Jie^{2, 3}, LIANG Fa-yun^{1, 2}, GU Qian-yan³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 2. Department

of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd, Shanghai 200063, China)

Abstract: Based on the Winkler model, the load transfer matrixes of single pile in elastic and elasto-plastic state in layered soil were presented to obtain the simplified nonlinear method for analysis of settlement and internal force of single pile. The sheltering effect between passive piles and soil was taken into account to modify the conventional interaction factor between two piles. The approximate approach with the concept of the interaction factor was employed to study the nonlinear behavior of pile groups with rigid cap and piled raft foundation. Because the nonhomogeneity of soil and nonlinear interaction between piles and soil was considered, the theoretical model agreed with the fact quite well. The calculated results was compared with those of the finite element and field tests, and the feasibility of the proposed model for the analysis of pile groups and piled raft foundation was proved.

Key words: layered soil; pile group; piled raft; pile-pile interaction; nonlinearity

0 引言

尽管桩基是国内外应用最广泛的一类基础形式, 但由于它是一种非常复杂的力学体系, 桩-土-桩相互作用的研究至今仍是岩土工程中的热点、难点问题。Butterfield 和 Banerjee (1971)^[1]、Poulos 和 Davis (1980)^[2]等基于边界元方法, 提出竖向荷载下群桩及桩筏基础的数值分析方法。但是这些方法都是基于 Mindlin 解模拟层状地基中土的反应, 故在计算层状土体位移时是不合适的, 尤其土体模量随深度发生突变的情况。另外这些方法都是假设土体是线弹性介质。Poulos (2001)^[3]、Yang (2000)^[4]等指出常规弹性理

论过高地估计了桩土相互作用, 尤其当桩作为减沉桩来设计时, 必须要考虑桩土相互作用的非线性特性。

用三维数值方法(有限单元法或有限差分法)对群桩进行分析, 可以克服以上方法存在的缺点。Trochanis 等(1991)^[5]、Sanctis 和 Mandolini(2006)^[6]用三维有限元方法对群桩和桩筏基础分析时, 全面考虑了土体的非均匀性和桩土相互非线性特性, 并可施加符合实际情况的边界条件。但这些方法计算工作量大, 建模复杂, 因而不易被工程设计人员所接受。

基金项目: 上海市科委科技攻关重点项目(062012005)

收稿日期: 2007-09-12

文献[7]提出了非均质地基中群桩和刚性桩筏基础竖向荷载位移关系非线性简化分析方法,文中假设土体剪切模量和极限摩阻力均随深度以幂函数分布,在分析中为了简化计算也没有考虑群桩中的“被动桩”与周围土体的相互“遮拦效应”对相互作用系数的影响。文献[8]采用 Mylonakis 和 Gazetas (1998)^[9]的方法,对传统的桩-桩作用系数进行修正,提出了层状地基中群桩竖向位移内力的弹性分析方法。本文在文献[8]的基础上,基于 Winkler 地基模型,考虑桩土作用的非线性特性,利用剪切位移法和传递矩阵法建立了分层土中单桩的荷载位移传递矩阵。在单桩弹塑性分析的基础上,采用文献[7]的方法确定桩土体系刚度矩阵,并考虑“遮拦效应”对群桩相互作用系数的影响,得到了层状地基中群桩和桩筏基础竖向位移和内力,并将计算结果与有限元计算结果和实测值进行了对比。

1 成层土中单桩计算方法

1.1 成层土中单桩弹性分析

在桩土相互作用过程中,假定桩与土之间保持弹性接触,桩土间不发生滑移,可得桩身沉降控制方程为

$$\frac{d^2 W(z)}{dz^2} - \lambda^2 W(z) = 0 \quad (1)$$

式中 $W(z)$ 为深度 z 处桩身位移, $\lambda = \sqrt{\frac{K_z}{E_p A_p}}$; E_p ,

A_p 分别为桩体弹性模量和横截面积; K_z 为桩侧土体弹簧刚度,根据 Randolph 和 Worth (1978)^[10]的 Winkler 假定,可以定义为

$$K_z = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} G_s \quad (2)$$

式中 G_s 为土体剪切模量; r_0 为桩半径; r_m 为受荷桩体对土体的最大影响半径, $r_m = \chi_1 \chi_2 L (1 - \nu_s)$, χ_1, χ_2 为考虑土体不均匀程度的经验系数^[9], L 为桩长, ν_s 为土体泊松比。

将单桩按地基土层划分单元,单元厚度为 h_i ,求解方程 (1),得到 i 单元底部与顶部的位移和轴力关系式:

$$\begin{Bmatrix} W_i \\ P_i \end{Bmatrix}_b = [t^1]_i \begin{Bmatrix} W_i \\ P_i \end{Bmatrix}_t \quad (3)$$

其中 $[t^1]_i$ 为传递矩阵

$$[t^1]_i = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda_i h_i) & -(E_p A_p \lambda_i)^{-1} \sinh(\lambda_i h_i) \\ -E_p A_p \lambda_i \sinh(\lambda_i h_i) & \cosh(\lambda_i h_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由各单元间平衡条件和位移的连续性可得桩顶位移、

荷载与桩端位移、荷载的关系为

$$\begin{Bmatrix} W_{11}(L) \\ P_{11}(L) \end{Bmatrix} = [T^1] \begin{Bmatrix} W_{11}(0) \\ P_{11}(0) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中 $[T^1] = \prod_{i=1}^n ([t^1]_i)$, n 为层数。

取桩顶位移 $W_{11}(0) = 1$, 则桩顶力 $P_{11}(0) = K$, 桩端有 $P(L) = K_b W(L)$, 得到桩顶刚度:

$$K = \frac{K_b T_{11}^1 - T_{21}^1}{T_{22}^1 - K_b T_{12}^1} \quad (6)$$

式中, K_b 为桩端土体简化为弹簧的刚度,可以用 Boussinesq 公式求得

$$K_b = \frac{P_b}{W_b} = \frac{dE_b}{1 - \nu_b^2} (1 + 0.65 \frac{d}{h_b}) \quad (7)$$

式中 E_b, ν_b 表示桩端土体的弹性模量、泊松比; h_b 表示桩端到基岩的深度; d 为桩直径。

所以,对于给定桩顶力 $P_i(0)$ 的单桩,任一层 j 的位移和轴力可以表示为

$$\begin{Bmatrix} W(z) \\ P(z) \end{Bmatrix}_j = \prod_{i=1}^j ([t^1]_i) \begin{Bmatrix} \frac{1}{K} \\ 1 \end{Bmatrix} P_i(0) \quad (8)$$

1.2 成层土中单桩非线性分析

当荷载达到一定水平并继续增加时,桩与土的相互作用将呈现非线性特征。当桩单元 i 的摩阻力达到土的抗剪强度 τ_{fi} 时,该单元进入塑性状态。假设该单元摩阻力保持不变,增加的荷载将转移到其它处于弹性状态的单元。

桩段 i 的控制微分方程为

$$\frac{d^2 W_i(z)}{dz^2} = \frac{\pi d}{E_p A_p} \tau_{fi} \quad (9)$$

求解方程 (9),可得到桩段 i 的底部与顶部的位移和轴力关系式,写成增量的形式:

$$\begin{Bmatrix} \Delta W_i \\ \Delta P_i \end{Bmatrix}_b = [t_f]_i \begin{Bmatrix} \Delta W_i \\ \Delta P_i \end{Bmatrix}_t \quad (10)$$

其中

$$[t_f]_i = \begin{bmatrix} 1 & -(E_p A_p)^{-1} h_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 成层土中群桩的计算方法

群桩的设计通常通过叠加原理来计算,求出桩-桩相互作用系数是关键。Poulos (1988)^[11]、Costanzo 和 Lancellotta (1998)^[12]等计算群桩相互作用系数时考虑了非线性的影响,但需要先求出荷载引起的土体应变场,方法过于繁琐。陈仁朋等^[13]也近似地考虑了荷载水平对桩桩相互作用系数的影响。Chow (1986)^[14]指出:桩在承受轴向荷载情况下,桩周土体主要在

桩侧附近的近场高应变区产生非线性位移反应, 群桩间的大部分土体均处于应变水平很低的远场范围内, 可以认为只产生弹性位移反应。为了计算简便, 本文计群桩之间的相互作用采用弹性方法计算。

2.1 桩-桩相互作用系数的计算

受荷单桩周围土体位移场 W_s 随距离 s 衰减规律为^[15]

$$\psi(s) = \frac{W_s(s, z)}{W_s(r_0, z)} = \begin{cases} \frac{\ln(r_m) - \ln(s)}{\ln(r_m) - \ln(r_0)}, & (r_0 < s < r_m), \\ 0, & (s \geq r_m). \end{cases} \quad (12)$$

由于被动桩刚度和桩端下土体的支承作用, 被动桩位移并不完全等于主动桩在被动桩处产生的土体位移, 即需要考虑“被动桩”与周围土体的相互“遮拦效应”假设主动桩与被动桩的轴线距离为 s , 某深度 z 处, 由于主动桩的影响被动桩桩周土的位移为

$$W_s(s, z) = \psi(s)W_{11}(z), \quad (13)$$

被动桩位移为 $W_{21}(z)$, 所以被动桩与桩周土体相对位移为 $[W_{21}(z) - W_s(s, z)]$, 得被动桩桩身沉降控制方程为

$$E_p A_p \frac{d^2 w_{21}(z)}{dz^2} - K_z [W_{21}(z) - W_s(s, z)] = 0. \quad (14)$$

将被动桩按地基土层划分单元, 求解方程式(14), 对于任意单元 i 底端和顶端有关系式:

$$\begin{Bmatrix} W_{21} \\ P_{21} \end{Bmatrix}_{i,b} = [t^1]_i \begin{Bmatrix} W_{21} \\ P_{21} \end{Bmatrix}_{i,t} + [t^2]_i \begin{Bmatrix} W_{11} \\ P_{11} \end{Bmatrix}_{i,t}, \quad (15)$$

其中 $[t^1]_i$ 见式(4),

$$[t^2]_i = \frac{1}{2} \psi(s) \begin{bmatrix} -\lambda_i h_i \sinh(\lambda_i h_i) \\ E_p A_p \lambda_i [\sinh(\lambda_i h_i) + \lambda_i h_i \cosh(\lambda_i h_i)] \\ \frac{1}{E_p A_p} [h_i \cosh(\lambda_i h_i) - \frac{1}{\lambda_i} \sinh(\lambda_i h_i)] \\ -\lambda_i h_i \sinh(\lambda_i h_i) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由各单元间平衡条件和位移的连续性可得被动桩顶位移、荷载与桩端位移、荷载的关系为

$$\begin{Bmatrix} W_{21}(L) \\ P_{21}(L) \end{Bmatrix} = [T^1] \begin{Bmatrix} W_{21}(0) \\ P_{21}(0) \end{Bmatrix} + [T^2] \begin{Bmatrix} W_{11}(0) \\ P_{11}(0) \end{Bmatrix}, \quad (17)$$

其中, $[T^1] = \prod_{i=1}^n ([t^1]_i)$,

$$[T^2] = \sum_{i=1}^n [t^1]_n \dots [t^1]_{i+1} [t^2]_i [t^1]_{i-1} \dots [t^1]_1.$$

取主动桩桩顶位移 $W_{11}(0) = 1$, 桩顶荷载 $P_{11}(0) = K$, 则被动桩桩顶位移 $W_{21}(0) = \alpha$, 桩顶荷载 $P_{21}(0) = 0$, 带入式(17)可得到两根桩的相互作用系数:

$$\alpha = \frac{W_{21}(0)}{W_{11}(0)} = -\frac{K_b T_{11}^2 - T_{21}^2 + (K_b T_{12}^2 - T_{22}^2)K}{K_b T_{11}^1 - T_{21}^1}. \quad (18)$$

对如图 1 所示的 4 种类型土层中的两根相同桩的相互影响系数进行分析, 并与 Kitiyodom 和 Matsumoto^[16]的 PRAB 程序计算结果、Chow^[17]的有限元计算结果进行对比。从图 2 可以看出, 相互作用系数随桩的距离增大衰减很快, 在情况 1 和情况 2 两种类型的土中, 本文计算结果和 PRAB、有限元计算结果很接近。当桩底土较软弱(情况 3 和情况 4)时, 本文方法考虑了“被动桩”与周围土体的相互“遮拦效应”对相互作用系数的影响, 计算结果比 PRAB 程序用 Mindlin 解的近似方法计算结果更接近有限元解。

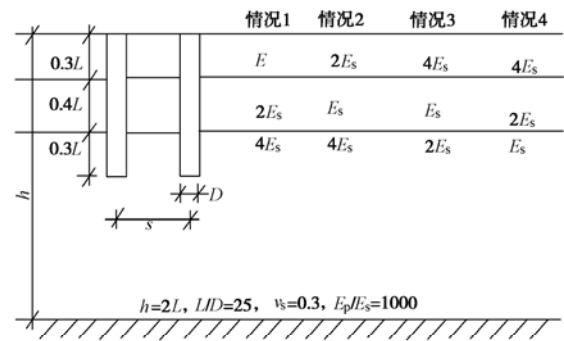


图 1 成层土特性

Fig. 1 Parameters for layered soil

2.2 群桩中的“被动桩”的分析

对于“主动桩”(Loaded pile)桩顶作用任意荷载 P_i 下, “被动桩”(Loaded free pile)的位移和轴力可由下式计算:

$$\begin{Bmatrix} W_{21}(z) \\ P_{21}(z) \end{Bmatrix}_j = [T^1]_j \begin{Bmatrix} \frac{\alpha P_i}{K} \\ 0 \end{Bmatrix} + [T^2]_j \begin{Bmatrix} \frac{1}{K} \\ 1 \end{Bmatrix} P_i. \quad (19)$$

Caputo 和 Viggiani (1984)^[18]为研究相邻的两根相同桩的相互影响, 在均质砂土中做了一系列试验。对主动桩和被动桩桩顶位移分别进行量测, 试验曲线见图 3。可以看出, 主动桩的荷载位移曲线呈现非线性特性, 而被动桩基本上处于线弹性状态。用本文单桩非线性分析方法对主动桩荷载位移曲线进行拟合, 得到拟合参数为, 桩和砂土的弹性模量分别为 20 GPa 和 90 MPa, 砂土的泊松比为 0.3, 极限摩阻力为 28 kPa。用以上参数对主动桩进行弹性分析, 通过考虑了“遮拦效应”的桩桩相互作用系数计算出被动桩的位移, 和实测的被动桩位移吻合的很好。由此可见, 用弹性理论来分析桩桩相互作用完全能满足精度要求, 且分析过程大为简化。

2.3 成层土中的群桩分析

如上所述, 对群桩进行分析时, 主动桩用非线性方法计算, 桩桩相互作用用弹性方法分析。考虑刚性承台群桩, 承台与土体不接触, 桩数为 m , 群桩承台

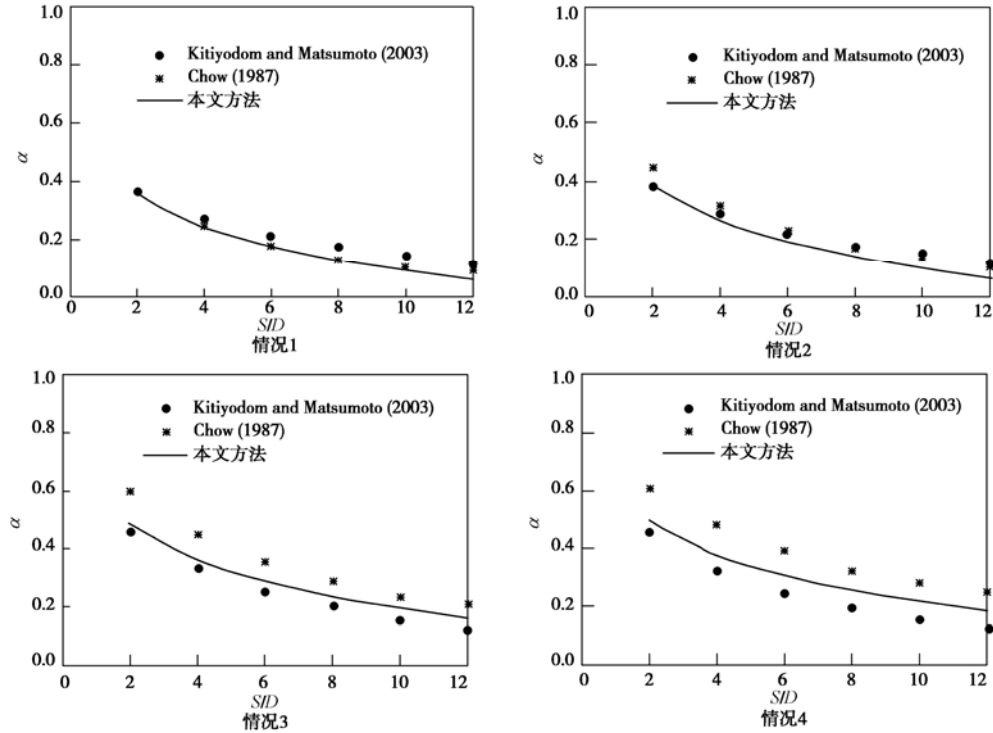


图2 成层土中桩—桩相互作用系数

Fig. 2 Interaction factors for piles in layered soil

竖向位移 W_G 等于各桩桩顶竖向位移 W_i 即

$$W_G = W_i = \alpha_{i1} P_1 / K + \alpha_{i2} P_2 / K + \dots + \alpha_{in} P_n / K + \dots + \alpha_{im} P_m / K \quad (20)$$

其中, α_{ij} 表示第 j 根桩与第 i 根桩的相互作用系数, (当 $i=j$ 时, $\alpha_{ij}=1$), K 为用式 (6) 弹性理论计算的桩顶刚度, K_i 为非线性方法计算的桩顶刚度, 它随荷载水平变化的, P_j 为桩 j 分担的承台荷载, 则承台上作用竖向荷载 P_G 为

$$P_G = \sum_{i=1}^m P_i \quad (21)$$

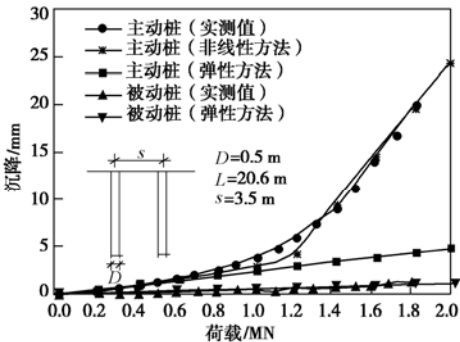


图3 两根桩的相互作用

Fig. 3 Interaction between two identical piles

3 成层土中刚性承台下的桩筏基础分析

对筏板和土的接触面进行离散, 单元形式详见文献[8]。考虑筏板和土的位移协调, 则有

$$\{P_{sp}\} = [K_{sp}] \{w_{sp}\} \quad (22)$$

其中 $\{P_{sp}\} = \{P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sn}, P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}\}^T$;
 $\{w_{sp}\} = \{w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{sn}, w_{p1}, w_{p2}, \dots, w_{pn}\}^T$ 。

P_{si} 和 w_{si} 分别为土单元 i 上的等效集中力和平均位移;
 $P_{si} = \iint p_s dA_{si}$; p_s 为土单元上的分布力; A_{si} 为土单元 i 的面积; n_s 为土单元的个数; P_{pi} 和 w_{pi} 分别为桩 i 顶面的力和位移; n_p 为桩的数量。 $[K_{sp}]$ 为桩土体系的刚度矩阵, 利用式 (22) 就可以求得刚性筏板群桩基础荷载沉降关系和桩、筏板各自分担的荷载, 从而实现

对桩筏基础的求解。

桩土体系的刚度矩阵 $[K_{sp}]$ 一般由柔度矩阵 $[F_{sp}]$ 求逆后得到, $[F_{sp}]$ 可写成子矩阵的形式

$$[F_{sp}] = \begin{bmatrix} f^{ss} & f^{sp} \\ f^{ps} & f^{pp} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中子矩阵 $[f^{ss}]$, $[f^{sp}]$, $[f^{ps}]$, $[f^{pp}]$ 分别表示土表面对土表面、土表面对桩顶面、桩顶面对土表面、桩顶面对桩顶面的相互作用关系矩阵。

如前所述, 为计算简便, 只考虑桩土界面相互作用的非线性特性, 则子矩阵 $[f^{pp}]$ 中的柔度系数 f_{ii}^{pp} 为

$$f_{ii}^{pp} = \frac{1}{K_i} \quad (i=1, 2, \dots, n_p) \quad (24)$$

柔度系数 f_{ij}^{pp} 通过桩桩相互作用系数得到

$$f_{ij}^{pp} = \frac{\alpha}{K}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n_p; i \neq j) \quad (25)$$

式中 柔度系数 f_{ij}^{pp} 为桩 i 在桩顶单位荷载作用下的桩顶位移; f_{ij}^{pp} 为作用在桩 j 顶面单位荷载引起桩 i 顶面的位移; K_i , K 分别为非线性方法和弹性方法计算的桩顶刚度。子矩阵 $[f^{ss}]$, $[f^{sp}]$, $[f^{ps}]$ 的求解方法作者在文献[7]有过详细地论述。

4 算例分析

4.1 算例一

对中船集团上海长兴造船基地船坞坞室底板桩进行抗压静载荷试验, 根据工程地质资料, 4 号坞室底板 #7 桩处地层分布及相关参数见表 1。土层名称依次为吹填土(砂质粉土)、灰色砂质粉土、灰色淤泥质黏土、灰色黏土、灰色粉质黏土、灰色粉质黏土夹粉性土。其中第⑤₃₋₁层灰色粉质黏土夹粉性土为桩基的持力层。各层土体泊松比 ν_s 均取 0.3, 土体的弹性模量由压缩模量换算得到^[19]。该桩型为 $\Phi 600$ PHC 管桩, 桩长 40 m, E_p 为 20 GPa, 桩顶标高 4.539 m, 进入持力层 3 m, 试验采用慢速维持荷载法。计算结果与实测值的对比曲线如图 4 所示。本文假设桩的极限承载力可以由计算的荷载 - 位移曲线的最后一个拐点来确定, 即各桩单元摩阻力均达到极限摩阻力时的桩顶荷载。计算确定该桩极限承载力理论值为 3600 kN, 和实测比较吻合。当桩顶荷载较小时, 轴力分布计算值和实测值比较接近, 随着荷载增大, 轴力分布计算值比实测值略为偏小。但总体来讲, 用本文的方法来分析单桩的位移和内力有可行性, 且方法简单, 编程方便。

表 1 地层分布

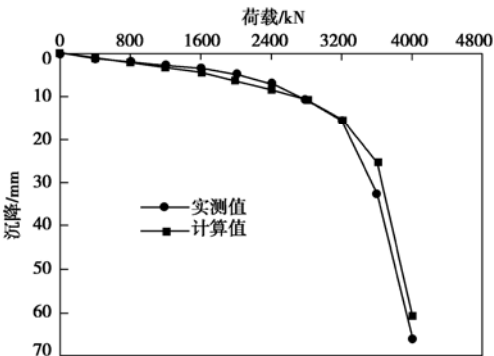
Table 1 Soil profile and soil properties

层序	层厚/m	弹性模量 /MPa	极限摩阻力 /kPa
① ₁₋₁	5.8	29.37	15
② _{3上}	9.9	25.29	35
② _{3下}	6.8	16.56	40
④	4.5	6.84	35
⑤ ₁₋₁	6.0	8.94	40
⑤ ₁₋₂	4.0	12.99	45
⑤ ₃₋₁	15.8	14.10	55

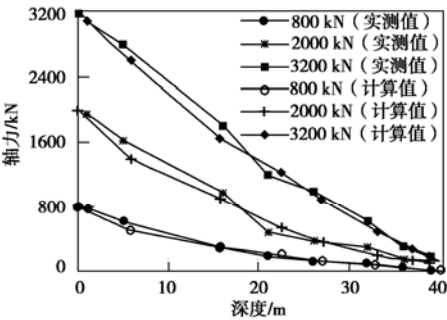
4.2 算例二

O'Neill (1981)^[20] 对 3×3 群桩基础进行现场试验, 群桩的布置和土层分布见图 5。桩的直径为 311 mm, 壁厚 4.6 mm, 埋深 18.45 m, 桩距 1.22 m; 承台为刚性, 且不与土体接触。土体分为两层, 泊松比均假设为 0.499, 上下两层土的极限摩阻力分别为 21.5 kPa 和 37.4 kPa, 弹性模量分别为 43 MPa 和 74.8 MPa。由图 6 可知, 当群桩处于弹性状态时的荷载沉降关系

与实测结果吻合的较好, 随着荷载的增大, 桩侧土体逐渐进入塑性, 用本文的方法可以很好的预测群桩的极限承载力, 但沉降比实测值略小, 这主要是由假设桩底土始终处于弹性状态而引起的。分别对群桩中角桩、边桩和中心桩所承担的荷载进行计算, 结果如图 7 所示。可以看出群桩中角桩分担的荷载最大, 边桩次之, 中心桩最小。当群桩进入塑性状态时, 荷载进行重分布, 角桩分担的荷载逐渐减小, 而中心桩分担的荷载逐渐增大, 最后各桩分担的荷载趋于均匀, 比



(a) 单桩的荷载 - 沉降关系



(b) 桩身轴力随深度的变化

图 4 计算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison between calculated and test values

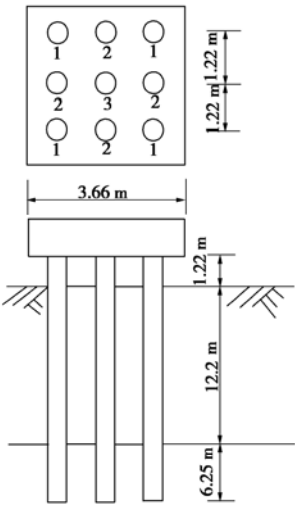


图 5 群桩的布置

Fig. 5 Layout of the pile groups

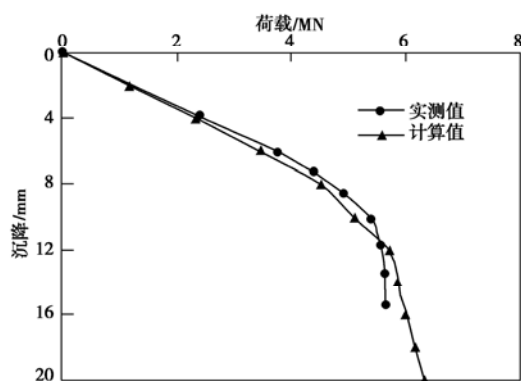


图6 群桩的荷载-沉降关系

Fig. 6 Load-settlement behaviour for the pile groups

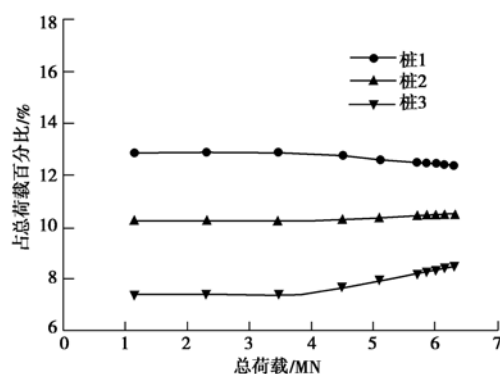


图7 群桩的荷载分担关系

Fig. 7 Load carried by different piles in a group

较符合工程实际情况。由此可见, 本文方法可以克服弹性分析方法的缺点, 能很好预测群桩的非线性特性。

4.3 算例三

Kakurai等^[21]对层状地基上的一个桩筏基础进行了现场测试。假设该筏板为圆形且为刚性, 与土体紧密接触, 其几何性状、桩的布置以及土层情况见图8所示。筏板上的荷载假设为均匀分布, 地基土的弹性模量自上而下依次为8.78, 10.84, 16.03, 30.28 MPa, 泊松比均为0.45。由于没有实测数据, 张建辉^[22]综合测试结果分析并且假设桩侧的极限摩阻力为荷载为6 MN时所对应的值。本文也采用这一假设。将筏板和土体接触面沿径向和环向离散为44个土单元和5个桩

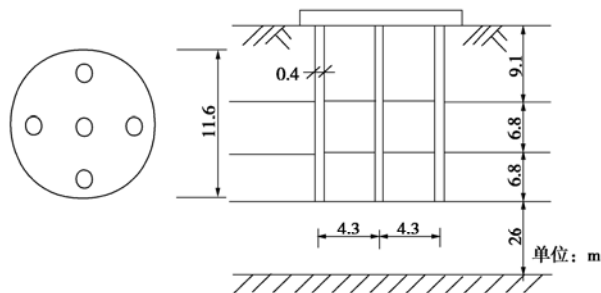


图8 桩筏基础的布置

Fig. 8 Layout of the piled rafts

单元, 应用以上参数对这一桩筏基础进行弹性和非线性分析, 扣除由结构自重引起的筏板沉降, 计算结果如图9和图10所示。可以看出本文非线性分析方法明显优于线弹性分析方法, 筏板的平均沉降和桩承担的荷载的非线性计算结果都与实测值吻合地很好。

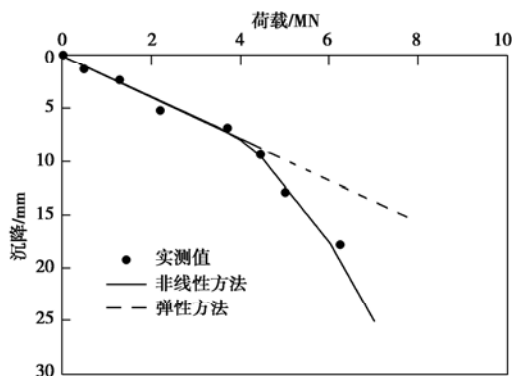


图9 群桩的荷载-沉降关系

Fig. 9 Load-settlement behaviour for the piled rafts

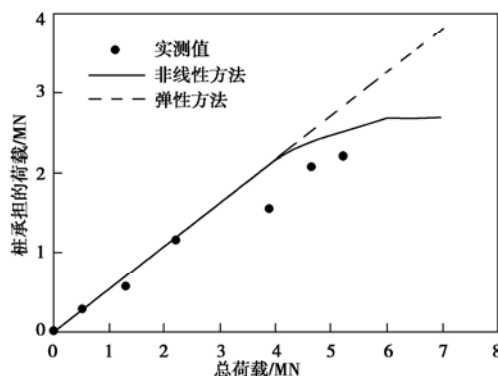


图10 桩荷载与总荷载的关系

Fig. 10 Load carried by piles

5 结 论

本文导出了一套完整的确定群桩和桩筏基础轴向荷载-位移关系的非线性简化分析方法, 得到如下结论:

(1) 单桩分析时采用理想弹塑性模型是比较合理的, 能正确反映单桩在实际荷载作用下的荷载沉降关系。

(2) 考虑了“遮拦效应”对桩-桩相互作用系数的影响, 较传统方法能更准确地分析桩桩相互作用。

(3) 用弹性的方法分析桩桩相互作用系数能够满足精度要求, 计算过程得到简化。

(4) 带有刚性承台的群桩角桩分担的荷载最大, 边桩次之, 中心桩最小, 可以预见角桩最先达到其极限承载力。本文非线性方法所模拟的荷载重分布过程能够符合工程实际情况。

(5) 随着荷载增加, 筏板底下桩开始进入塑性, 桩承担的部分荷载向筏板转移, 传统的桩筏基础设计方法不考虑筏板对承载力的贡献显得过于保守。

参考文献:

- [1] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. The elastic analysis of compressible piles and pile groups[J]. *Geotechnique*, 1971, **21**(1): 43 - 60.
- [2] POULOS H G, DAVIS E H. *Pile foundation analysis and design*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [3] POULOS H G. Piled raft foundations: design and applications[J]. *Geotechnique*, 2001, **51**(2): 95 - 113.
- [4] YANG M. Study on reducing-settlement pile foundation based on controlling settlement principle[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(4): 481 - 486.
- [5] TROCHANIS A M, BIELAK J, CHRISTIANO P. Three-dimensional nonlinear study of piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, **117**(3): 429 - 447.
- [6] SANCTIS L, MANDOLINI A. Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(12): 1600 - 1610.
- [7] 江 杰, 黄茂松, 梁发云, 顾倩燕. 桩筏基础相互作用非线性简化分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(1): 112 - 117. (JIANG Jie, HUANG Mao-song, LIANG Fa-yun, GU Qian-yan. Analysis of the interaction mechanism of piled raft foundation with simplified nonlinear model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(1): 112 - 117. (in Chinese))
- [8] 李 早, 黄茂松, 戴 兵. 层状地基中刚性承台群桩竖向位移内力分析[J]. *同济大学学报*, 2007, **35**(4): 446 - 450. (LI Zao, HUANG Mao-song, DAI Bing. Analysis of vertical settlement and internal forces of pile groups with rigid cap in layered soils[J]. *Journal of Tongji University*, 2007, **35**(4): 446 - 450. (in Chinese))
- [9] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil[J]. *Geotechnique*, 1998, **48**(1): 55 - 72.
- [10] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded pile[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1978, **104**(12): 1465 - 1488.
- [11] POULOS H G. Modified calculation of pile-group settlement interaction[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, **114**(6): 697 - 706.
- [12] COSTANZO D, LANCELLOTTA R. A note on pile interaction factors[J]. *Soils and Foundations*, 1998, **38**(4): 251 - 253.
- [13] 陈仁朋, 梁国钱, 俞济棠, 陈云敏. 考虑桩土相对滑移的单桩和群桩的非线性分析[J]. *浙江大学学报*, 2002, **36**(6): 668 - 673. (CHEN Ren-peng, LIANG Guo-qian, YU Ji-tang, CHEN Yun-min. Non-linear analysis of behavior of axially loaded pile groups considering limited soil resistance[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2002, **36**(6): 668 - 673. (in Chinese))
- [14] CHOW Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1986, **10**: 59 - 72.
- [15] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of vertical deformation of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1979, **29**(4): 423 - 439.
- [16] KITIYODOM P, MATSUMOTO T. A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 2003, **27**: 85 - 109.
- [17] CHOW Y K. Axial and lateral response of pile groups embedded in nonhomogeneous soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 1987, **11**: 621 - 638.
- [18] CAPUTO V, VIGGIANI C. Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects[J]. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 1984, **18**(2): 32 - 51.
- [19] 梁发云. 基于多孔介质理论的地基土变形模量估算方法[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(7): 1147 - 1150. (LIANG Fa-yun. An approach for estimating deformation modulus of subsoil based on porous medium theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(7): 1147 - 1150. (in Chinese))
- [20] O'NEILL M W. Field study of pile group action, interim report, mathematical models and design of load tests[R]. Report FHWA/RD-81/001. Washington, D C: US Federal Highway Administration, US Department of Transportation. 1981.
- [21] KAKURAI M, YAMASHITA K, TOMONO M. Settlement behaviour of piled raft foundation on soft ground[C]// *Proc 8th Asian Regional Conf on SMFE*, 1987, **1**: 373 - 376.
- [22] 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 foundation on layered soil and the pile layout optimization[D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University. 1999. (in Chinese))